

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et populaire

1/90

*Tese*

وزارة التعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

SUJET

**SIMULATION ET COMMANDE OPTIMALE  
DU PRECHAUFFEUR D'UN FOUR DE  
CIMENTERIE**

Proposé par : M. F. CHIGARA · Etudié par : K. AOUCHICHE - Dirigé Par : M. F. CHIGARA  
et M.A. Hadj TOUTAH

PROMOTION : JUIN 1990

R e m e r c i e m e n t s

Je renouvelle ma gratitude à l'attention de  
MM. F. CHIGARA et A. HADJ TOUTAH pour leur contribution  
à l'élaboration de ma thèse.

\*  
\* \*  
\*

## TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
Introduction .....	1
<u>CHAPITRE I</u> - THERMIQUE de la CUISSON du CIMENT en VOIE SECHE .....	3
I.1 - Introduction .....	3
I.2 - Description sommaire du procédé de fabrication du ciment par voie sèche .....	4
I.3 - Bilan thermique d'une installation de cuisson	9
I.4 - Influence des gains calorifiques sur la consommation calorifique : Apport du préchauffeur et du refroidisseur .....	10
I.4.1. <u>Pertes engendrées par une installation                 de cuisson avec long four rotatif.....</u>	10
I.4.2. <u>Apport du préchauffeur à suspension ....</u>	11
I.4.3. <u>Apport du refroidisseur .....</u>	11
I.4.4. <u>Analyse comparative des différents systèmes                 de cuisson par voie sèche .....</u>	13
I.5 - Description du préchauffeur - Echange de chaleur - Efficacité de séparation et possibilité d'action sur le rendement calorifique .....	13
I.6 - Rôle du préchauffeur à suspension .....	18
<u>Chapitre II</u> - MODELISATION - IDENTIFICATION du PRECHAUFFEUR à SUSPENSION .....	19
II.1 - Généralités .....	19
II.2 - Notions générales sur la simulation d'un processus	19
II.3 - Etapes fondamentales de la simulation mathématique du processus .....	20
II.3.1. <u>Choix et construction du modèle du processus</u>	20
II.3.2. <u>Algorithme de simulation .....</u>	21
II.3.3. <u>Vérification de l'adéquation du modèle                 choisi au système réel et correction                 du modèle - Identification paramétrique</u>	23



	<u>Page</u>
II.4 - Application au préchauffeur .....	25
II.4.1. <u>Modélisation d'une tour de préchauffage</u> .....	25
II.4.2. <u>Algorithme de simulation du préchauffeur</u> .....	35
II.4.3. <u>Identification paramétrique</u> .....	38
II.5 - Influence des paramètres du préchauffeur .....	42
<u>Chapitre III - COMMANDE OPTIMALE du PRECHAUFFEUR</u> à SUSPENSION .....	47
III.1 - Système de commande automatique optimale .....	47
III.2 - Optimisation des processus avec emploi de modèles mathématiques .....	48
III.3 - Optimisation des processus statiques .....	49
III.3.1. <u>Définition du problème</u> .....	49
III.3.2. <u>Principe de la solution</u> .....	51
III.3.3. <u>Méthode du gradient</u> .....	51
III.4 - Commande optimale du préchauffeur à suspension	54
III.5 - CONCLUSION .....	56
 Annexe A .....	 58
Annexe B .....	66
Annexe C .....	76
Index bibliographique .....	80



## INTRODUCTION

*Le préchauffeur à suspension fut introduit dans l'industrie pour la première fois en 1951. Sa configuration de plusieurs étages de cyclones permet une utilisation efficace de la chaleur des gaz, un échange de chaleur rapide et intensif résulte du contact direct entre la matière finement dispersée et les gaz chauds.*

*L'utilisation du préchauffeur apporte, en conséquence, un développement décisif dans l'économie d'énergie.*

*Les économies d'énergie obtenues avec l'introduction du préchauffeur sont de deux types :*

- 1. celles réalisées par la diminution de la quantité de combustible rapportée à la production.*
- 2. celles résultant de l'amélioration du temps de marche et de l'éventuelle augmentation de capacité.*

*Pour pouvoir optimiser la consommation énergétique de façon scientifique, une méthode de simulation mathématique doit être envisagée.*

*Le projet consiste en l'utilisation d'une méthode de simulation mathématique, à la fois chimique et thermique, du comportement du préchauffeur à cyclones. Cette méthode apporte une meilleure connaissance de la qualité des échanges entre matière et gaz et nous permet la recherche de résultats concrets, quant à l'analyse et la synthèse du système de préchauffage. La simulation réalisée, nous pouvons adopter, en définitive, une commande optimale du processus.*

Le procédé a été appliqué au préchauffeur de la cimenterie de *MEFLAH* et peut être applicable à la conception de nouvelles installations ainsi qu'à l'amélioration des installations existantes.

L'intérêt porté à la conception d'un système est de posséder les plus hautes performances. Ces performances dépendent en large partie des décisions adoptées. Le but final de cette étude est de choisir le meilleur ensemble de décisions afin de concrétiser des objectifs bien définis :

1. réaliser un modèle qui nous permet de prédire les effets de telles décisions.
2. avoir une connaissance parfaite de tous les facteurs qui ont une influence directe sur le système.
3. Pour terminer, minimiser une fonction coût qui nous permet de quantifier les effets de telles décisions.

\*  
\*   \*  
\*

C H A P I T R E I

---

THERMIQUE de la CUISSON du CIMENT  
en VOIE SECHE

---



## I. THERMIQUE de la CUISSON du CIMENT en VOIE SECHE.

### I.1. Introduction

Dans cette première partie, la technologie de la fabrication du ciment Portland est présentée sommairement, les problèmes purement mécaniques d'exploitation de carrières, de transport et de manutention des matières, ont été laissés de côté. La fabrication du ciment Portland n'a pas un caractère complexe, quoiqu'elle requière un soin extrême dans le mélange de ses deux composants simples et bien connus, argile et craie.

En plus du dosage de ces deux matières, une opération fondamentale dans la fabrication du ciment est la cuisson. Au cours de celle-ci est élaboré le clinker. Cette opération s'effectue dans un four qui est l'objet d'une surveillance permanente et attentive car les conditions dans lesquelles il travaille (température, débit, ...) doivent être maintenues dans des limites étroites. Les dispositions et les conditions de fonctionnement d'un four dépendent du mode de fabrication adopté.

Les procédés de fabrication du ciment Portland sont :

- le procédé par voie humide ;
- le procédé par voie semi-sèche ;
- le procédé par voie sèche.

La voie humide est généralement employée lorsque les matières premières sont naturellement riches en eau et facilement délayables, alors que la voie sèche et semi-sèche s'emploient lorsque les matières premières sont pauvres en eau. Dans la voie sèche, une opération dite d'agglomération est supprimée et le four est équipé pour traiter directement la poudre issue de l'homogénéisation. Par ailleurs, notre étude sera consacrée au procédé de fabrication par voie sèche. Le principe de fabrication du ciment Portland est simple. Il se réduit aux trois opérations de :

- Préparation ;
- Calcination ;
- Broyage.

L'invention du préchauffeur a apporté un développement décisif dans l'économie de chaleur pour la fabrication du ciment par voie sèche. Le préchauffeur à quatre étages fût introduit dans l'industrie du ciment en 1951 grâce à Mr Vagel Jörgensen, Ingénieur à Copenhague-Frédéricksberg. Seront abordées par la suite une description du préchauffeur à suspension ainsi que son influence sur le bilan thermique d'une installation de cuisson.

## I.2. Description sommaire du procédé de fabrication du ciment par voie sèche.

Les différentes méthodes de cuisson subdivisent la fabrication du ciment par voie sèche en quatre sortes de procédés :

- les procédés à long four rotatif sans installation interne ;
- les procédés à long four rotatif avec échangeur de chaleur interne au four (par exemple : chaîne) ;
- les procédés à four rotatif court travaillant en conjonction avec un préchauffeur ;
- les procédés à four rotatif avec perte de chaleur dans une chaudière.

Dans notre cas, on s'intéressera au procédé de cuisson avec four rotatif lié à un préchauffeur. Ce procédé comporte les opérations ci-après : (voir figure I.1).

### I.2.1. Extraction de la matière première.

La matière première abattue par explosif est enlevée par pelles mécaniques ou extraite directement par excavateur, est chargée sur wagonnets ou sur camions.

### I.2.2. Concassage et broyage.

L'argile et le calcaire en blocs doivent être réduits en poudre et séchés, les deux opérations s'effectuent simultanément. Les matières premières utilisées en voie sèche contiennent généralement moins de 20% d'eau. Le broyage peut être effectué par des broyeurs à piste circulaire ou à boulets.



### I.2.3. Dosage et homogénéisation.

Lorsque les matières premières sont de qualité régulière, on effectue un premier dosage approximatif qui permet de s'approcher de la composition cherchée. Il ne reste plus ensuite qu'à mélanger le contenu des différents silos de titres variés et ceci dans les proportions cherchées.

L'influence de la composition est prépondérante dans l'obtention d'un bon ciment de qualité supérieure, ainsi, le mélange idéal se comporte fort bien dans le four et produit un bon ciment, en dehors de certaines limites, la cuisson ne serait pas correcte et le ciment de mauvaise qualité.

L'homogénéisation d'un silo peut être mécanique ou pneumatique.

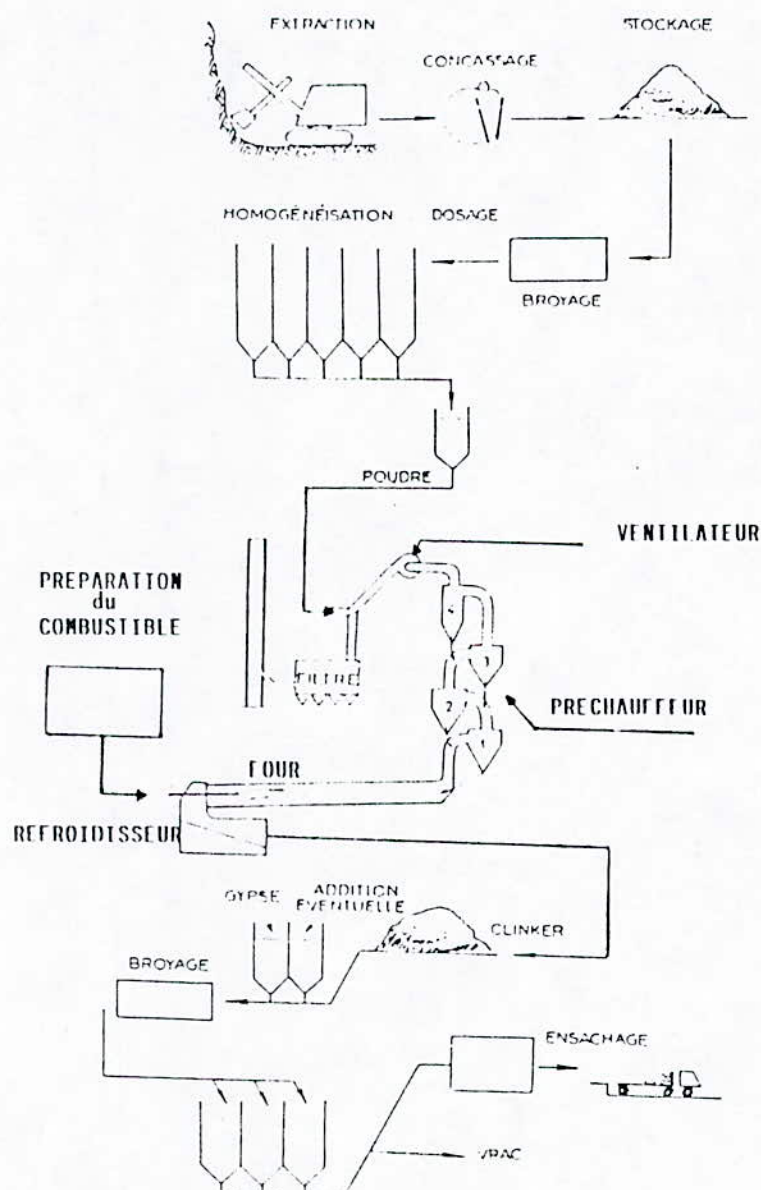


Figure I.1. Schéma de fabrication du ciment par voie sèche.



Le tableau I.1 donne la composition chimique du cru.

Composition du cru	Concentration ( % )
SiO <sub>2</sub>	8,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,90
CaCO <sub>3</sub>	81,50
MgO	2,90

Tableau I.1 - Concentration des composants du cru.

#### I.2.4. Transport des poudres.

Les poudres sont généralement manipulées entre les différents postes par des appareils à fonctionnement pneumatique comportant dans certains cas des organes mécaniques en mouvement. Citons comme exemples : les pompes, les transporteurs sous pression, les aéroglissières.

#### I.2.5. Granulation de la matière première.

La matière première pulvérulente est amenée à l'état de granules de 0,10 à 0,20 mm de diamètre. La granulation s'effectuait autrefois dans des tambours horizontaux. Ces appareils, aujourd'hui abandonnés, sont remplacés par des "assiettes" ou "soles granulatrices".

#### I.2.6. La cuisson.

Cette opération s'effectue dans un four dont la capacité est généralement importante et qui nécessite d'assez gros investissements. Toutefois, le préchauffage de la matière et le passage du clinker dans le refroidisseur font partie de la cuisson. Dans cette étape, on retient l'ordre chronologique suivant:

a) Le préchauffage de la matière

Les gaz chauds formés dans la partie rotative sont tirés par le ventilateur et circulent à grande vitesse dans les cyclones qui composent le préchauffeur. La matière en poudre est injectée à la partie supérieure et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer enfin dans le four. Le rôle espéré d'un tel dispositif est :

- d'échauffer la matière le plus rapidement possible ;
- de ne pas créer une perte de charge importante ;
- de ne pas provoquer l'entraînement de la poussière.

b) Le four rotatif (cuisson proprement dite)

Le four rotatif est essentiellement constitué par un cylindre d'acier de 2 à 6m de diamètre et de 60 à 180m de long. Ce cylindre de 15 à 30 mm d'épaisseur est garni intérieurement d'un matériau réfractaire qui assure sa protection vis-à-vis des hautes températures.

Le four tourne à une vitesse de 1,3 tours par minute, il est mû par un ou deux moteurs électriques attaquant, par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, une couronne dentée située à une distance égale de chacune de ses extrémités.

Le four qui présente une inclinaison de 3 à 5% favorisant la circulation de la matière, repose sur des trains de galets. Un galet à axe vertical dit "**de butée**" s'oppose au mouvement naturellement descendant du four. Une tuyère pénètre à l'intérieur du four et sert à injecter le combustible qui peut être le gaz naturel, le charbon ou le fuel. L'installation comporte, en outre, un certain nombre de ventilateurs de tailles variées servant au soufflage de l'air secondaire dans le four. La matière pénétrant dans le four à une teneur en eau comprise entre 0,005 et 0,01, puis au fur et à mesure qu'elle se dirige vers l'aval, elle rencontre des gaz de plus en plus chauds qui provoquent les effets suivants :

- fin de la dessiccation (l'eau de constitution de la matière s'évapore) ;



- fin de la décarbonation-dissociation des carbonates de calcium puis départ des alcalins ;
- clinkérisation dans la zone terminale (zone de cuisson) c'est-à-dire apparition d'un liquide riche en aluminates de calcium (1200 -1300°C) puis formation des silicates de calcium avec disparition progressive de CaO (vers 1450°C).

En fait, les opérations ne sont pas aussi différenciées mais se chevauchent dans le temps.

#### c) Refroidisseurs à clinker

Le clinker sort du four rotatif à une température élevée voisine de 1200°C et les calories ainsi emportées sont récupérées dans un appareil spécial appelé "**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. L'efficacité du refroidisseur est d'autant plus grande que l'échange thermique est mieux assuré entre l'air et le clinker. On distingue les refroidisseurs cylindriques à ballonnets et les refroidisseurs à grille qui sont actuellement les plus répandus. Ils sont constitués par une série d'éléments mobiles favorisant l'avancement du clinker et au travers desquels circule l'air de refroidissement fourni par des ventilateurs.

#### I.2.7. Broyage.

Au cours du broyage du clinker, on y ajoute des quantités soigneusement dosés de "retardateurs", qui consistent en gypse ( $\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou en plâtre ( $\text{CaSO}_4 - \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), faute de quoi il y aurait au gachage raidissement ou prise prématurée. La quantité de gypse nécessaire pour réaliser le temps de prise le plus favorable dépend dans une large mesure de la teneur en alumine du mélange. Le mélange de clinker, de gypse ou de plâtre est broyé jusqu'à une surface spécifique qui est donnée pour chaque type de ciment.

#### I.2.8. Livraison du ciment.

Le ciment broyé est généralement conservé dans des silos en béton et ensaché par des machines automatiques dans des sacs de papier kraft ou bien transvasé du silo dans des citernes montées sur wagons ou camions automobiles.



### I.3. Bilan thermique d'une installation de cuisson.

L'élaboration du clinker, à partir des matières premières, nécessite une certaine quantité de chaleur utile. Cette quantité de chaleur de l'ordre de 400 kcal/kg clinker dépend de la composition chimique et de la minéralogie des matières premières, mais varie dans un intervalle étroit. Toute chaleur consommée en plus de la chaleur utile est due aux pertes dans le système.

Un exemple typique de bilan thermique d'une installation de cuisson par voie sèche avec préchauffeur à suspension est donné dans le tableau I.2.

Nature de la chaleur consommée		Kcal/kg clinker		%
			Total	
1	Chaleur quasi constante :			
	- Chaleur théorique nécessaire pour la formation du clinker	415		
	- Poussières dans les gaz de sortie du préchauffeur	3		
	- Evaporation de l'eau contenue dans la matière première	5	423	56,40
2	Pertes dans le four rotatif :			
	- Radiation	37	37	5
3	Pertes dans le préchauffeur :			
	- Radiation	25		
	- Gaz de sortie du préchauffeur	150	175	23,30
4	Pertes dans le refroidisseur :			
	- Chaleur emportée par l'air à la sortie du refroidisseur	78		
	- Chaleur du clinker à la sortie	34		
	- Radiation	3	115	15,30
			750	100

Tableau I.2 - Bilan thermique d'une installation de cuisson

#### I.4. Influence des gains calorifiques sur la consommation calorifique : Apport du préchauffeur et du refroidisseur.

Afin de bien montrer l'influence du préchauffeur à suspension et du refroidisseur sur une installation de cuisson, nous serons amenés à énumérer les pertes de chaleur provoquées dans une cuisson avec un long four rotatif sans dispositifs annexes (échangeurs de chaleur, récupérateurs, etc...). Ensuite, nous allons spécifier la nécessité d'apport du préchauffeur et du refroidisseur dans le but d'obtenir un gain pour la consommation calorifique.

##### 1.4.1. Pertes engendrées par une installation de cuisson avec un long four rotatif.

Un four rotatif de 140 à 160 m de longueur est la cause de nombreuses pertes parmi lesquelles, on citera :

- les pertes par les gaz de sortie dont la température est élevée de 700 à 750°C ;
- les pertes dues aux poussières entraînés par les gaz, on peut atteindre un taux de 0,2 kg/kg clinker ;
- la durée de séjour de la matière dans le four est grande de l'ordre de 106 minutes, ce qui diminue considérablement la production horaire de clinker ;
- les dimensions excessives du four font que les moteurs d'entraînement développent une puissance élevée de 530 kw ;
- les pertes par paroi sont proportionnelles à la longueur sont de 104 kcal/kg clinker ;
- la chaleur sensible du clinker évaluée à 22 kcal/kg clinker est perdue à la sortie du four.

Actuellement, on ajoute comme dispositifs annexes au four un échangeur de chaleur interne et un refroidisseur dans le but d'augmenter le rendement thermique. Toutefois, l'installation préchauffeur - four - refroidisseur est plus performante en ce qui concerne la qualité du ciment obtenu, le rendement calorifique et la production du clinker.



#### 1.4.2. Apport du préchauffeur à suspension.

Les avantages du préchauffeur sont :

- le préchauffeur permet d'obtenir de faible température pour le gaz de sortie environ 330°C ;
- l'efficacité de séparation du cyclone supérieure limite la quantité de poussière émise à la sortie; les gaz sont filtrés pour récupérer environ 0,04 kg de poussières par kg de clinker ;
- la matière ne séjourne pas plus de 50 mn dans le four, ainsi la production de clinker est améliorée ;
- la puissance d'entraînement du four est de 447 kw pour des longueurs allant de 60 à 90 m ;
- une calcination partielle de la farine s'effectue dans le cyclone inférieur de la tour, ce qui incite à réduire la longueur du four ;
- les dimensions du bruleur sont réduites.

#### 1.4.3. Apport du refroidisseur.

La figure I.2 montre le diagramme d'un bilan thermique à un refroidisseur F.L. Smidth à grille.

Un courant d'air frais refroidi le clinker en provenance du four, il est ensuite acheminé vers le four pour servir d'excès d'air dans la combustion, sa température est de 900°C. Le refroidisseur présente l'avantage de récupérer la chaleur sensible du clinker qui sort du four à une température de 1200°C. De plus, un clinker chaud a des effets néfastes pour la procédure de broyage, donc le refroidisseur contribue à améliorer la qualité du ciment.



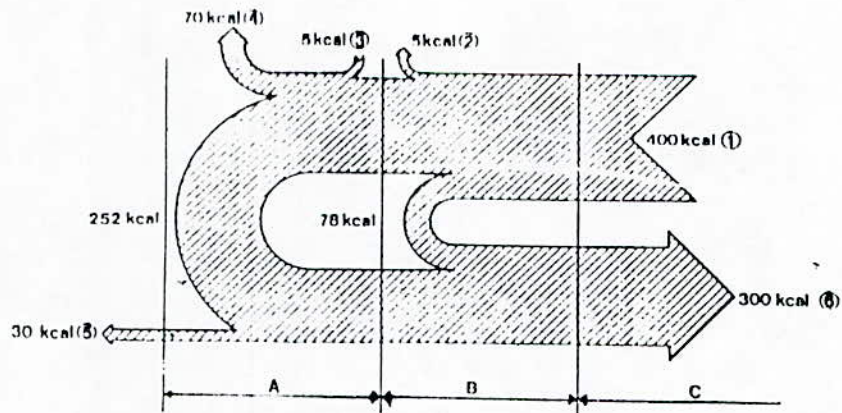


Fig. 1.2. - Diagramme d'un bilan de chaleur d'un refroidisseur à grille.

Légende :

- A refroidisseur
- B zone située entre la flamme et le refroidisseur
- C zone de clinkérisation dans le four
- 1 chaleur du clinker dans la zone de clinkérisation
- 2 perte par radiation dans la zone B
- 3 chaleur sensible de l'air pénétrant dans le refroidisseur
- 4 perte par radiation dans le refroidisseur
- 5 chaleur résiduelle du clinker
- 6 chaleur totale récupérée

L'efficacité d'un refroidisseur est définie comme étant le rapport de la chaleur totale récupérée et la chaleur sensible du clinker dans la zone de clinkérisation, dans le cas particulier du diagramme de la figure I.2, on obtient une efficacité de 0,75.

#### 1.4.4. Analyse comparative des différents systèmes de cuisson par voie sèche.

Une installation de cuisson démunie d'échangeur de chaleur (chaînes, tour à cyclones, etc...) et de récupérateur (refroidisseur) engendre une consommation de chaleur allant de 1580 kcal/kg clinker à 1730 kcal/kg clinker. De nos jours, ce procédé n'existe plus dans les cimenteries vu le faible rendement calorifique 0,26-0,23.

Une première possibilité pour améliorer le rendement consiste à attacher un système de chaînes à l'intérieur du four sur une longueur de 30 m, son rôle est d'accélérer le processus d'échange de chaleur entre les fumées et la farine. En plus du refroidisseur, la consommation énergétique atteint 980 kcal/kg clinker et peut aller jusqu'à 1130 kcal/kg clinker.

On obtient un rendement de : 0,42 à 0,37.

La deuxième solution est l'apport du préchauffeur à suspension à la place du système de chaînes. Elle est la meilleure car la consommation ne dépasse guère 850 kcal/kg clinker, en général, on arrive à 750 kcal/kg clinker. Le rendement calorifique passe de 0,49 à 0,55. On voit bien en comparant les trois procédés de cuisson ci-dessus, la nécessité de choisir l'installation préchauffeur-four-refroidisseur pour la cuisson.

#### I.5. Description du préchauffeur - Echange de chaleur - Efficacité de séparation et possibilité d'action sur le rendement calorifique.

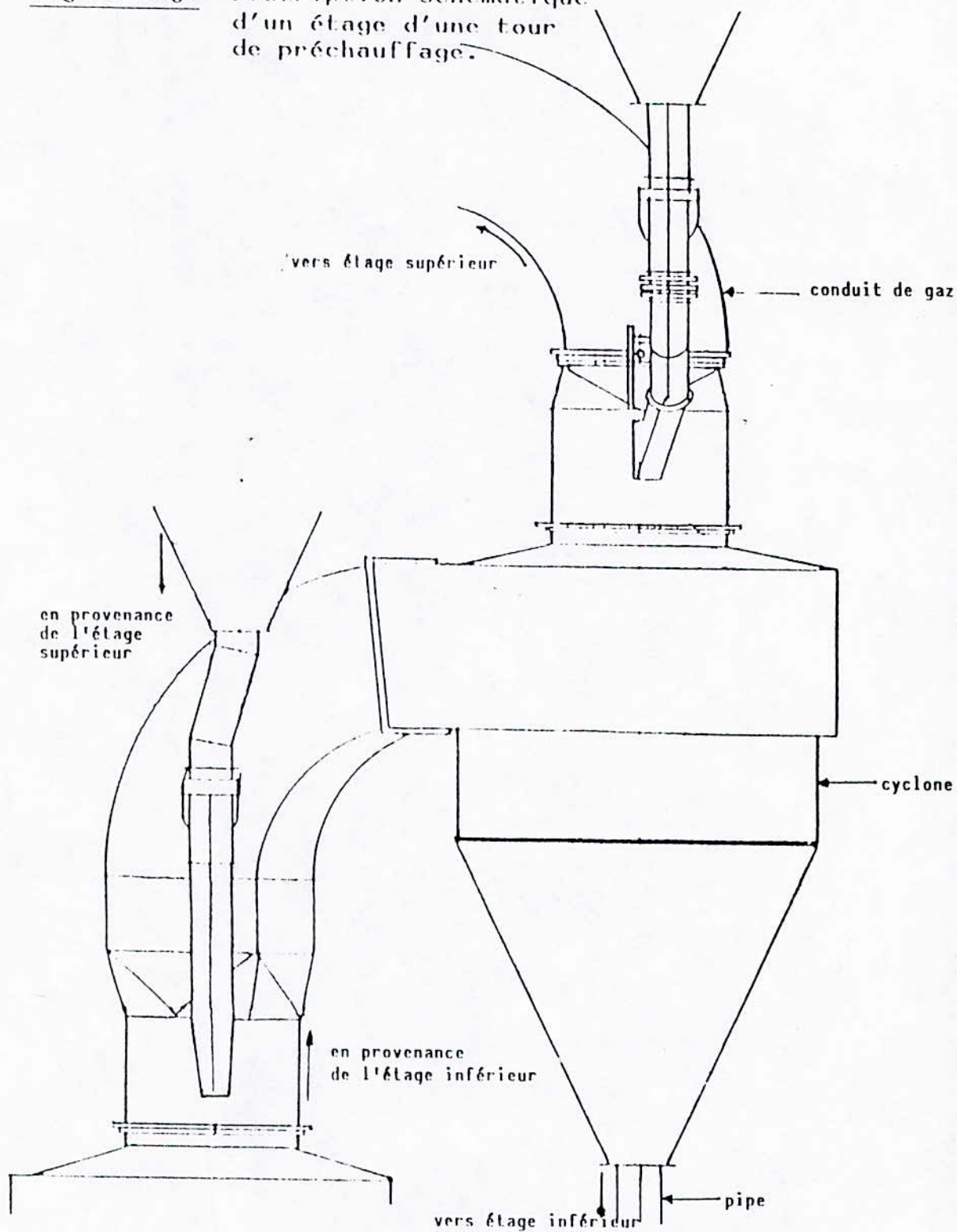
##### I.5.1. Description du préchauffeur à suspension.

Le préchauffeur consiste en quatre cyclones (ou cinq) arrangés en cascade l'un au-dessus de l'autre. Pour une plus grande efficacité de séparation, l'étage supérieur de la tour comprend deux cyclones de tailles réduites au lieu d'un cyclone normal. Les cyclones sont interconnectés par un conduit de gaz, l'ensemble cyclone-conduit forme un étage du préchauffeur, les étages sont numérotés de I à IV de haut en bas.

Dans la partie inférieure du cyclone, un cône s'ouvre sur une pipe qui, elle-même, pénètre à l'intérieur du conduit de gaz que forme l'étage inférieur. Cette pipe permet de desservir la farine dans le conduit. La figure 1.3 illustre l'étage d'un préchauffeur à suspension.



Figure 1.3.- Description schématique d'un étage d'une tour de préchauffage.



Une couche de brique réfractaire recouvre la face interne des conduits, des cyclones et pipes. Son rôle est de protéger le préchauffeur des hautes températures.



Le cyclone est constitué par un cylindre muni d'un cône à sa partie inférieure. On y constate une dépression de 55 à 60 mbar qui dépend de la forme géométrique et de la vitesse des gaz. Le volume des gaz de sortie d'un cyclone est évalué à 1,4 m<sup>3</sup>/kg clinker. Les poussières entraînées représentent 10% de la masse de clinker.

Pour des installations dont la production dépasse 2000t/24h et afin d'éviter un éventuel bourrage (obstruction) de cyclone qui cause l'arrêt total de la cimenterie, on associe à la première tour une deuxième tour de préchauffage qui fonctionne en parallèle avec la première.

#### I.5.2. Transfert de chaleur dans un cyclone.

Des études thermo-techniques sur un préchauffeur à quatre cyclones ont prouvé que 80% du transfert de chaleur prend place dans les conduits de gaz, alors que seulement 20% du transfert total de chaleur s'effectue dans les cyclones.

Le montage en série de plusieurs étages de cyclones permet une utilisation efficace de la chaleur des gaz car le contact direct de la matière finement dispersée avec les gaz chauds provoque un échange de chaleur rapide et intensif.

La durée de séjour d'une particule dans une tour de préchauffeur est approximativement de 20 secondes. Durant cette période, la farine est préchauffée de 50°C à 800°C alors que les gaz voient leur température chuter de 1100°C à 330°C. Le volume des gaz ainsi que leur vitesse liés à une production bien déterminée sont des facteurs essentiels dans le dimensionnement du préchauffeur, la règle générale est la suivante :

$$\frac{Q^2}{S^5} = \text{constante} \quad (1.1)$$

Q est le volume de gaz

S est le diamètre du cyclone et du conduit

Le diagramme de la figure I.4 représente la température farine-gaz d'une tour de préchauffeur, la température relativement élevée de la matière pénétrant dans le four implique une réduction considérable des dimensions du four et un rapport longueur sur diamètre de 14/1 - 16/1.

L'échange de chaleur prédominant est l'échange par convection entre matière et gaz. Cependant, on notera qu'il existe une chaleur transmise de la surface vers l'intérieur de la particule, une transmission de chaleur par rayonnement entre gaz et matière et une transmission de chaleur par rayonnement entre matière et paroi.

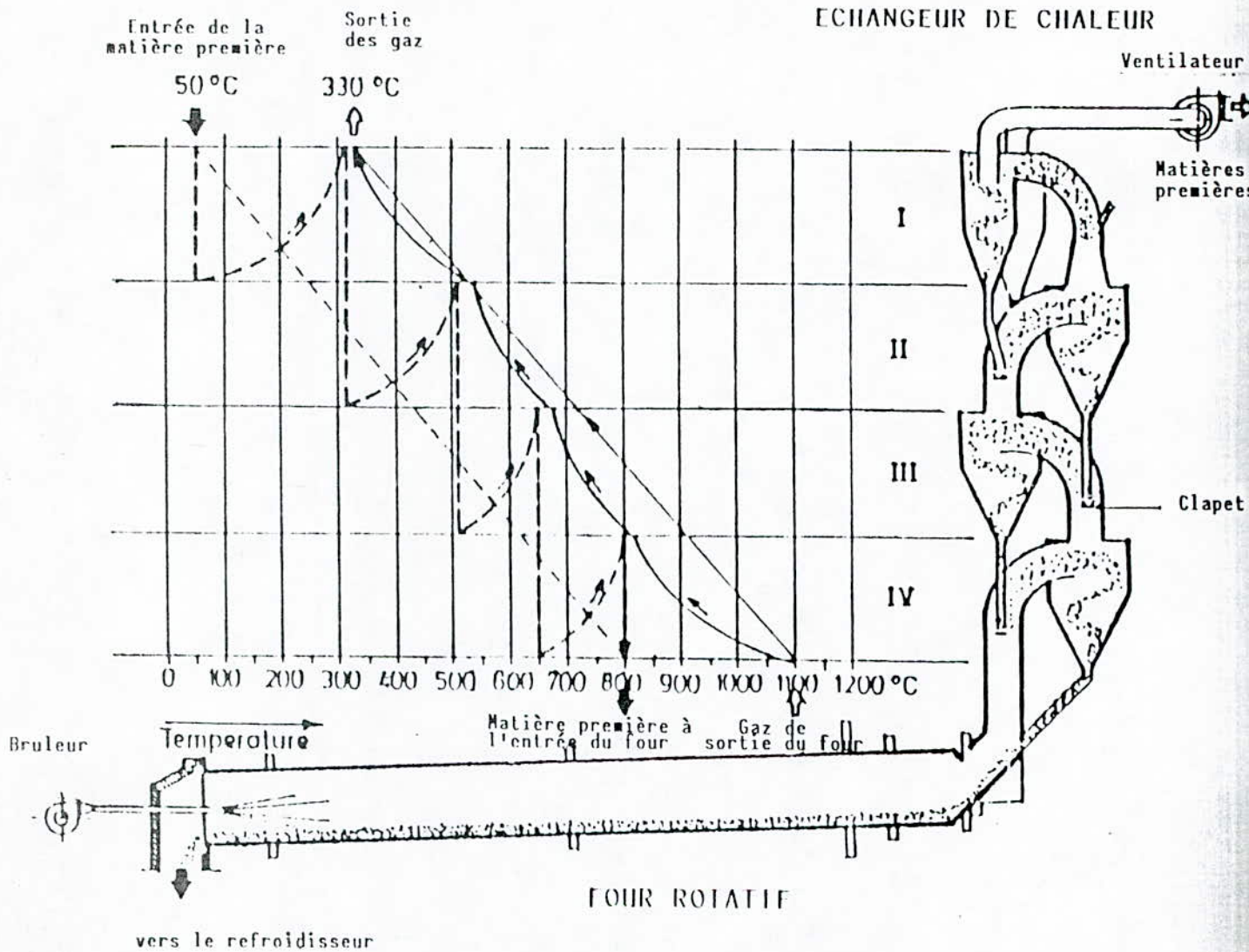


Fig. 1.4. - Température farine-gaz d'une tour de préchauffage.

Dans le conduit, le déplacement des particules a lieu en équicourant avec l'écoulement du flux gazeux. Tandis que dans le cyclone, un mouvement en spirale à direction commune du gaz et de la matière en suspension prend naissance, et ceci lorsque le flux de gaz est amené tangentiellement à la chambre cylindrique disposée horizontalement. En d'autres termes, les deux flux gaz et matière ont un mouvement de translation et de rotation, ce qui donne lieu à une trajectoire en spirale.



Une caractéristique physico-chimique de la tour est qu'une calcination partielle de 10% a lieu dans le cyclone IV, le processus de décarbonatation se poursuit dans le four avant que la clinkérisation ne débute dans la zone de rayonnement de la flamme.

### 1.5.3. Efficacité de séparation d'un cyclone.

L'efficacité de séparation dépend essentiellement de la configuration géométrique du cyclone. C'est le rapport entre la quantité de poussières emportées par les gaz et la quantité de farine desservie à l'étage inférieur. La teneur en poussières du gaz varie en fonction de la vitesse des gaz et vaut de 40 à 70 g/Nm<sup>3</sup>.

#### Remarque

A l'extrémité de chaque pipe comme le montre la figure I.4, un dispositif dit clapet empêche le passage du gaz à l'étage inférieur.

### 1.5.4. Possibilité d'action sur le rendement calorifique.

Le rendement calorifique d'une installation de cuisson avec préchauffeur et refroidisseur est donné par le rapport de la chaleur de formation du clinker à la chaleur totale consommée par le système :

$$\eta = \frac{QT}{Q} \quad (1.2)$$

$$\text{avec } Q = QG + QT + QL + QD \quad (1.3)$$

où QT : enthalpie de formation du clinker

QG : chaleur des gaz à la sortie de la tour

QL : somme des pertes par convection et radiation dans le four et le préchauffeur

QD : pertes dues au refroidisseur

Pour améliorer le rendement, on agit sur la chaleur perdue dans les gaz de sortie. On y distingue quatre types de pertes : les pertes par gaz de combustion, par gaz carbonique CO<sub>2</sub>, par les poussières entraînées par le gaz et l'infiltration de l'air dans les cyclones. On essaye en conséquence de diminuer la teneur des poussières dans le gaz en augmentant l'efficacité de séparation des cyclones, surtout pour le cyclone I.

Lors de la conception, on a intérêt à limiter les ouvertures afin d'éviter l'infiltration d'air faux. On peut aussi ajouter un cinquième cyclone pour améliorer le rendement.



Exemple : calculons le rendement calorifique pour l'installation dont le bilan thermique est donné par le tableau I.2. On a :

$$Q_T = 415 \text{ kcal/kg clinker ; } Q = 750 \text{ kcal/kg clinker ;}$$

$$\eta = \frac{Q_T}{Q} = 0,55 = 55\%$$

#### I.6. Rôles du préchauffeur à suspension

Principalement, deux rôles lui sont attribués :

- augmenter le rendement calorifique ;
- augmenter le degré de décarbonisation.

C H A P I T R E I I

---

MODELISATION - IDENTIFICATION  
du PRECHAUFFEUR à SUSPENSION

---



## II. MODELISATION - IDENTIFICATION du PRECHAUFFEUR à SUSPENSION.

### II.1. Généralités

Les processus modernes de technologie chimique qui évoluent à des vitesses élevées et sous de hautes températures et de fortes pressions dans des systèmes à plusieurs phases, sont caractérisés par une grande complexité.

Celle-ci se traduit par le nombre considérable et la diversité des paramètres qui déterminent le cours du processus, par le grand nombre de liaisons internes entre ces paramètres et par leur influence réciproque, sans oublier le fait qu'une variation d'un paramètre suscite chez les autres une variation non linéaire.

La connaissance du processus se fait au moyen de modèles, c'est-à-dire de systèmes simplifiés qui reflètent certains aspects, limités au but recherché, des phénomènes produits par le processus considéré. Ce modèle est ensuite comparé au phénomène et est considéré comme satisfaisant s'il n'en diverge pas de beaucoup ; à la seconde étape, on confronte ce à quoi l'on s'attend avec ce qu'indique le modèle. Ce processus est appelé simulation. Ainsi, le modèle est corrigé par une identification paramétrique dans le but de se rapprocher le plus possible du processus réel.

Avant d'aborder une application directe sur le préchauffeur, on donnera un aperçu théorique sur la simulation qui comporte deux étapes essentielles qui sont la modélisation et l'identification.

### II.2. Notions générales sur la simulation d'un processus.

On distingue deux types de simulation : la simulation physique et la simulation mathématique.

#### II.2.1. Simulation physique

Dans la simulation physique, l'étude d'un phénomène donné s'opère en le reproduisant à des échelles différentes et en analysant l'influence de ses particularités physiques et de ses dimensions linéaires. L'expérience est directement conduite sur le processus physique étudié.

L'emploi de cette méthode devient rapidement une source de difficultés lorsqu'on s'emploie à faire une similitude physique par des processus compliqués.



### **II.2.2. Simulation mathématique**

La simulation mathématique est une méthode de description des processus, sous les aspects quantitatif et qualitatif, à l'aide de ce que l'on appelle des modèles mathématiques. D'un choix heureux du modèle, de la plus ou moins grande exactitude avec laquelle il traduit les traits caractéristiques du processus considéré, dépendent le succès de l'investigation menée et la valeur des conclusions obtenues.

Le modèle doit offrir une description qualitative et quantitative suffisamment fidèle des propriétés du processus à simuler, c'est-à-dire être adéquat à ce processus.

Pour tester l'adéquation du modèle mathématique au processus réel, il faut comparer les résultats d'une mesure prise au cours du processus avec les résultats de la prévision faite par le modèle dans des conditions identiques, on est ainsi amené à faire une identification des paramètres du processus de telle sorte à rapprocher le modèle théorique du processus réel.

### **II.3. Etapes fondamentales de la simulation mathématique du processus.**

#### **II.3.1. Choix et construction du modèle du processus.**

Dans chaque cas concret, le modèle mathématique est créé en s'orientant d'après le but auquel sont destinés le processus et les problèmes d'étude qui lui sont liés et en tenant compte de la précision exigée pour la solution et l'authenticité des données expérimentales utilisées. L'analyse des résultats obtenus rend possible une révision du modèle : on peut y apporter des correctifs après avoir déjà accompli une partie des calculs.

La construction du modèle est la partie la plus délicate et la plus importante de la simulation mathématique. Elle exige, autant et plus qu'une connaissance des mathématiques, une compréhension approfondie de la nature des phénomènes à décrire.

La nature physique du système à simuler est à la base de sa description mathématique, au sein de laquelle on peut distinguer les groupes d'équations suivants :



1. Les équations de bilan des masses et de l'énergie, écrites en tenant compte de la structure hydrodynamique du mouvement des courants. Ce groupe d'équations caractérise la répartition dans les courants de la température des composés et des propriétés qui leur sont liées, comme par exemple la densité, la viscosité, la capacité calorifique, etc...
2. Les équations des processus «élémentaires» pour les éléments locaux de courant. Font partie de ce groupe, les descriptions des processus d'échange de masse et de chaleur, des réactions chimiques, etc...
3. Les relations théoriques, semi-empiriques ou empiriques entre différents paramètres du processus : coefficient de transfert de masse en fonction des vitesses des courants des phases, capacité calorifique de la solution en fonction de la composition, etc...
4. Les contraintes sur les paramètres du processus. Lors de la simulation de certains processus, il faut prendre en considération les contraintes qui existent objectivement sur la gamme de variation d'une série de paramètres.

Il existe deux types de modèle, un modèle statique qui est un ensemble d'équations finies et le modèle dynamique qui est un ensemble d'équations différentielles. Dans ce cas, le système prend en compte le facteur temps.

### II.3.2. Algorithme de simulation.

La résolution du système d'équations d'une description mathématique constitue le plus souvent un problème d'élaboration d'un algorithme de simulation.

Dans les cas les plus simples, où il est possible de résoudre analytiquement le système d'équations de la description mathématique, il n'est évidemment pas besoin de mettre au point spécialement un algorithme de simulation, puisque toute l'information s'obtient à partir des solutions analytiques correspondantes.

Quand la description mathématique se présente comme un système complexe d'équations finies et différentielles, le domaine d'application pratique du modèle mathématique peut dépendre, d'une façon essentielle, de la capacité de construire un algorithme de simulation qui soit suffisamment efficace, et ceci est particulièrement important lorsque ce modèle est utilisé pour résoudre des problèmes où il entre comme partie intégrante d'un algorithme plus général, d'optimisation par exemple. Dans de tels cas, la résolution du modèle mathématique nécessite généralement de recourir aux moyens de la technique des calculs, autrement dit aux calculateurs numériques, sans lesquels il est pratiquement impossible de poser et de résoudre des problèmes de simulation, tant soit peu complexes et, à plus forte raison, des problèmes d'optimisation, où les calculs sur les équations de la description mathématique se répètent généralement de multiples fois.

Les méthodes d'analyse numérique existant à l'heure actuelle permettent de résoudre une large classe des problèmes de simulation mathématique. Néanmoins, on rencontre dans certains cas de sérieuses difficultés dans l'application des méthodes générales de l'analyse numérique. De tels cas se présentent avant tout dans les problèmes suivants de simulation mathématique :

1. Résolution des systèmes d'équations linéaires finies à grand nombre de variables ;
2. Intégration des systèmes d'équations différentielles ordinaires avec conditions aux limites ;
3. Intégration des systèmes d'équations aux dérivées partielles.

Il n'existe pas actuellement pour ces problèmes de méthodes générales de résolution efficaces ; aussi, faut-il, dans chaque cas concret, utiliser les particularités du problème à résoudre pour construire l'algorithme de simulation.



Dans certains cas, la réalisation de l'algorithme de simulation s'avère si compliquée, avec les moyens de calcul dont on dispose, qu'on se retrouve réduit à modifier la formulation du problème à résoudre pour construire l'algorithme de simulation, c'est pourquoi on simplifie la simulation initiale. Souvent, cette simplification n'est atteinte qu'au prix d'un amoindrissement de la précision du modèle mathématique, ce qu'on obtient en remplaçant certaines expressions analytiques par d'autres plus simples et sans doute moins exactes, ou bien en rendant la description mathématique moins complète par exclusion du modèle d'une partie des paramètres du système à simuler.

### II.3.3. Vérification de l'adéquation du modèle choisi au système réel et correction du modèle - Identification paramétrique.

Pour tester l'adéquation du modèle, on commence par constater que la structure hydrodynamique choisie est bien conforme aux courants du système étudié. Si la courbe expérimentale coïncide avec la représentation théorique du modèle, ceci confirme qu'il est possible d'employer le modèle adopté.

Pour pouvoir corriger un modèle mathématique d'après les résultats des mesures faites sur le processus lui-même ou sur un modèle physique, il faut avant tout fournir une évaluation quantitative de l'adéquation du modèle. Supposons dans le cas général qu'il y ait dans le modèle mathématique  $n$  paramètres dont les valeurs ne puissent être données a priori, et soit  $m$  le nombre de variables qui, parmi les variables caractérisant l'état du système, sont accessibles à des mesures lorsqu'on examine le processus réel.

L'identification est l'étape où il s'agit de déterminer la valeur numérique de ces paramètres du modèle qui se comportera au mieux comme le processus objet. Pour évaluer cette identité du comportement, on introduit un critère de distance entre l'objet et le modèle :  $D(O, M)$ . On prend généralement comme distance une fonctionnelle de l'écart objet-modèle :

$$D(O, M) = \sum_{i=1}^m f[S_M^i - S_0^i] = \sum_{i=1}^m f(x) \quad (2.1)$$



$s_0$  = sortie objet

$s_M$  = sortie modèle

$m$  = nombre de variables mesurables expérimentalement.

On prendra en pratique  $f=x^2$  ou  $f=|x|$

La distance  $D$  est une fonction des paramètres structuraux  $p_i^M$  du modèle.

Puisque le modèle n'est jamais parfait, le problème revient à minimiser la distance  $D(p_i^M)$  des variables  $p_i^M$ . Plusieurs techniques de minimisation sont utilisables. On peut minimiser la fonction  $D$  par l'une des méthodes de détermination de l'extremum d'une fonction de plusieurs variables. La valeur minimale trouvée pour  $D$  sert à estimer quantitativement le niveau de correction de la structure adoptée pour les équations du modèle mathématique.

Il est bien entendu que pour un autre ensemble de conditions extérieures, la valeur de  $D$ , avec le même choix de paramètres du modèle, peut différer de la valeur minimale précédemment trouvée. D'une façon générale, la valeur minimale de  $D$  relative à un autre ensemble de conditions extérieures est associée à un autre choix des paramètres 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 ensembles de conditions extérieures, le modèle peut être utilisé pour interpoler dans ce domaine les propriétés du système à simuler.

Le principe général est celui qu'exprime le schéma de la figure 2.1 où l'on va soumettre le modèle de structure choisie par la caractérisation de paramètres à tester  $p_i^M$ , à des entrées identiques à celle que l'on a appliquées à l'objet physique. On élabore un critère de qualité qu'une procédure va tendre à améliorer en agissant sur la structure du modèle.

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

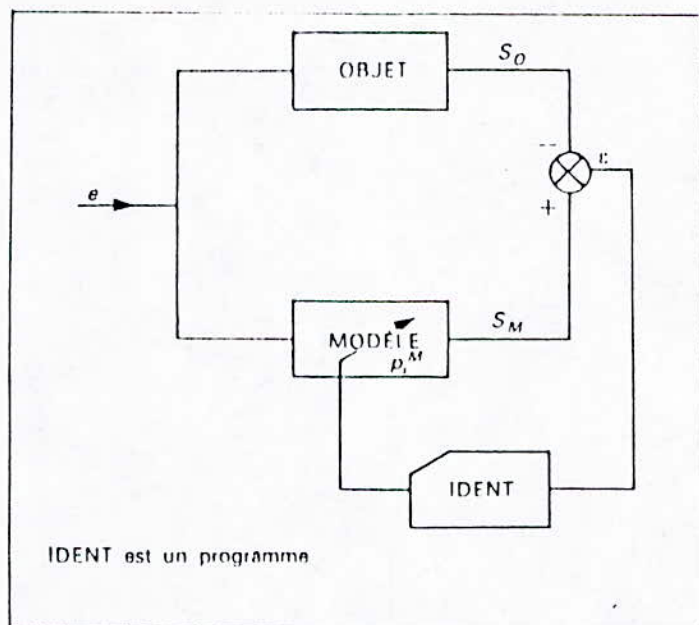


Fig.2.1.- Identification.

#### II.4. Application au préchauffeur.

##### II.4.1. Modélisation d'une tour de préchauffage.

Le modèle est basé sur le comportement thermique du préchauffeur à cyclones. A cet effet, a été développé un modèle mathématique qui part de la capacité thermique spécifique comme fonction de la température et décrit le comportement thermique. A l'aide de ce modèle, a été déterminée l'influence de la teneur en poussières des gaz de l'entrée du four rotatif et du degré de séparation des cyclones sur le besoin énergie de combustible spécifique.

##### II.4.1.1. Principe de l'analyse.

L'équation (2.2) donne l'enthalpie de la matière ou du gaz, où  $C_p$  est la capacité thermique spécifique du gaz ou de la matière :

$$di = MC_p dt \quad (2.2)$$

En général, la capacité thermique spécifique peut être déterminée avec une assez bonne précision au moyen de la formule (2.3) :

$$C_p = a + bt \quad (2.3)$$



La valeur de  $C_p$  ainsi substituée dans l'équation (2.2) donne l'enthalpie comme fonction de la température :

$$i = M (\Delta t + Bt^2) \quad (2.4)$$

Le tableau (2.1) donne les valeurs des coefficients d'enthalpie A et B relatifs au processus de fabrication du ciment. Les unités de A et B sont pour la phase solide respectivement  $\text{kJ/kg.K}$  et  $\text{kJ/kg.K}^2$ , pour la phase gazeuse  $\text{kJ/Nm}^3.\text{K}^2$  et  $\text{kJ/Nm}^3.\text{K}$ .

**Tableau (2.1) : Coefficients d'enthalpie.**

	A	B
Matière première .....	0,9718	16,6846. $10^{-5}$
Poussières .....	0,9718	16,6846. $10^{-5}$
Dioxyde de carbone ...	1,7755	43,4892. $10^{-5}$
Air .....	1,2779	13,7156. $10^{-5}$
Gaz de combustion ....	1,3615	18,9008. $10^{-5}$

Les gaz à la sortie du four consistent en gaz de combustion et une certaine proportion d'air, les coefficients  $A_b$  et  $B_b$  de ce gaz sont déterminés en accord avec la formule empirique de combustion.

$$A_b = (\text{deb}/\text{WC}) \cdot p \cdot (0,3936 + 0,3358 \cdot \alpha) \cdot 10^{-3} \cdot Q \quad (2.5)$$

$$B_b = (\text{deb}/\text{WC}) \cdot p \cdot (5,464 + 3,604 \cdot \alpha) \cdot 10^{-8} \cdot Q \quad (2.6)$$

**deb** : débit de fumée ou gaz tiré par le ventilateur ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

**WC** : Production horaire de clinker ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$\alpha$  : Excès d'air dans la combustion

**Q** : Energie spécifique du combustible ( $\text{kJ}/\text{kg}$  clinker)

**p** : paramètre caractérisant la production d'un  $\text{kg}$  de clinker/ $1 \text{ m}^3$  de fumées ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Pour simplifier les calculs, toutes les grandeurs seront données spécifiquement pour  $1 \text{ kg}$  de clinker.

#### II.4.1.2. Modèle mathématique.

La figure 2.2 illustre la balance de masse pour chaque étage du préchauffeur. On obtient les équations (2.7) et (2.8) :

$$S_n = M_n \left( \frac{1}{\eta_n} \right) \quad 1 \leq n \leq k \quad (2.7)$$

$$M_n = M + S_{n+1} \quad 1 \leq n < k-1 \quad (2.8)$$

$M$  : Quantité de farine nécessaire pour produire 1 kg de clinker, on prendra  $M=1,6$  kg/kg cl.

$M_n$  : Flux de matière desservi dans le cyclone  $n$  (kg/kg cl.)

$S_n$  : Flux de poussières desservi dans le cyclone  $n$  (kg/kg cl.)

$\eta_n$  : Degré de séparation du cyclone  $n$

$k$  : Désigne le cyclone inférieur de la tour, dans notre cas  $k=4$

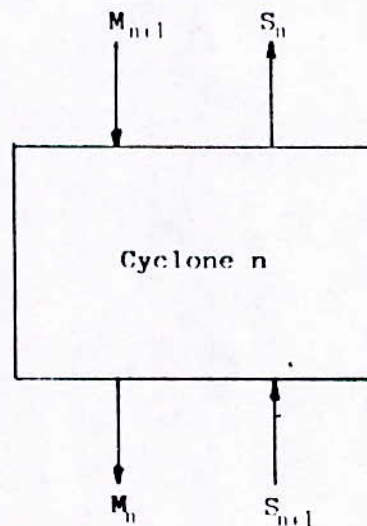


Fig. 2.2.- Balance massique d'un cyclone.



Pour le  $k^{\text{ième}}$  cyclone, on a les relations suivantes :

$$M_k = M \frac{1 - I_m}{1 - I_k} S_{k,1} \quad (2.9)$$

$$I_k = \frac{I_m (1 - \phi_k)}{1 - \phi_k I_m} \quad (2.10)$$

$S_{k,1}$  : Flux de poussières entraîné par les gaz à la sortie du four rotatif (kg/kg cl.)

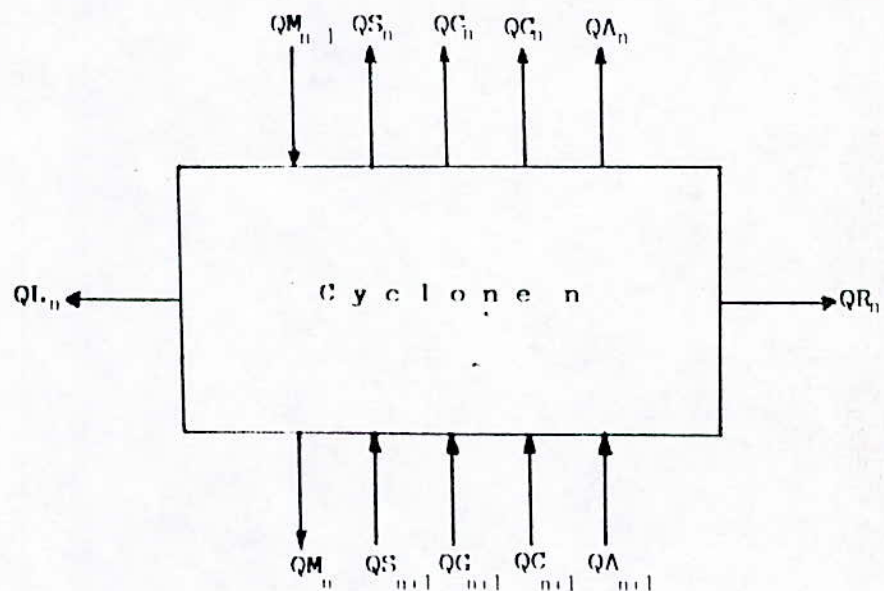
$I_m$  : Perte de masse de la matière due aux réactions chimiques qui ont lieu dans les cyclones

$I_k$  : Perte de masse dans le cyclone inférieur

$\phi_k$  : Degré de calcination de la matière dans l'étage inférieur de la tour

Nous supposons que la réaction de calcination a lieu seulement dans le cyclone inférieur.

La balance énergétique peut être déterminée comme suit (voir figure 2.3) :



1. Enthalpie de la matière première QM :

$$QM_n = M_n (A_m T'_n + B_m T_n'^2) \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.11)$$

2. Enthalpie des poussières QS :

$$QS_n = S_n (A_s T_n + B_s T_n^2) \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.12)$$

3. Enthalpie des gaz de combustion :

$$QG_n = A_b T_n + B_b T_n^2 \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.13)$$

4. Enthalpie du gaz carbonique dû à la calcination : QC

$$QC_n = G_n^c \cdot (A_c \cdot T_n + B_c \cdot T_n^2) \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.14)$$

$$\text{avec } G_n^c = \frac{I_m}{(I - J_m) \cdot 1,965} \quad \text{Nm}^3/\text{kg cl.} \quad (2.15)$$

L'enthalpie de CO<sub>2</sub> formée par calcination dans le four est donnée par :

$$QC_{k,l} = G_{k,l}^c (A_c \cdot T_{k,l} + B_c \cdot T_{k,l}^2) \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.16)$$

$$\text{avec } G_{k,l}^c = \frac{I_k}{(1 - I_k) \cdot 1,965} \quad \text{Nm}^3/\text{kg cl.} \quad (2.17)$$

5. Enthalpie de l'air infiltré dans les cyclones : QA

$$QA_n = G_n^A (A_a \cdot T_n + B_a \cdot T_n^2) \quad \text{kJ/kg cl.} \quad (2.18)$$

6. Pertes par radiation et convection :

$$QL_1 = 50; \quad QL_2 = 42; \quad QL_3 = QL_4 = 25$$

7. L'enthalpie de la réaction de calcination QR<sub>k</sub> peut être calculée à partir des formules empiriques suivantes :

$$QR_k = (422 - 0,208 \cdot T_k) \cdot 4,1868 \cdot \phi_k \quad \text{KJ/kg cl.} \quad (2.19)$$

$$\phi_k = 0,89 \cdot (T'_k \cdot 10^3)^q \quad (2.20)$$

dans la formule (2.20), T'<sub>k</sub> est exprimée en °C



L'équation (2.21) donne la balance énergétique pour chaque étage du préchauffeur :

$$QM_{n-1} + QS_{n+1} + QG_{n+1} + QC_{n+1} + QA_{n+1} = QM_n + QS_n + QG_n + QC_n + QA_n + QL_n + QR_n \quad (2.21)$$

La consommation d'énergie spécifique du processus de cuisson du clinker, c'est-à-dire de l'installation Préchauffeur - Four - Refroidisseur est donnée par :

$$Q = QG_1 + QS_1 + QC_1 + QA_1 + QL_s + QT + T_R \cdot 0,25(1 - \eta_c) \text{ kJ/kg cl.} \quad (2.22)$$

$$\text{avec } T_R = T_c - 250$$

$QL_s$  : somme des pertes par radiation et convection dans le four et le préchauffeur (kJ/kg cl.)

$QT$  : enthalpie de formation du clinker (kJ/kg cl.)

$T_R$  : température du clinker du refroidisseur (°k)

$T_c$  : température du clinker dans la zone de cuisson (°k)

$\eta_c$  : efficacité du refroidisseur

#### a) Mouvement des gaz et des matériaux

Dans le conduit, l'écoulement du flux gazeux et le déplacement de la matière sous forme de poussière a lieu en équilibre ; les deux constituants se déplacent verticalement dans la même direction, le mouvement est ascendant. Si on désigne par H la hauteur du conduit, la durée de séjour de la particule dans le flux ascendant peut être déterminée par la relation :

$$\tau = \frac{H}{V_{\text{moy}} - \frac{d^2 \cdot \mu_M \cdot g}{18 \cdot \nu_G \cdot \rho_G}} \quad (2.23)$$

$V_{\text{moy}}$  : vitesse moyenne du gaz suivant la hauteur (m/s)

d : diamètre de la particule (m)

$\nu_G$  : viscosité cinématique du gaz (m<sup>2</sup>/s)

$\mu_M$  : masse volumique de la particule (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_G$  : masse volumique du gaz à une température T  
(kg/m<sup>3</sup>)

g : accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

La vitesse est liée au débit par la formule suivante :

$$V_{\text{moy}} = \frac{\text{deb}}{3600 \cdot S_c} \quad (2.24)$$

$S_c$  : section du conduit (m<sup>2</sup>)

deb : débit de gaz (m<sup>3</sup>/h)

En ce qui concerne le cyclone, le mouvement des gaz et de la particule a lieu en spirale à direction commune, la durée de passage de la particule de l'axe à la périphérie du cyclone est donnée par :

$$\tau' = \frac{9}{4} \left( \frac{D}{d} \right)^2 \frac{\mu_G \cdot V_G}{\mu_M \cdot V_{\text{moy}}^2} \quad (2.25)$$

D : diamètre de la chambre où se trouve le flux en rotation (m)

La durée totale de séjour de la particule dans un étage du préchauffeur composé du conduit et du cyclone est :

$$t_s = \tau + \tau' \quad (2.26)$$

#### b) Relation température farine - température gaz

-----

L'équation liant la température farine à la température gaz est trouvée à partir de l'étude des échanges de chaleur par convection et rayonnement d'une couche en suspension dans un fluide gazeux, on obtient :

$$T_f' = T_{in} - \exp \left[ \frac{6 \cdot Nu \cdot \sigma_{\text{moy}} \cdot t_s}{\mu_M \cdot d^2 \cdot 3600 \cdot C_M} \right] (T_f - T_{in}') \quad (2.27)$$

$T_f'$  : température de la charge à la sortie du cyclone (°K)

$T_{in}$  : température du gaz à l'entrée du conduit (°K)

$T_f$  : température du gaz à la sortie du cyclone (°K)

$T_{in}'$  : température de la charge à son entrée dans le conduit (°K)



Nu : nombre de Nusselt

$\sigma_{\text{moy}}$  : conductivité du gaz à température moyenne de la particule (kcal/m.h. °K)

$C_M$  : chaleur pondérale de la particule (kcal/kg °K)

Le tableau (2.2) donne les valeurs de  $\sigma_{\text{moy}}$ ,  $\mu_G$  et  $v_G$  pour chaque cyclone et dans le four.

	$v_G$ (m <sup>2</sup> /s)	$\mu_G$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{\text{moy}}$ (kcal/m.h. °K)
Cyclone 1 .....	0,0000550	0.50	0,0392
Cyclone 2 .....	0,0000865	0.38	0,0494
Cyclone 3 .....	0,0001132	0.33	0,0570
Cyclone 4 .....	0,0001515	0.27	0,0658
Sortie du four.	0,0002130	-	-

Tableau 2.2. : Valeurs caractéristiques du gaz dans les différents compartiments du Préchauffeur.

#### II.4.1.3. Etude simplifiée du four rotatif

##### a) Mouvement dynamique du four

-----

Le mouvement de la charge dans les fours tournants et les phénomènes thermiques qui s'y produisent sont si étroitement liés qu'il est nécessaire d'étudier d'abord ce mouvement. La production de clinker est essentiellement déterminée par les caractéristiques mécaniques du four, à savoir son diamètre, l'inclinaison et son degré de remplissage et la vitesse de rotation. La conception thermique du four doit correspondre à ce débit, c'est-à-dire que la puissance de chauffage doit s'accorder avec la vitesse de passage, qui, elle dépend des caractéristiques mécaniques.

La production par unité de temps du four est :

$$WC = 148 \cdot V_r \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \beta} \Omega D_f^3 \mu_c \quad (\text{kg/h}) \quad (2.28)$$

$V_r$  : vitesse de rotation du four (tours/mn)

$\theta$  : inclinaison de l'axe du four par rapport au plan horizontal (degré)

$\beta$  : angle que fait le plan tangent à un cylindre avec le plan horizontal (degré)

$\Omega$  : coefficient de remplissage

$D_f$  : diamètre interne du four (m)

$\mu_c$  : densité volumique du clinker ( $\text{kg/m}^3$ )

La relation donnant la densité volumique du clinker en fonction de la densité volumique de la matière première est :

$$\mu_c = \mu_M / 1,6 \quad (2.29)$$

Le système de préchauffage comporte deux tours identiques, la relation liant le débit farine dans chaque tour au débit du clinker est :

$$WF_1 + WF_2 = 1,6 \cdot WC \quad (2.30)$$

$WF_1$  ,  $WF_2$  : respectivement débit de farine dans la tour 1 et la tour 2.

On peut montrer que l'équation générale liant le diamètre du four avec la longueur de la corde que fait le dépôt de matière dans le four et le coefficient de remplissage est :

$$X_o^4 - 4\Omega D_f^3 X_o + 4\Omega^2 D_f^4 = 0 \quad (2.31)$$

$X_o$  : longueur de la corde (m)



## b) Transfert de chaleur

---

Pour un équipement où l'échange de chaleur a lieu en contre-courant, la température des gaz à la sortie du four est donnée par :

$$T_{k,1} = T_{H} - \frac{a(1-Z)}{a-Z} (T_{H} - T'_{k}) \quad (^{\circ}\text{K}) \quad (2.32)$$

$T_{H}$  : température maximale de la flamme ( $^{\circ}\text{K}$ )

Nous supposons que  $T_{H}$  est constant et ne dépend pas du débit de combustible.

$$\text{avec } a = \frac{WC \cdot C_{pc}}{2 \cdot \delta \cdot C_{pH} \cdot \text{deb} \cdot \mu} \cdot M \quad ; \quad M = \frac{T_M}{273} \quad (2.33)$$

$$\text{et } Z = \exp\left[\frac{-h \cdot L \cdot X_0 \cdot \delta \cdot (a-1)}{WC \cdot C_{pc}}\right] \quad (2.34)$$

$C_{pc}$  : chaleur spécifique moyenne du clinker (WH/kg  $^{\circ}\text{K}$ )

$C_{pH}$  : chaleur spécifique moyenne du gaz (WH/kg  $^{\circ}\text{K}$ )

$\mu$  : masse volumique du gaz dans les conditions normales de température et de pression (kg/m<sup>3</sup>)

$\delta$  : efficacité thermique du four rotatif

$T_M$  : température à laquelle est mesurée le débit de tirage des gaz ( $^{\circ}\text{K}$ )

$h$  : coefficient de transfert thermique (W/m<sup>2</sup>  $^{\circ}\text{K}$ )

$L$  : distance entre le point où la température du gaz est maximale et la sortie du four (m)

La température du clinker dans la zone de cuisson est déterminée comme suit :

$$T_c = T_{H} - \frac{(a-1)}{(a-Z)} (T_{H} - T'_k) \quad (2.35)$$

## II.4.2. Algorithme de simulation du préchauffeur

Le but de cet algorithme est de concevoir un programme qui puisse nous calculer la température du gaz et de la farine dans chaque cyclone, ainsi que la consommation spécifique d'énergie de l'installation. Pour cela, il nous faut résoudre un système d'équations non linéaires par itération.

L'analyse du modèle par un programme est basé sur l'algorithme de Newton itératif, le nombre d'itérations dépend de la précision désirée.

Avant tout, nous allons procéder à la description des méthodes de résolution utilisées par la suite dans l'algorithme.

### II.4.2.1. Racines d'un polynôme (Méthode de Bairstow)

Soit à chercher les racines du polynôme :

$$P(x) = a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4 \quad (2.36)$$

Etant donné le trinôme  $x^2 + px + q$  où  $p$  et  $q$  sont des constantes quelconques,  $P(x)$  peut s'écrire :

$$P(x) = (x^2 + px + q) (b_0 x^2 + b_1 x + b_2) + Rx + S \quad (2.37)$$

La méthode consiste à trouver  $p$  et  $q$  tels que :  
 $R = 0$  et  $S = 0$

La première étape consiste à trouver  $b_0, b_1, b_2, R$  et  $S$  en fonction de  $p$  et  $q$ , on obtient après identification de (2.36) et (2.37) :

$$\begin{cases} b_k = a_k - pb_{k-1} - qb_{k-2} & (k=0 \text{ à } 4) \\ b_{-2} = b_{-1} = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

avec :

$$R = b_3 \text{ et } S = pb_3 + b_4 \quad (2.39)$$



La relation de récurrence (2.38) permet de déterminer  $b_k$  en fonction de  $p$  et  $q$ , donc  $R$  et  $S$ . Pour trouver  $p$  et  $q$  tels que  $R=0$  et  $S=0$ , on donne à  $p$  et  $q$  deux valeurs arbitraires  $p_0$  et  $q_0$ , et on utilise la méthode de Newton adaptée au cas de fonctions de deux variables : à  $p_0$  et  $q_0$  correspondent  $R(p_0, q_0)=R_0$  et  $S(p_0, q_0)=S_0$ . On cherche alors  $\Delta p$  et  $\Delta q$  tels que :  $R(p_0 + \Delta p, q_0 + \Delta q)=0$  et  $S(p_0 + \Delta p, q_0 + \Delta q)=0$  soit :

$$\begin{cases} R_0 + \Delta p (\partial R / \partial p)_0 + \Delta q (\partial R / \partial q)_0 = 0 \\ S_0 + \Delta p (\partial S / \partial p)_0 + \Delta q (\partial S / \partial q)_0 = 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

La résolution de ce système par la méthode de Newton itérative nous permet d'obtenir  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $p$  et  $q$ , donc les racines du polynôme  $P(x)$ .

#### II.4.2.2. Résolution d'un système de fonctions non linéaires à 5 inconnues.

Soit un système de 5 fonctions non linéaires :

$$f_i(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5) = 0 \quad i=1, \dots, 5 \quad (2.41)$$

On doit avoir pour 5 valeurs arbitraires de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ , et  $T_5$  :

$$\begin{aligned} f_i(T_{10} + \Delta T_1, T_{20} + \Delta T_2, T_{30} + \Delta T_3, T_{40} + \Delta T_4, T_{50} + \Delta T_5) = 0 \\ i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \quad (2.42)$$

d'où le système suivant :

$$\begin{aligned} f_i(T_{1n}, T_{2n}, T_{3n}, T_{4n}, T_{5n}) + (T_{1n+1} - T_{1n}) \left( \frac{\partial f_i}{\partial T_1} \right) + (T_{2n+1} - T_{2n}) \left( \frac{\partial f_i}{\partial T_2} \right) + (T_{3n+1} - T_{3n}) \left( \frac{\partial f_i}{\partial T_3} \right) + \\ (T_{4n+1} - T_{4n}) \left( \frac{\partial f_i}{\partial T_4} \right) + (T_{5n+1} - T_{5n}) \left( \frac{\partial f_i}{\partial T_5} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

avec  $i = 1, \dots, 5$

Les dérivées partielles ainsi calculées, il nous reste à résoudre un système linéaire de 5 équations à 5 inconnues, ce calcul est refait à chaque fois jusqu'à obtenir la précision désirée pour les températures  $T_i$ .

### II.4.2.3. Résolution du système d'équation linéaire (Méthode de Gauss-Jordan)

Soit à résoudre le système  $AT=Y$  où  $A$  est une matrice  $5 \times 5$ .

L'algorithme utilisé est le suivant :

$$\left[ \begin{array}{l}
 A^{(0)} = A \text{ et } a_{i,6}^{(0)} = y_i \\
 \text{pour } k=0 \text{ à } 4 \\
 \left. \begin{array}{l}
 i = k+1 \\
 j = k+1 \text{ à } 6
 \end{array} \right\} \Rightarrow a_{k+1,j}^{(k+1)} = a_{k+1,j}^{(k)} / a_{k+1,k+1}^{(k)} \quad (2.44) \\
 \left. \begin{array}{l}
 \text{pour } i = 1 \text{ à } 5 \\
 i \neq k+1 \\
 j = k+1 \text{ à } 6
 \end{array} \right\} \Rightarrow a_{i,j}^{(k+1)} = a_{i,j}^{(k)} - a_{i,k+1}^{(k)} \cdot a_{k+1,j}^{(k+1)} \\
 T_i = a_{i,6}^{(5)}
 \end{array} \right.$$

### II.4.2.4. Application au modèle proposé

- Le polynôme du 4ème degré est le suivant :

$$X_0^4 - 4\Omega D_f^3 X_0 + 4\Omega^2 D_f^4 = 0 \quad (2.45)$$

La méthode de Bairstow nous permet de trouver les racines de ce polynôme, donc de trouver  $X_0$ .

- Le système de fonctions non linéaires est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 QM_{n-1} + QS_{n+1} + QG_{n+1} + QC_{n+1} + QA_{n+1} - QM_n - QS_n - QG_n - QC_n - QA_n - \\
 QL_n - QR_n = 0 \\
 n=1,2,3,4 \text{ et } T_5 - T_{11} + \frac{a(1-Z)}{a-Z} (T_{11} - T'_4) = 0
 \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Par la méthode de Newton, on trouve les températures du gaz et de la matière dans chaque cyclone.

La simulation du préchauffeur est représentée par un organigramme et un programme de simulation (voir Annexe A). Le tableau A.1 utilisé en annexe A pour simuler le processus représente les valeurs numériques de certains paramètres.



Les grandeurs de contrôle ou d'entrées du modèle sont :

- la vitesse de rotation du four,
- le débit de farine,
- le débit gaz.

### II.4.3. Identification paramétrique

La méthode exposée ci-dessous consiste à partir d'un modèle avec des valeurs de paramètres quelconques à l'améliorer itérativement en cherchant à minimiser une fonctionnelle de l'écart entre la sortie réelle et la sortie du modèle (voir paragraphe II.3.3) lorsqu'on applique une entrée identique. C'est cette méthode utilisant les algorithmes de programmation non linéaire que nous allons examiner.

#### II.4.3.1. Méthodes itératives de recherches

##### II.4.3.1.1. Principe

Soit la distance  $D(O,M) = f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m (S_i^M - S_i^0)^2$  une fonctionnelle des paramètres à minimiser.

Les méthodes itératives qui, à partir d'une valeur initiale  $\mathbf{p}_0$  vont nous permettre de calculer des valeurs  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_i, \dots$

$\mathbf{p}$  est le vecteur des paramètres d'identification.

Si l'on choisit les points successifs de façon que :  $f(\mathbf{p}_0) > f(\mathbf{p}_1) > \dots > f(\mathbf{p}_i)$

Comme cette suite numérique est bornée inférieurement par  $f(\hat{\mathbf{p}})$ , elle convergera.

Les algorithmes qui permettent de générer les points  $\mathbf{p}$  sont très variés. On peut distinguer ceux qui s'appuient sur des considérations théoriques et ceux à caractère heuristique qui sont des adaptations des précédents.

##### II.4.3.1.2. Méthode du gradient

Pour choisir  $\mathbf{p}_{i+1}$ , on développera au premier ordre  $f(\mathbf{p})$  autour de  $\mathbf{p}_i$  et on cherchera la valeur de  $\mathbf{p}_{i+1}$  qui, dans le domaine où le développement limité est valable, maximise l'accroissement :

$$f(\mathbf{p}_i) - f(\mathbf{p}_{i+1}) = -\Delta f$$

$$f(\mathbf{p}_i + \delta \mathbf{p}) \simeq f(\mathbf{p}_i) + \mathbf{f}_p^T(\mathbf{p}_i) \delta \mathbf{p} \quad \text{pour } \|\delta \mathbf{p}\| < \epsilon$$

où  $\mathbf{f}_p^T(\mathbf{p}_i)$  est le vecteur des dérivées de  $f$  par rapport à  $\mathbf{p}$ .

Comme en fait  $\epsilon$ , qui délimite le domaine de validité du développement limité, n'est pas connu a priori, on utilise comme formule itérative :

$$\mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{p}_i - k \mathbf{f}_p^T(\mathbf{p}_i) \quad (2.47)$$

où  $k$  est une constante d'itération choisie de façon à assurer une convergence convenable.

Si  $\Delta f > 0$  diminuer  $k$

Si  $\Delta f < 0$  augmenter  $k$

#### II.4.3.1.3. Méthode de Newton

Pour introduire cette méthode, utilisons une approche «indirecte» consistant à résoudre itérativement l'équation implicite vectorielle correspondant à la condition théorique du premier ordre. Pour cela, on peut utiliser l'algorithme classique de Newton-Raphson que nous rappelons ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{problème} : \text{trouver } \mathbf{p} \text{ telque } \mathbf{g}(\mathbf{p}) = 0 \quad (2.48) \\ \text{algorithme} : \mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{p}_i - k \mathbf{G}_p^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{p}_i) \end{array} \right.$$

où  $\mathbf{G}_p$  est la matrice d'élément  $\partial g_i / \partial p_j$

$k$  est une constante dont dépend la convergence; en général, on prend  $k = 1$ .

Si nous appliquons cette méthode à la résolution de la condition de stationnarité :

$$\mathbf{f}_p(\mathbf{p}) = 0$$

On obtient l'algorithme récurrent :

$$\mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{p}_i - k \mathbf{F}_{pp}^{-1}(\mathbf{p}_i) \mathbf{f}_p(\mathbf{p}_i) \quad (2.49)$$



#### II.4.3.1.4. Mise en oeuvre pratique - Méthodes heuristiques

Du point de vue de l'utilisation, la méthode la meilleure est celle qui, pour un ordinateur donné, conduit au résultat dans le temps; le plus court. Ces méthodes heuristiques, le plus souvent dérivées des deux méthodes ci-dessus, sont simples et adaptées à la programmation.

Parmi les méthodes heuristiques, nous citerons:

- la méthode du gradient simplifié,
- la méthode de Partan,
- les algorithmes à convergence finale quadratique.

#### II.4.3.2. Identification du processus de préchauffage

On utilise la méthode du gradient qui nécessite moins de calculs que la méthode de Newton.

L'organigramme et le programme correspondant sont représentés en annexe B.

Le cas est appliqué au préchauffeur de la cimenterie de MEFTAH, le critère à minimiser est donné par :

$$D(O,M) = (T_1 - 593)^2 + (T_3 - 948)^2 + (T_5 - 1463)^2 + (T_c - 1723)^2 \quad (2.50)$$

Les grandeurs d'entrée sont :

- débit farine :  $WF_1 = 88000 \text{ kg/h}$ ,
- débit gaz :  $deb = 185000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- vitesse de rotation du four :  $V_r = 1,3 \text{ tours/mn}$

Les grandeurs mesurées correspondantes sont :

- Température gaz cyclone 1 :  $T_1 = 320^\circ\text{C} = 593^\circ\text{K}$
- Température gaz cyclone 3 :  $T_2 = 675^\circ\text{C} = 948^\circ\text{K}$
- Température gaz sortie du four :  $T_5 = 1190^\circ\text{C} = 1463^\circ\text{K}$
- Température du clinker dans la zone de cuisson :  $T_c = 1450^\circ\text{C} = 1723^\circ\text{K}$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau B.1 (voir Annexe B).

#### II.4.3.3. Commentaires sur les résultats obtenus

Le nombre de paramètres à identifier est au nombre de 14 et sont :

- les degrés de séparation :  $\eta_1, \dots, \eta_4$
- les infiltrations d'air faux :  $G_1^A, \dots, G_5^A$
- le paramètre  $p$  :  $p$
- la perte de masse de matière :  $I_m$
- la température  $T_M$
- le coefficient de transfert thermique :  $h$
- l'efficacité thermique du four rotatif :  $\delta$

Le tableau 2.3 représente les températures obtenues après identification, ainsi que le critère à minimiser.

	$T_1$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	
Valeurs mesurées	320	675	1190	1450	Critère à minimiser
Valeurs initiales	311,448533	669,264022	1163,73777	1418,30684	1800,19826
Valeurs finales	326,391595	690,836635	1185,07683	1432,87167	609,271023
Erreur absolue	6,391595	15,836635	4,9232	17,1284	
Erreur relative	2 %	2,3 %	0,4 %	1,2 %	

Tableau 2.3 - Comparaison des températures mesurées et calculées.



Les résultats obtenus nous montrent que le modèle est adéquat et peut servir à la simulation mathématique du préchauffeur. Nous utiliserons donc ce modèle dans ce qui suit pour étudier l'influence des grandeurs d'entrée et de certains paramètres de conception sur le système.

## II.5. Influence des paramètres du préchauffeur

### II.5.1. Effet du débit fumée

Le tableau B.2 (voir Annexe B) illustre l'influence du débit fumée sur les caractéristiques du préchauffeur. Les figures 2.4 et 2.5 schématisent respectivement les variations de la consommation spécifique d'énergie et les variations du degré de calcination par rapport au débit fumée.

Dans les deux cas, les courbes sont approximativement linéaires et les variations croissantes.

Augmenter le débit signifie élever le degré de calcination et augmenter la consommation spécifique d'énergie. Cependant, on peut signaler que la température  $T_c$  du clinker dans la zone de cuisson doit obligatoirement se trouver dans une marge de  $1430^\circ\text{C}$  à  $1460^\circ\text{C}$ , ceci dans le but d'obtenir une cuisson convenable.

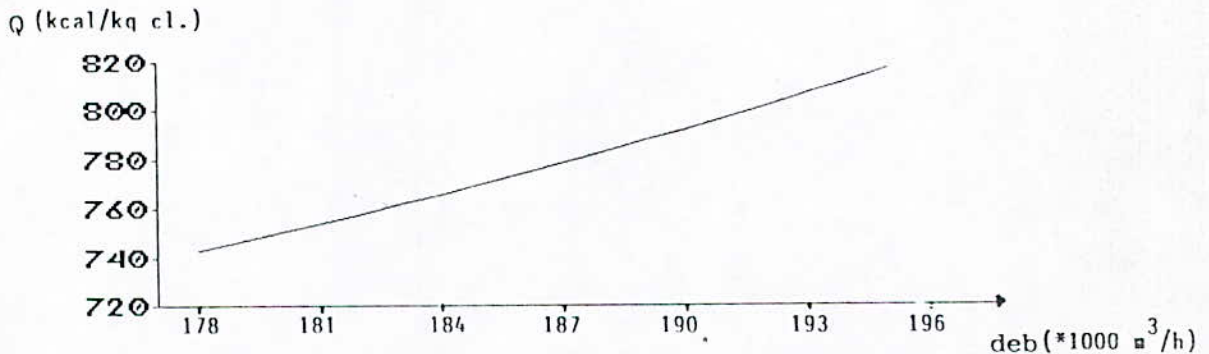


Fig. 2.4.- Influence du débit de tirage sur la consommation spécifique d'énergie.

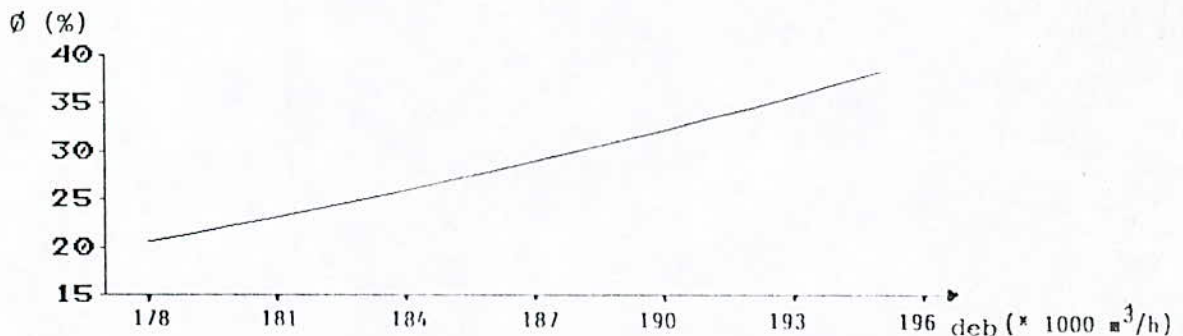


Fig. 2.5.- Influence du débit de tirage sur le degré de calcination.

Quand le débit augmente, les gaz chauds provoquent une élévation de température dans les cyclones, les pertes par gaz à la sortie du préchauffeur sont augmentées, le degré de calcination augmente.

**Remarque**

Afin de préserver une pression convenable dans le four et le refroidisseur, augmenter le débit de tirage nous incite à augmenter les débits d'air secondaire et de combustible.

**II.5.2. Effet du débit farine**

Le tableau B.3 représente les variations des caractéristiques du système étudié comme fonction du débit farine. Les figures 2.6 et 2.7 montrent respectivement l'influence du débit sur la consommation spécifique d'énergie et sur le degré de calcination. Augmenter la production fait diminuer la consommation et le degré de calcination. Toutefois, une limite est tout de suite atteinte car la température  $T_c$  devient inférieure à  $1430^\circ\text{C}$  pour  $WF_1 = 90000 \text{ kg/h}$ .

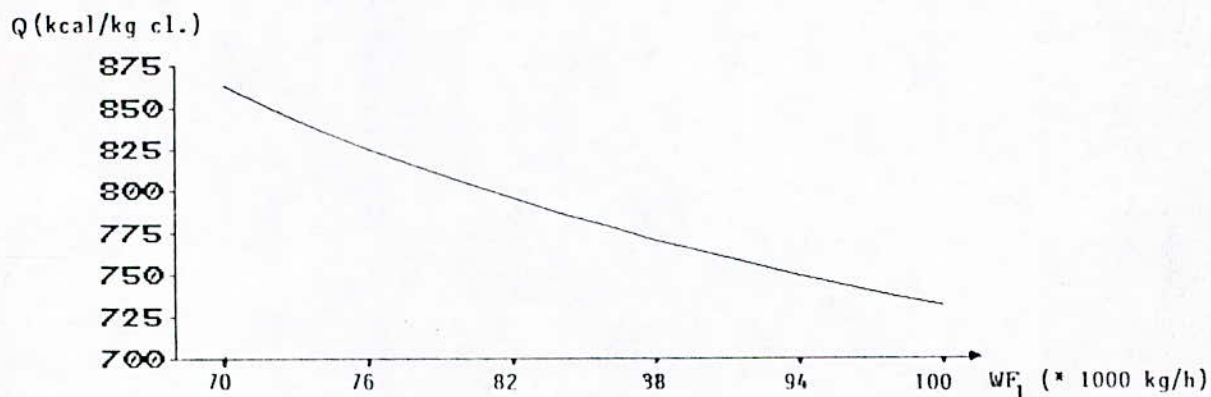


Fig. 2.6.- Influence du débit farine sur la consommation spécifique d'énergie.

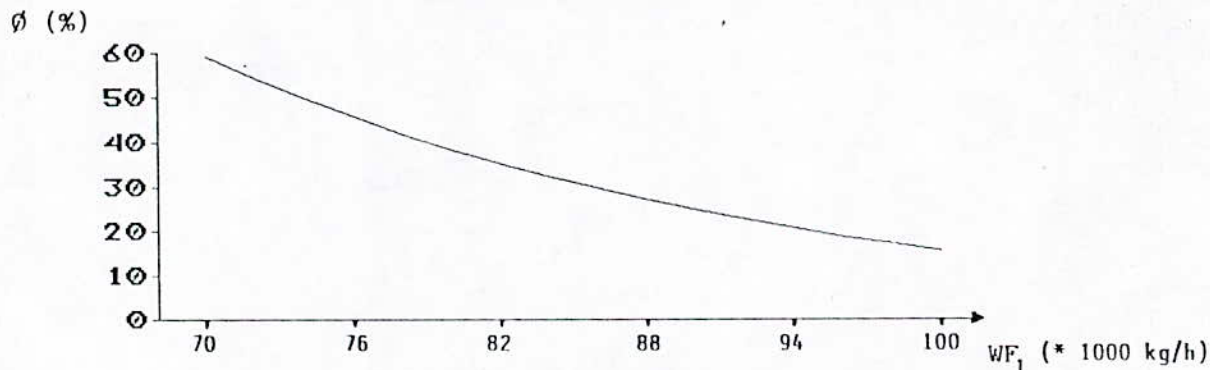


Fig. 2.7.- Influence du débit farine sur le degré de calcination.



### II.5.3. Effet de la vitesse de rotation du four sur les caractéristiques de la cuisson

Les figures 2.8 et 2.9 schématisent les courbes tracées à partir du tableau B.4. On voit que la vitesse n'influe que faiblement sur la température  $T_1$  et la consommation spécifique d'énergie. Quand la vitesse augmente, pour un débit farine constant, la durée de séjour de la matière dans le four se trouve réduite et la chaleur des gaz augmente, ce qui élève la température dans les cyclones.

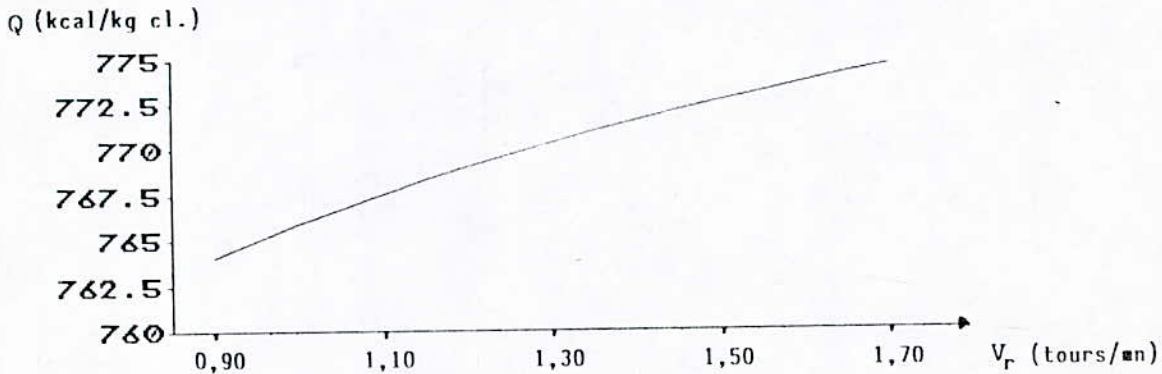


Fig. 2.8.- Influence de la vitesse de rotation du four sur la consommation spécifique d'énergie.

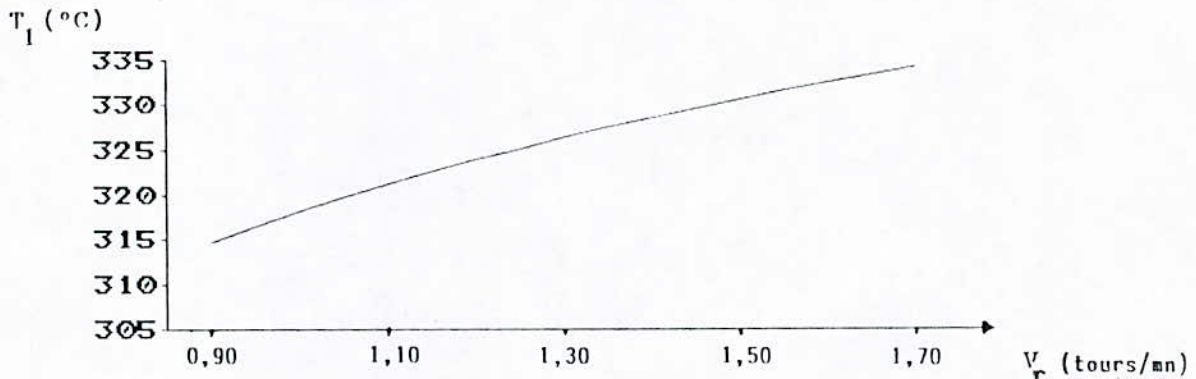


Fig. 2.9.- Influence de la vitesse de rotation du four sur la température dans le cyclone 1.

### II.5.4. Effet de la part d'air faux dans le cyclone 1 (voir Tableau B.6)

L'influence de la part d'air faux sur la température  $T_1$ , sur la consommation spécifique d'énergie et sur le degré de calcination est montrée par les figures 2.10, 2.11 et 2.12.

Lorsque la quantité d'air faux augmente dans le cyclone 1, la température  $T_1$  diminue, il en est de même pour le degré de calcination. En ce qui concerne la consommation spécifique d'énergie, elle augmente car dans ce cas, il y a un apport extérieur d'une quantité de chaleur négative puisque l'air est froid.

Q (kcal/kg.cl.)

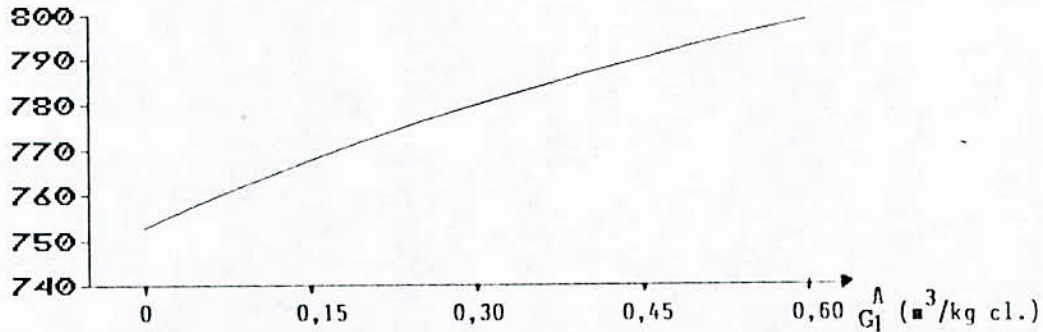


Fig. 2.10.- Influence de la part d'air faux dans le cyclone 1 sur la consommation spécifique d'énergie.

$T_1$  ( $^{\circ}C$ )

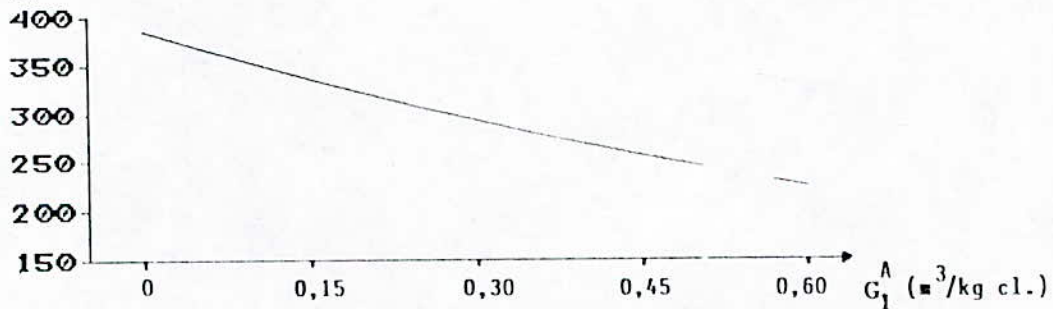


Fig. 2.11.- Influence de la part d'air faux dans le cyclone 1 sur la température.

$\phi$  (%)

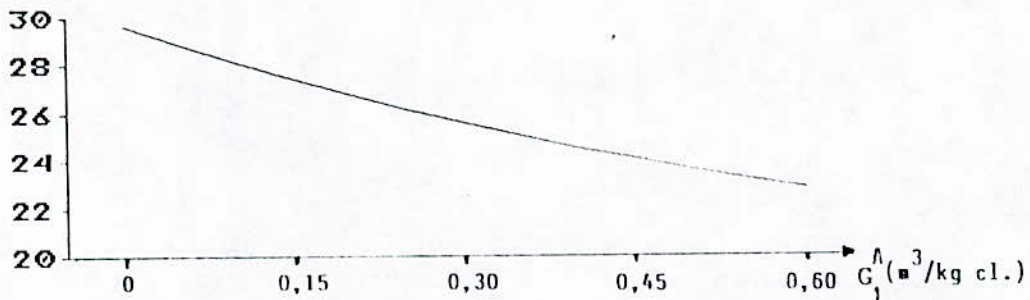


Fig. Fig. 2.12. - Influence de la part d'air faux dans le cyclone 1 sur le degré de calcination.



### II.5.5. Effet des degrés de séparation

Les courbes correspondant aux tableaux B.5 sont représentées par les figures 2.13 et 2.14 dans le cas de la consommation spécifique d'énergie et du degré de calcination.

On peut voir d'après ces tableaux que l'influence de  $\eta_1$  est très importante en ce qui concerne la quantité de poussières émises à la sortie du préchauffeur, pour  $\eta_1 = 0,75$ , on a  $S_1 = 0,662$  kg/kg clinker, ce qui représente plus de la moitié du débit farine, l'influence de  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  et  $\eta_4$  est faible.

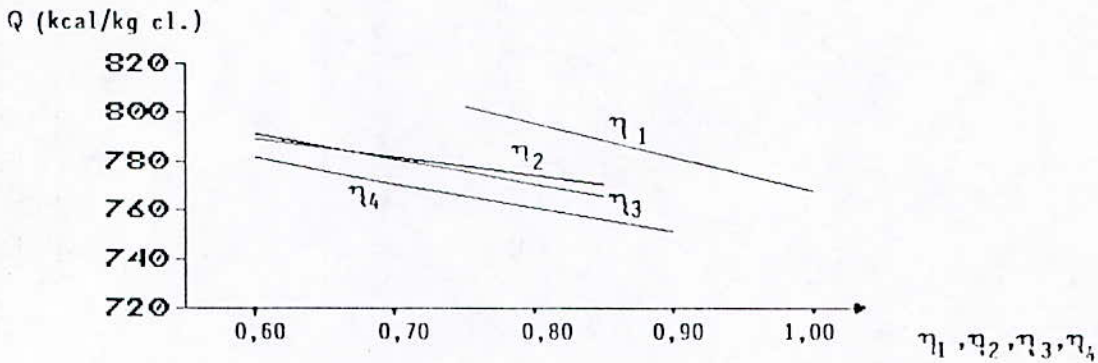


Fig. 2.13 - Influence du degré de séparation sur la consommation spécifique d'énergie.

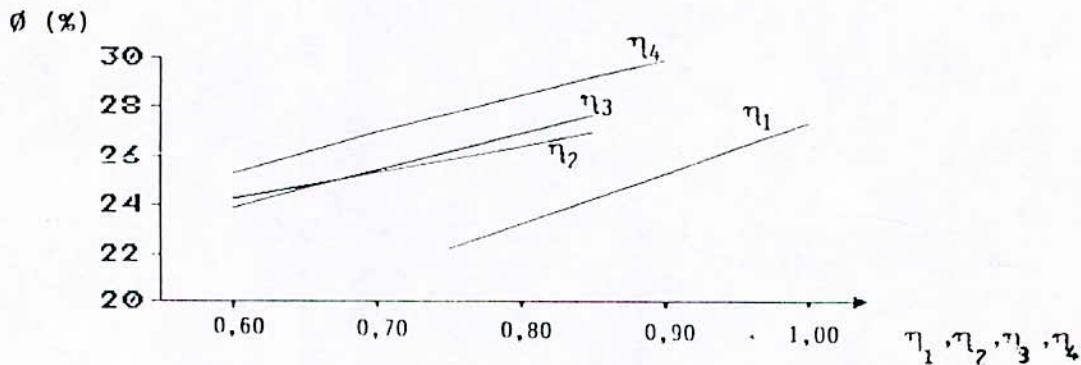


Fig. 2.14 - Influence du degré de séparation sur le degré de calcination.

C H A P I T R E   I I I

---

COMMANDE OPTIMALE du PRECHAUFFEUR  
à SUSPENSION

---



### III. COMMANDE OPTIMALE du PRECHAUFFEUR à SUSPENSION.

#### III.1. Système de commande automatique optimale

Dans la création des systèmes de commande automatique optimale (S.A.O.), une distinction est faite entre les optimisations statique et dynamique.

L'optimisation statique est l'une des méthodes de commande par calculateurs ; elle consiste à déterminer, lorsque la variation des conditions extérieures en fait naître la nécessité, un nouveau régime technologique qui soit le meilleur possible. Une telle optimisation suppose que le processus se trouve en régime permanent et peut être transféré instantanément dans un nouvel état.

Suivant le niveau des connaissances que l'on possède sur le processus, une optimisation statique peut être effectuée : à l'aide de calculateurs utilisant un modèle mathématique du processus (ce qu'on connaît du processus est suffisamment complet, et le problème est purement mathématique) ; sur des optimisateurs automatiques appliquant la méthode de "recherche pure" (la création d'un modèle statique du processus se heurte à des difficultés) ; à l'aide de méthodes combinées réunissant les méthodes mathématique et expérimentale de détermination de l'optimum.

Les méthodes d'optimisation statique sont utiles pour la commande optimale des systèmes continus qui atteignent en un délai acceptable un nouveau régime permanent après une variation des grandeurs de commande. Le modèle statique adopté nous permettra seulement d'aborder l'optimisation statique.

L'optimisation dynamique est une méthode de commande dans laquelle, non seulement le processus est maintenu au niveau optimal en régime permanent, mais encore le passage d'un régime à un autre s'effectue de la meilleure façon possible. La fonction d'optimalité devient fonction du temps, et le problème de la commande optimale se ramène à maximiser ou minimiser dans le temps un critère déterminé. L'optimisation dynamique possède une certaine ressemblance avec l'optimisation statique ; mais elle est plus complexe, puisqu'elle est liée à la nécessité de déterminer une fonction du temps et non certaines valeurs distinctes.



Le problème de la commande dans ce cas se ramène à choisir à chaque instant l'ensemble des actions de commande de telle façon que le comportement obtenu pour le système à commander soit dans un sens bien défini le comportement optimal, quel que soit l'ensemble d'actions de perturbation considéré. On entend habituellement par comportement optimal, l'ensemble de variables de sortie qui assure le maximum d'une certaine "fonction d'utilité", ou bien le mode de variation des variables de sortie qui assure au cours d'un certain intervalle de temps, la valeur maximale ou minimale d'une fonctionnelle donnée de ces variables.

### III.2. Optimisation des processus avec emploi de modèles mathématiques

L'optimisation d'un processus quelconque consiste à trouver l'optimum d'une fonction donnée, qui correspond aux conditions optimales de conduite de ce processus.

Pour évaluer l'optimum, il faut avant toute chose choisir le critère d'optimisation. Suivant les conditions concrètes, on peut prendre pour critère d'optimisation un critère technologique, comme par exemple le maximum de production élevée par unité de volume de l'appareil, ou un critère économique, comme le coût minimal du produit pour une productivité donnée, ou d'autres critères encore.

Sur la base du critère d'optimisation choisie, on forme ce qu'on appelle la fonction économique, ou fonction d'utilité, qui traduit la façon dont le critère d'optimisation dépend des paramètres qui influent sur sa valeur. Le problème de l'optimisation se ramène à trouver l'extremum (maximum ou minimum) de la fonction économique.

Il est bon de noter que la question de l'optimisation se pose dans les cas où, étant donné deux ou plusieurs caractéristiques qualitatives qui influent de façons différentes sur des processus variables, il faut résoudre par un compromis le problème de la caractéristique à améliorer, de préférence, en équilibrant l'influence de l'une par celle de l'autre. par exemple, on équilibre l'efficacité du processus par sa productivité, la qualité par la quantité, la productivité par les dépenses, etc...



Suivant le caractère des modèles mathématiques considérés, on adopte différentes méthodes mathématiques d'optimisation. Beaucoup d'entre-elles se réduisent à trouver le minimum ou le maximum de la fonction économique. Le tableau 3.1 systématise les méthodes d'optimisation qui sont employées. En procédant au choix de la méthode d'optimisation, on doit prendre en considération les difficultés de calcul qui peuvent survenir : volume des calculs, complexité de la méthode elle-même, dimension du problème, etc...

Il ne semble pas possible d'exposer des règles de simplification des problèmes qui valent pour tous les cas imaginables ; il faut chaque fois aborder le choix de la méthode d'optimisation et la résolution des problèmes en partant de la nature concrète du problème lui-même.

### III.3. Optimisation des processus statiques

#### III.3.1. Définition du problème.

Considérons par exemple un système asservi classique et intéressons-nous au régime permanent de la sortie correspondant à une entrée de consigne ; la liaison entre ces deux grandeurs se fait par l'intermédiaire du gain statique. Une optimisation statique pourra alors consister à rechercher l'entrée de consigne minimisant une fonction de la sortie en régime permanent. Si une perturbation constante vient changer cette dernière, il faudra modifier la consigne en conséquence. Un système fonctionnant dans ces conditions est appelé système extrême. Le problème de l'optimisation statique peut être caractérisé de façon générale par :

- les relations instantanées entre commandes et sorties :

$$\mathbf{s} = \mathbf{r}(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

- les contraintes sur les sorties et les commandes :

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leq 0 \quad (3.2)$$

- le critère à minimiser :

$$C = f(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \quad (3.3)$$

Méthodes d'optimisation	Caractère du processus et problème à résoudre
Recherche analytique de l'extremum	Processus déterministes décrits par des fonctions différentiables.
Méthodes des multiplicateurs de Lagrange	Processus déterministes décrits par des fonctions différentiables avec contraintes en forme d'égalités.
Méthodes variationnelles	Critères d'optimalité en forme de fonctionnelles. Résolution des équations d'Euler. Réacteurs adiabatiques à plusieurs couches.
Principe du maximum de Pontriaguine	Large classe de problèmes (en particulier, problème de commande optimale).

#### Méthodes de programmation mathématique

Programmation géométrique	Optimisation des fonctions algébriques
Programmation linéaire	Problèmes typiques : problème de fabrication avec gain maximal de différents produits pour différents types de matières premières.
Programmation dynamique	Processus à plusieurs stades.

#### Méthodes du gradient

Toutes les variantes	Les plus générales des méthodes d'optimisation des fonctions linéaires et non linéaires, sans contraintes et avec contraintes linéaires et non linéaires. La plupart des processus complexes de la technologie chimique.
----------------------	--

#### Méthodes automatiques avec modèles à autoréglage

Toutes les variantes	Systèmes complexes de la technologie chimique.
----------------------	--

#### Méthodes statistiques

Analyse de régression	Systèmes à description non déterministe
Analyse de corrélation	Optimisation et planification de l'expérience.

**Tableau 3.1.** Systématisation des méthodes d'optimisation applicables aux processus de la technologie chimique.



### III.3.2. Principe de la solution

On étudie le cas où les fonctions  $f$  sont connues explicitement, le problème se réduit à la recherche du minimum d'une fonction avec contraintes égalité ou inégalité. Pour cela est employée la méthode du gradient qui est utilisé par la suite.

### III.3.3. Méthode du gradient

Nous avons déjà présenté la méthode du gradient dans le cas sans contrainte, nous allons maintenant voir si le principe de cet algorithme peut être étendu au cas des contraintes inégalités.

#### III.3.3.1. Position théorique du problème

Considérons un point  $\mathbf{x}_n$  régulier obtenu à la nième itération. Le principe consiste à rechercher quel est le pas  $\delta$  de longueur  $\|\delta\| < \epsilon$  tel que  $f(\mathbf{x}_n) - f(\mathbf{x}_{n+1})$  soit maximum,  $\mathbf{x}_n + \delta$  étant un point admissible, c'est-à-dire satisfaisant les contraintes.

#### III.3.3.2. Principe de la méthode de résolution

Etant donné que de toute façon la méthode de gradient n'est qu'une approximation au premier ordre et qu'elle ne peut prétendre être l'algorithme optimal. Nous allons chercher à définir directement un principe de choix  $\delta$ . Pour cela, nous allons d'abord rechercher la direction de  $\delta$  qui assure une variation maximum de  $f$  en satisfaisant les contraintes. Ensuite, nous verrons comment choisir le pas. cette méthode est parfois appelée méthode du gradient projeté.

#### III.3.3.3. Choix de la direction du pas d'itération

soit  $\mathbf{x}_n$  et  $K_n = K(\mathbf{x}_n)$

$$\text{tel que : } \begin{cases} h^i(\mathbf{x}_n) = 0 & \forall i \in K_n \\ h^i(\mathbf{x}_n) < 0 & \forall i \notin K_n \end{cases} \quad (3.4)$$

supposons connus  $\mathbf{x}_n$  et les  $h^i$  pour  $i \in K_n$

soit  $K'$  un ensemble d'indices  $i$  avec  $K' \subset K_n$ ; il définit au voisinage de  $\mathbf{x}_n$  une nappe correspondant aux équations :  $h^i(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall i \in K' \subset K_n \quad (3.5)$

Si  $\|\delta\|$  est suffisamment petit, les contraintes  $i$  non saturées ( $i \notin K_n$ ) n'interviennent pas.

Par la suite, le pas pourra se faire dans l'une des nappes  $N_k$ . A chaque nappe  $N_k$  correspond un pas  $\delta$  dans une direction bien déterminée qui est la projection de  $f_x$  sur  $N_k$ .  $K'$  sera dit admissible si le pas correspondant ne viole pas les contraintes inégalités pour  $i \in K_n - K'$ . L'approche utilisée consiste alors à rechercher parmi les  $K'$  admissibles celui qui conduit à la variation de  $f$  la plus importante.

Afin de pouvoir effectuer numériquement ces opérations, on va en expliciter les différentes phases :

soit  $Q(K')$  défini par :

$$Q(K') = M^T(x_n) [M(x_n) M^T(x_n)]^{-1} M(x_n) \quad (3.6)$$

où  $M(x_n)$  est la matrice ayant pour ligne les  $h_x^i$  pour  $i \in K'$ .

Le pas suivant  $N_k$ , sera alors :

$$\delta = -k [I - Q(K')] f_x \quad (3.7)$$

$k$  restant encore à définir, on a :

$$\Delta f = k f_x^T [I - Q(K')] f_x \quad (3.8)$$

Les contraintes imposent pour que  $K'$  soit admissible :

$$\alpha_i = h_x^{iT}(x_n) \delta \leq 0 \quad \forall i \in K_n - K' \quad (3.9)$$

Par la suite, le problème revient à trouver  $K' \subset K_n$  tel que :

$$\Delta f = f_x^T [I - Q(K')] f_x \text{ soit maximum} \quad (3.10)$$

$$\text{avec } h_x^{iT}(x_n) [I - Q(K')] f_x \leq 0 \quad \forall i \in K_n - K' \quad (3.11)$$

#### III.3.3.4. Choix de la longueur du pas

Une fois la direction du pas déterminée :  $[I - Q(K')] f_x$ , on effectue un pas en utilisant la valeur de  $k$  choisie initialement ou ajustée au cours des itérations antérieures.

On calcule alors le point  $x'_{n+1}$  donnée par :

$$x'_{n+1} = x_n - k\delta \quad (3.12)$$

et on recalcule sur les contraintes correspondant à  $\hat{K}'$  en utilisant la formule :

$$x_{n+1} = x'_{n+1} - G_x^{-1}(x'_{n+1}) [G_x(x'_{n+1}) G_x^T(x'_{n+1})]^{-1} g(x'_{n+1}) \quad (3.13)$$



réutilisée autant de fois qu'il est nécessaire pour obtenir la précision désirée :

$G_x^i$  représente la matrice ayant pour ligne  $h_x^i$   $i \in \hat{K}'$ .

Deux possibilités peuvent alors se produire :

1. Le point  $x_{n+1}$  vérifie toutes les contraintes pour  $i \in \hat{K}'$ . Dans ce cas, on prend  $x_{n+1}$  pour un nouveau point de départ d'une itération avec  $K_{n+1} = \hat{K}'$ .
2. Le point  $x_{n+1}$  viole une ou plusieurs contraintes pour  $i \in \hat{K}'$ . Dans ce cas on réduit temporairement  $k$  jusqu'à ce que toutes les contraintes nouvelles soient saturées au point  $x_{n+1}$ . On prend alors le  $x_{n+1}$  modifié comme point de départ de la nouvelle itération et  $K_{n+1} = K' + \text{nouvelles contraintes}$ .

### III.3.3.5. Mise en oeuvre pratique

Le procédé décrit ci-dessus est illustré par un exemple sur la figure 3.1 dans le cas bidimensionnel.

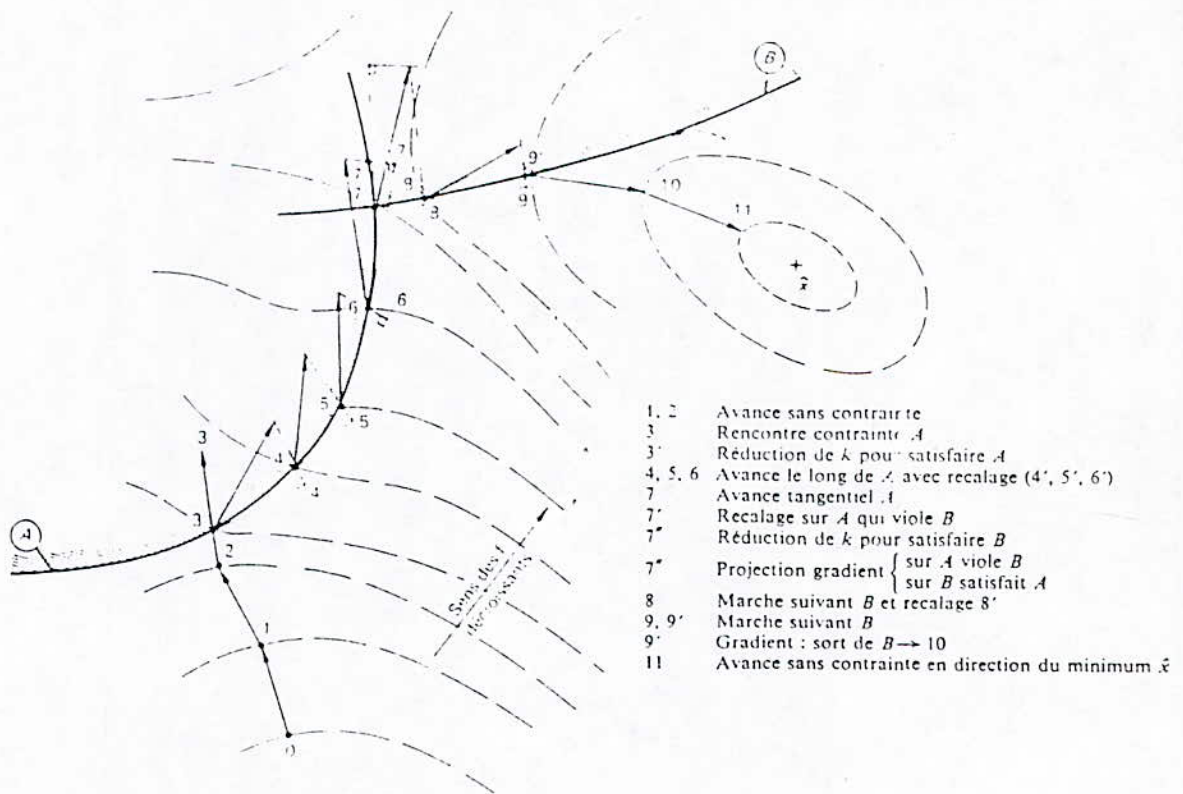


Fig. 3.1 - Exemple illustrant la méthode du gradient projeté.

Sur le schéma de la figure 3.2 a été représenté l'organigramme d'ordonnancement général des différentes opérations.

### III.4. Commande optimale du préchauffeur à suspension

Nous déterminerons dans ce qui suit les conditions d'optimalité de fonctionnement du préchauffeur de la cimenterie de MEFTAH dont nous avons déterminé le modèle mathématique au Chapitre II.

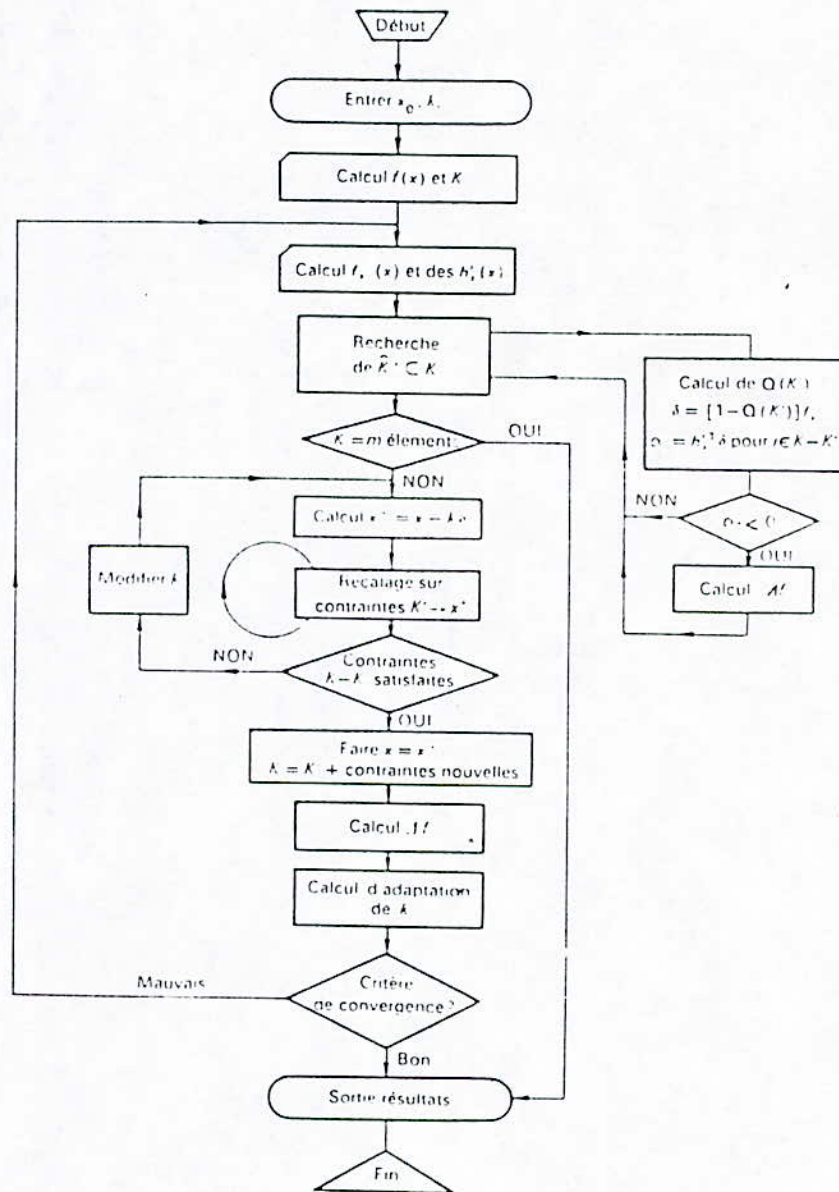


Fig. 3.2 - Organigramme de la méthode du gradient contraintes inégalités.



Afin que la cuisson soit complète et afin d'obtenir un ciment de bonne qualité, la température du clinker dans la zone de cuisson doit se trouver dans un intervalle de 1430°C à 1460°C. Les contraintes inégalités sont :

$$T_c - 1460 \leq 0 \quad (3.14)$$

$$1430 - T_c \leq 0$$

Les grandeurs de commande qu'il faut chercher pour assurer l'optimisation du système sont : la vitesse de rotation du four  $V_r$ , le débit farine  $WF_1$  et le débit fumée deb.

La fonction objective à minimiser est donnée par :

$$f(V_r, WF_1, deb) = Q + 10000/\phi \quad (3.15)$$

On cherche donc à minimiser la consommation spécifique d'énergie tout en augmentant le degré de calcination.  $Q$  est très grand devant  $1/\phi$ , c'est la raison pour laquelle un facteur de pondération est introduit dans la fonction objective.

Dans notre cas, les deux contraintes ne sont jamais violées simultanément, l'organigramme de la figure 3.2 se simplifie et prend la forme de celui représenté en annexe C. Un programme basé sur cet organigramme est décrit en annexe C.

Le tableau C.1 toujours en annexe C illustre les résultats obtenus après chaque itération.

La commande optimale est :

$$V_r = 1,300863385 \text{ tours/mn} ; WF_1 = 80899,68 \text{ kg/h} ; \\ deb = 185544,439 \text{ m}^3/\text{h} ;$$

$$\phi = 37,7877699 \% ; Q = 803,357836 \text{ kcal/kg cl.} \\ T_c = 1459,87156^\circ \text{ C}$$

### III.5. Conclusion

L'objectif qu'on peut se fixer dans l'analyse ou la synthèse d'une installation de cuisson, est d'augmenter la production tout en limitant la consommation spécifique d'énergie.

La question qui peut se poser est comment agir sur la production horaire ?

Généralement, le degré de remplissage du four, ce qui sous entend la surface de captation de la matière, est calculé lors de la conception, et est déterminé afin de pouvoir optimiser les échanges de chaleur entre la matière et le gaz. Elever la production nous incite donc à augmenter la vitesse de rotation du four afin de garder constant le degré de remplissage du four. Cependant, la contrainte  $1430^{\circ}\text{C} \leq T_c \leq 1460^{\circ}\text{C}$  se trouve violée si on n'augmente pas le degré de calcination dans l'étage inférieur du préchauffeur.

On en conclut que le facteur qui agit directement sur la production est le degré de calcination.

En augmentant le degré de calcination, on agit inévitablement sur la consommation spécifique d'énergie, elle se trouve augmentée. Les courbes schématisées au Chapitre II montre ce phénomène qui peut être expliqué comme suit :

Lorsque le rapport  $WF_1 / deb_1$  passe à  $WF_2 / deb_2 = WF_1 / deb_1$ , avec  $WF_2 > WF_1$ , la charge thermique du four augmente, la température des gaz à la sortie du four augmente, ce qui fait élever les températures dans chaque cyclone, en particulier dans le cyclone 4 où le degré de calcination augmente, et le cyclone 1 où les pertes augmentent, ce qui élève la consommation spécifique d'énergie.

On en conclut que le degré de calcination et la consommation spécifique d'énergie sont étroitement liés.

Ce que nous nous sommes proposés de faire dans ce projet est de chercher un compromis entre ces deux caractéristiques quantitatives.



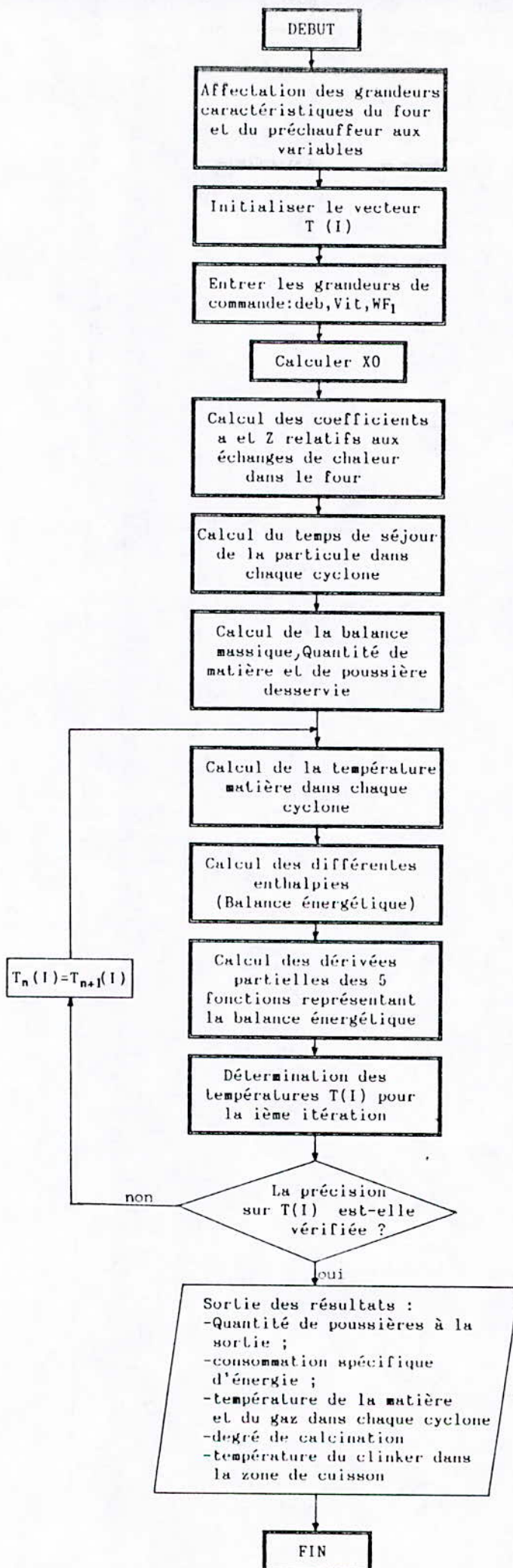
L'idée qui peut venir à l'esprit est d'introduire un précalcinateur au niveau inférieur de la tour, engendrant un degré de calcination important (60%). Du combustible est amené au précalcinateur et, est brûlé au contact direct de la farine crue. En raison de la répartition homogène de la farine crue dans les gaz chauds, la chaleur dégagée est utilisée pour la décarbonation directe, sans augmentation critique de la température  $T_1$  au niveau du cyclone 1, les pertes des gaz chauds à la sortie sont faibles et la consommation spécifique d'énergie faible.

De plus, la décarbonation étant déjà très avancée dans le précalcinateur, la charge thermique du four rotatif diminue, ce qui conduit à une plus forte production avec un faible débit de combustible donc une faible consommation d'énergie. Le four rotatif peut donc être de plus petite taille et, même, pour les productions élevées, les dimensions admissibles ne sont plus dépassées. Les coûts d'investissement sont par conséquent abaissés et, en raison de la charge thermique, plus faibles, les coûts d'exploitation sont également diminués.

A N N E X E   A



Paramètre	Valeur	Unité	Symbole dans le programme
$S_c$	6,76	$m^2$	S
H	6,60	m	HR
D	6,30	m	DA
$D_f$	5,80	m	D
L	77,80	m	L
d	0,0001	m	DI
Nu	0,143	-	NS
$C_H$	0,280	kcal/kg °K	CM
$\mu_c$	2470	kg/m <sup>2</sup>	RC
$C_{pc}$	0,314	Wh/kg. °K	CPC
$C_{pH}$	0,280	Wh/kg. °K	CHP
$\mu$	1,27	kg/m <sup>3</sup>	MVF
h	597,846136	W/m <sup>2</sup> . °K	H
$T_H$	2073	°K	THI
$T_H$	615,605023	°K	TH
$T_o$	323	°K	TO
$M_o$ ou M	1,60	KG/kg CL.	MO
P	0,527146745	kg/m <sup>3</sup>	P
QL <sub>5</sub>	325	kJ/kg CL.	QLS
QT	1736	kJ/kg CL.	QT
QL <sub>1</sub>	50	kJ/kg CL.	Q5L
QL <sub>2</sub>	42	kJ/kg CL.	Q2L
QL <sub>3</sub>	25	kJ/kg CL.	Q3L
QL <sub>4</sub>	25	kJ/kg CL.	Q4L
S <sub>5</sub>	0,3	kJ/kg CL.	S5
$\eta_c$	0,6	-	NC
$\alpha$	0,12	-	ALPHA
$I_m$	0,0636599869	-	IM
$\delta$	0,536282663	-	LU
$\eta_1$	0,980700421	-	N(1)
$\eta_2$	0,850350063	-	N(2)
$\eta_3$	0,800526836	-	N(3)
$\eta_4$	0,699764744	-	N(4)
$G_1^A$	0,179578115	Nm <sup>3</sup> /kg CL.	G(1)
$G_2^A$	0,179610785	Nm <sup>3</sup> /kg CL.	G(2)
$G_3^A$	0,179456654	Nm <sup>3</sup> /kg CL.	G(3)
$G_4^A$	0,180537917	Nm <sup>3</sup> /kg CL.	G(4)
$G_5^A$	0,254604444	Nm <sup>3</sup> /kg CL.	G(5)
K	4	-	
$\theta$	1,8	-	NU
$\beta$	25	-	GAMA



Organigramme simplifié de la simulation d'une tour de préchauffage



PROGRAMME DE SIMULATION D'UNE TOUR  
DE PRECHAUFFAGE

```

5 HOME
10 REM *****
      ***** PROGRAMME DE SIMULATION D'UNE TOUR *****
      ***** DE PRECHAUFFAGE REALISE PAR *****
      ***** Monsieur AOUCHICHE KAMEL *****
      *****
20 DIM D4(5):DIM DG(5):DIM G(5):DIM A(6,6,6):DIM B(6):DIM T(6)
30 DIM TP(5):DIM SE(5):DIM CX(5):DIM TE(5):DIM LG(5):DIM NG(5)
40 DIM LM(5):DIM TC(5): DIM EX(5):DIM DT(5,5):DIM E(4):
   DIM P(14)
50 DIM N (4):DIM TO(5):DIM E1(4):DIM H(4):DIM P1(4):DIM Z1(4)
60 DIM MA(4):DIM SA(4):DIM SP(4):DIM MP(4):DIM S(4):DIM C(5)
70 DIM MB(4):DIM AI(5):DIM GA(5):DIM PO(4):DIM MT(4):
   DIM F(5)
80 REM **** AFFECTATION DES GRANDEURS CARACTERISTIQUES ****
      **** DU FOUR ET DU PRECHAUFFEUR AUX VARIABLES ****
90 S=6.76:DI=1E-04:PI=3.1415927:DA=6.3:HR=6.6
100 NS=2/14:CM=0.28:LG(1)=.5:LG(2)=.38:LG(3)=.33
110 LG(4)=.27:NG(1)=.000055:NG(2)=.0000865:NG(3)=.0001132
120 BM=16.6846 E-5:BS=BM:ALPHA=0.12:AC= 1.7755:AM=.9718
130 NG(4)=0.0001515:NG(5)=.000213:D=5.8:RC=2470
140 CPC=0.314:CHP=0.280:MVF=1.27:L=77.8:NC=0.6
150 TH1=2073:LM(1)=0.0392:LM(2)=0.0494:LM(3)=0.0570
160 LM(4)=0.0658:M0=1.6:QLS=325:QT=1736:AS=AM
170 BC=43.4892 E-5:AA=1.2779:BA=13.7156 E-5:TO=323
180 S5=0.3:Q5L=50:Q2L=42:Q3L=25:Q4L=25
190 REM **** ENTREE DES GRANDEURS DE COMMANDE ****
      **** DU PRECHAUFFEUR ****
200 INPUT "ENTRER LA VITESSE DE ROTATION DU FOUR:";E(1)
210 INPUT "ENTRER LE DEBIT DES GAZ DE TIRAGE      ";E(2)
220 INPUT "ENTRER LE DEBIT FARINE      ";E(4)
230 E(3)= (E(4)+88000)/1.6
240 VIT=E(1)      :   DEB=E(2)      :   WC=E(3)
250 REM **** CALCUL DE X0 ****
260 NU= 1.8*PI/180: GAMA= 25*PI/180
270 FI= (WC*SIN(GAMA))/(148*VIT*SIN(NU)*(D+3)*RC)
280 Q0=2 : P0=-1
290 Q1=((-1)*8*FI*(D+3)*P0*Q0-2*(P0+4)*Q0+3*(P0+2)*Q0*Q0
      -12*FI*FI*(D+4)*(P0+2)+8*Q0*(FI+2)*(D+4)-2*(Q0+3))
300 Q1=Q1/((-3)*(P0+4)+4*(P0+2)*Q0-4*(Q0+2))
310 P1=(-4)*(FI+2)*(D+4)+Q0*Q0-Q1*((-1)*(P0+2)+2*Q0)-2*
      (P0+2)*Q0)/((-2)*P0*Q0)
320 IF ABS(P1-P0)>1E-7 OR ABS(Q1-Q0)>1E-7 THEN Q0=Q1:P0=P1:
      GOTO 300
330 D1=(P1+2)-4*Q1:X0= ((-1)*P1+SQR(D1))/2
340 PRINT"LA CORDE QUE FAIT LE DEPOT DE MATIERE DANS LE FOUR
      EST:";X0;"m"

```



```

350 REM**** PARAMETRES A IDENTIFIER ****
360 P(1)=0.615605023 :P(2)=0.850350063 :P(3)=0.800526836
370 P(4)=0.699764744:P(5)=0.179578115:P(6)=0.179610785
380 P(7)=0.179456654:P(8)=0.180537917:P(9)=0.254604444
390 P(10)=0.980700421:P(11)=0.0636599869:P(12)=0.597846136
400 P(13)=0.536282663: P(14)=0.527146745
410 TM=P(1):N(2)=P(2):N(3)=P(3):N(4)=P(4):G(1)=P(5):G(2)=P(6)
420 G(3)=P(7):G(4)=P(8):G(5)=P(9):N1=P(10):IM=P(11):H=P(12)
430 LU=P(13):P=P(14):TM=TM*1000:H=H*1000
440 E=(DEB/WC)*P*(.3936+.3358*ALPHA)*0.001
450 F=(DEB/WC)*P*(5.464+3.604*ALPHA)*1E-8
460 REM****CALCUL DES COEFFICIENTS RELATIFS AUX ECHANGES ****
      **** DE CHALEUR DANS LE FOUR ****
470 M=TM/273:WG=DEB/(S*3600)
480 A=((WC*CPC)/(LU*DEB*2*MVF*CHP))*M
490 Z=EXP((-1)*H*L*X0*LU*(A-1))/(WC*CPC)
500 SD=A*(1-Z)/(A-Z)
510 REM**** CALCUL DE LA DUREE DE SEJOUR D'UNE PARTICULE ****
      **** DANS CHAQUE CYCLONE ****
520 FR=NS*6/(RC*1.6*DI*DI*3600*CM)
530 FX=(9/4)*((DA/DI)↑2)/(RC*1.6)
540 FOR I=1 TO 4
550 TP(I)=FX*LG(I)*NG(I)/(WG↑2)
560 CX(I)=9.81*(DI↑2)*RC*1.6/(NG(I+1)*18*LG(I))
570 SE(I)=HR/(WG-CX(I)):TE(I)=TP(I)+SE(I)
580 NEXT I
590 REM **** RESOLUTION DU SYSTEME DE FONCTION ****
      **** NON LINEAIRE ****
600 T0(1)=623:T0(2)=820:T0(3)=930:T0(4)=1133:T0(5)=1423
610 REM **** BALANCE MASSIQUE ****
620 E1(4)=M0+S5:H(4)=M0*IM*0.89:P1(4)=E1(4)*(1/N(4)-1)
630 Z1(4)=H(4)*(1/N(4)-1)
640 FOR I=3 TO 1 STEP -1
650 E1(I)=E1(I+1)*(1/N(I+1)-1)+M0
660 H(I)=H(I+1)*(1/N(I+1)-1)
670 P1(I)=E1(I)*(1/N(I)-1):Z1(I)=H(I)*(1/N(I)-1)
680 NEXT I
690 REM **** CALCUL DE LA TEMPERATURE MATIERE ****
      **** DANS CHAQUE CYCLONE ****
710 TC(1)=T0(1)-EXP((-1)*FR*LM(1)*TE(1))*(T0(2)-T0)
720 FOR I=2 TO 4
730 TC(I)=T0(I)-EXP((-1)*FR*LM(I)*TE(I))*(T0(I+1)-TC(I-1))
740 NEXT I
750 FOR I=1 TO 4
760 EX(I)=(-1)*EXP((-1)*FR*LM(I)*TE(I))
770 NEXT I
780 TC=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))-250
790 REM **** BALANCE ENERGETIQUE ****
800 PSI=0.89*((TC(4)-273)*.001)↑9:QR=(422-0.208*T0(4))
      *4.1868*PSI
810 C=QLS+QT+TC*.25*(1-NC):GNC=(IM/((1-IM)*1.965))
820 GC5=((IM*(1-0.89*((TC(4)-273)*0.001)↑9)))/(1.965*(1-IM))
830 FOR I=1 TO 4
840 SA(I)=P1(I)-Z1(I)*((TC(4)-273)*0.001)↑9)

```



```

850 MA(I)=E1(I)-H(I)*(((TC(4)-273)*0.001)↑9)
860 SP(I)=(-1)*9*0.001*Z1(I)*(((TC(4)-273)*0.001)↑8)
870 MP(I)=(-1)*9*0.001*H(I)*(((TC(4)-273)*0.001)↑8)
880 NEXT I
890 Q=(SA(1)*(AS*TO(1)+BS*(TO(1)↑2))+GNC*(AC*TO(1)+BC*
      TO(1)↑2))+G(1)*(AA*TO(1)+BA*(TO(1)↑2))+C)/(1-E*
      TO(1)-F*(TO(1)↑2))
900 QM0=M0*(AM*TO+BM*TO*TO):QS5=S5*(AS*TO(5)+BS*(TO(5)↑2))
910 FOR I=1 TO 4
920 C(I)=GNC*(AC*TO(I)+BC*(TO(I)↑2))
930 AI(I)=G(I)*(AA*TO(I)+BA*(TO(I)↑2))
940 GA(I)=E*Q*TO(I)+F*(TO(I)↑2)
950 S(I)=SA(I)*(AS*TO(I)+BS*(TO(I)↑2))
960 MB(I)=MA(I)*(AM*TC(I)+BM*(TC(I)↑2))
970 PO(I)=AS*TO(I)+BS*(TO(I)↑2)
980 MI(I)=AM*TC(I)+BM*(TC(I)↑2)
990 NEXT (I)
1000 C(5)=GC5*(AC*TO(5)+BC*(TO(5)↑2)):AI(5)=G(5)*(AA*TO(5)+BA*
      (TO(5)↑2))
1010 GA(5)=E*Q*TO(5)+F*Q*(TO(5)↑2)
1020 F(1)=QM0+S(2)+GA(2)+C(2)+AI(2)-MB(1)-S(1)-GA(1)-Q5L-C(1)
      -AI(1)
1030 F(2)=MB(1)+S(3)+GA(3)+C(3)+AI(3)-MB(2)-S(2)-GA(2)-AI(2)
      -Q2L-C(2)
1040 F(3)=MB(2)+S(4)+GA(4)+C(4)+AI(4)-MB(3)-S(3)-GA(3)-AI(3)
      -Q3L-C(3)
1050 F(4)=MB(5)+QS5+GA(5)+C(5)+AI(5)-MB(4)-S(4)-GA(4)-AI(4)
      -Q4L-QR-C(4)
1060 F(5)=TO(5)-TH1*SD*(TH1-TC(4))
1070 REM**** CALCUL DES DERIVEES PARTIELLES DE F(I) ET Q ****
      **** PAR RAPPORT A TO(I) ****
1080 DT(1,1)=1:DT(3,4)=(+1)*EX(4):DT(1,2)=EX(1):DT(2,1)=
      (-1)*EX(2)
1090 DT(2,2)=1-EX(1)*EX(2):DT(2,3)=EX(2):DT(3,1)=(-1)*EX(3)
      *DT(2,1)
1100 DT(3,2)=(-1)*EX(3)*DT(2,2):DT(3,3)=1-EX(3)*DT(2,3)
1110 DT(4,1)=(-1)*EX(4)*DT(3,1):DT(4,2)=(-1)*EX(4)*DT(3,2)
1120 DT(4,3)=(-1)*EX(4)*DT(3,3):DT(4,4)=1-EX(4)*DT(3,4):DT(4,5)=
      EX(4)
1130 DQ1=(SA(1)*(AS+2*BS*TO(1))+GNC*(AC+2*BC*TO(1))+G(1)*(AA+2
      *BA*TO(1))+PO(1)*SP(1)*DT(4,1)+(E+2*TO(1)*F)*Q)/(1-E*
      TO(1)-F*(TO(1)↑2))
1140 DQ1=DQ1+(((A-1)/(A-Z))*0.25*(1-NC)*DT(4,1)/(1-E*TO(1)
      -F*(TO(1)↑2))+((E+2*F*TO(1))*C)/((1-E*TO(1)-F*
      (TO(1)↑2))↑2))
1150 DG(1)=(IM*.89*DT(4,1)*.001*9*(-1)*(((TC(4)-273)*0.001)↑8))/
      (1.965*(1-IM))
1160 FOR I=2 TO 5
1170 D4(I)=(SP(1)*PO(1)*DT(4,1)+((A-1)/(A-Z))*0.25*(1-NC)*
      DT(4,1))/(1-E*TO(1)-F*(TO(1)↑2))
1180 DG(I)=(IM*.89*DT(4,1)*.001*9*(-1)*(((TC(4)-273)*0.001)↑8))
      /(1.965*(1-IM))
1190 NEXT I

```



- 1200  $O1 = (DQ1/Q) * (GA(2) - GA(1)) - Q * (E + 2 * T0(1) * F) - SA(1) * (AS + 2 * BS * T0(1)) + DT(4, 1) * (SP(2) * PO(2) - SP(1) * PO(1) - MP(1) * MT(1))$
- 1210  $O1 = O1 - MA(1) * (AM + 2 * BM * TC(1)) - GNC * (AC + 2 * BC * T0(1)) - G(1) * (AA + 2 * BA * T0(1))$
- 1220  $O2 = SA(2) * (AS + 2 * BS * T0(2)) + E * Q + 2 * F * Q * T0(2) + GNC * (AC + 2 * BC * T0(2)) + G(2) * (AA + 2 * BA * T0(2)) + (D4(2)/Q) * (GA(2) - GA(1))$
- 1230  $O2 = O2 + DT(4, 2) * (SP(2) * PO(2) - SP(1) * PO(1) - MP(1) * MT(1)) - MA(1) * DT(1, 2) * (AM + 2 * BM * TC(1))$
- 1240  $O3 = DT(4, 3) * (SP(2) * PO(2)) + (D4(3)/Q) * (GA(2) - GA(1)) + DT(4, 3) * ((-1) * SP(1) * PO(1) - MP(1) * MT(1))$
- 1250  $O4 = DT(4, 4) * (SP(2) * PO(2) - SP(1) * PO(1) - MP(1) * MT(1)) + (D4(4)/Q) * (GA(2) - GA(1))$
- 1260  $O5 = DT(4, 5) * (SP(2) * PO(2) - SP(1) * PO(1) - MP(1) * MT(1)) + (D4(5)/Q) * (GA(2) - GA(1))$
- 1270  $R1 = MA(1) * (AM + 2 * BM * TC(1)) - MA(2) * (AM + 2 * BM * TC(2)) * DT(2, 1) + (DQ1/Q) * (GA(3) - GA(2))$
- 1280  $R1 = R1 + DT(4, 1) * (MP(1) * MT(1) + SP(3) * PO(3) - MP(2) * MT(2) - SP(2) * PO(2))$
- 1290  $R2 = (-1) * MA(2) * DT(2, 2) * (AM + 2 * BM * TC(2)) - SA(2) * (AS + 2 * BS * T0(2)) + MA(1) * DT(1, 2) * (AM + 2 * BM * TC(1)) - E * Q - 2 * F * Q * T0(2) - GNC * (AC + 2 * BC * T0(2))$
- 1300  $R2 = R2 - G(2) * (AA + 2 * BA * T0(2)) + (D4(2)/Q) * (GA(3) - GA(2)) + DT(4, 2) * (MP(1) * MT(1) + SP(3) * PO(3) - MP(2) * MT(2) - SP(2) * PO(2))$
- 1310  $R3 = SA(3) * (AS + 2 * BS * T0(3) + E * Q + 2 * F * Q * T0(3)) + GNC * (AC + 2 * BC * T0(3)) + G(3) * (AA + 2 * BA * T0(3)) - MA(2) * DT(2, 3) * (AM + 2 * BM * TC(2))$
- 1320  $R3 = R3 + (D4(3)/Q) * (GA(3) - GA(2)) + DT(4, 3) * (MP(1) * MT(1) + SP(3) * PO(3) - MP(2) * MT(2) - SP(2) * PO(2))$
- 1330  $R4 = DT(4, 4) * (MP(1) * MT(1) - MP(2) * MT(2) - SP(2) * PO(2) + SP(3) * PO(3)) + (D4(4)/Q) * (GA(3) - GA(2))$
- 1340  $R5 = DT(4, 5) * (MP(1) * MT(1) + SP(3) * PO(3) - MP(2) * MT(2) - SP(2) * PO(2)) + (D4(5)/Q) * (GA(3) - GA(2))$
- 1350  $W1 = (DQ1/Q) * (GA(4) - GA(3)) - MA(3) * DT(3, 1) * (AM + 2 * BM * TC(3)) + (MA(2) * DT(2, 1) * (AM + 2 * BM * TC(2)))$
- 1360  $W1 = W1 + DT(4, 1) * (MP(3) * MT(3) * (-1) + MP(2) * MT(2) + SP(4) * PO(4) - SP(3) * PO(3))$
- 1370  $W2 = MA(2) * DT(2, 2) * (AM + 2 * BM * TC(2)) + (D4(2)/Q) * (GA(4) - GA(3)) - MA(3) * DT(3, 2) * (AM + 2 * BM * TC(3))$
- 1380  $W2 = W2 + DT(4, 2) * (SP(4) * PO(4) + MP(2) * MT(2) - MP(3) * MT(3) - SP(3) * PO(3))$
- 1390  $W3 = (-1) * MA(3) * DT(3, 3) * (AM + 2 * BM * TC(3)) - SA(3) * (AS + 2 * BS * T0(3)) + MA(2) * DT(2, 3) * (AM + 2 * BM * TC(2)) + (D4(3)/Q) * (GA(4) - GA(3)) - E * Q - 2 * F * Q * T0(3)$
- 1400  $W3 = W3 - GNC * (AC + 2 * BC * T0(3)) - G(3) * (AA + 2 * BA * T0(3)) + DT(4, 3) * (MP(2) * MT(2) + SP(4) * PO(4) - MP(3) * MT(3) - SP(3) * PO(3))$
- 1410  $W4 = SA(4) * (AS + 2 * BS * T0(4) + E * Q + 2 * F * Q * T0(4)) + (D4(4)/Q) * (GA(4) - GA(3)) + GNC * (AC + 2 * BC * T0(4)) + G(4) * (AA + 2 * BA * T0(4))$
- 1420  $W4 = W4 - MA(3) * DT(3, 4) * (AM + 2 * BM * TC(3)) + DT(4, 4) * (MP(2) * MT(2) + SP(4) * PO(4) - MP(3) * MT(3) - SP(3) * PO(3))$
- 1430  $W5 = DT(4, 5) * (MP(2) * MT(2) + SP(4) * PO(4) - MP(3) * MT(3) - SP(3) * PO(3)) + (D4(5)/Q) * (GA(4) - GA(3))$
- 1440  $U1 = (DQ1/Q) * (GA(5) - GA(4)) + DG(1) * (AC * T0(5) + BC * (T0(5) + 2)) - MA(4) * DT(4, 1) * (AM + 2 * BM * TC(4)) + MA(3) * DT(3, 1) * (AM + 2 * BM * TC(3))$



```

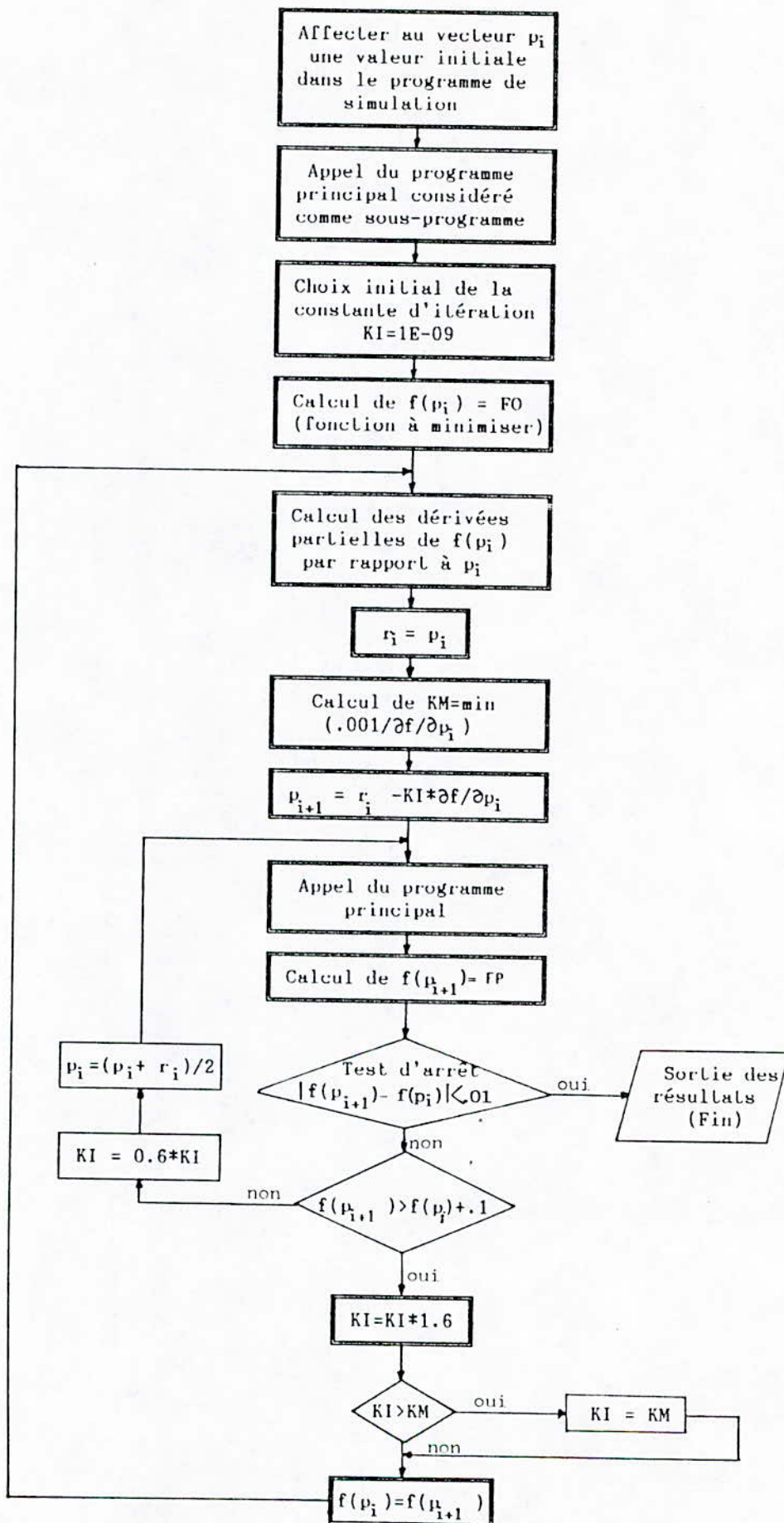
1450 U1=U1+DT(4,1)*(MP(3)*MT(3)-MP(4)*MT(4)-SP(4)*PO(4))-
      (9*0.001*.89*4.1868*DT(4,1)*(((TC(4)-273)*0.001)†8))
      *(422-0.208*T0(4))
1460 U2=MA(3)*DT(3,2)*(AM+2*BM*TC(3))-MA(4)*DT(4,2)*(AM+2*BM*
      TC(4))+(D4(2)/Q)*(GA(5)-GA(4))+DG(2)*(AC*T0(5)+BC*
      (T0(5)†2))
1470 U2=U2+DT(4,2)*(MP(3)*MT(3)-MP(4)*MT(4)-SP(4)*PO(4))-
      (9*0.001*.89*4.1868*DT(4,2)*(((TC(4)-273)*0.001)†8))
      *(422-0.208*T0(4))
1480 U3=MA(3)*DT(3,3)*(AM+2*BM*TC(3))-MA(4)*DT(4,3)*(AM+2*BM*
      TC(4))+(D4(3)/Q)*(GA(5)-GA(4))+DG(3)*(AC*T0(5)+BC*
      (T0(5)†2))
1490 U3=U3+DT(4,3)*(MP(3)*MT(3)-MP(4)*MT(4)-SP(4)*PO(4))-
      (9*0.001*.89*4.1868*DT(4,3)*(((TC(4)-273)*0.001)†8))*
      (422-0.208*T0(4))
1500 U4=(D4(4)/Q)*(GA(5)-GA(4))+DG(4)*(AC*T0(5)+BC*(T0(5)†2))-
      MA(4)*DT(4,4)*(AM+2*BM*TC(4))+MA(3)*DT(3,4)*(AM+2*BM*
      TC(3))
1510 U4=U4-SA(4)*(AS+2*BS*T0(4))-E*Q-2*F*Q*T0(4)-
      GNC*(AC+2*BC*T0(4))-G(4)*(AA+2*BA*T0(4))+0.208*4.1868*
      0.89*(((TC(4)-273)*0.001)†9)
1520 U4=U4-(422-0.208*T0(4))*9*4.1868*0.89*DT(4,4)*0.001*(((TC
      (4)-273)*0.001)†8)+DT(4,4)*(MP(3)*MT(3)-MP(4)*MT(4)-
      SP(4)*PO(4))
1530 U5=(-1)*MA(4)*DT(4,5)*(AM+2*BM*TC(4))+S5*(AS+2*BS*T0(5))+
      G(5)*(AA+2*BA*T0(5))+(D4(5)/Q)*(GA(5)-GA(4))+E*Q+2*F*
      Q*T0(5)
1540 U5=U5+DG(5)*(AC*T0(5)+BC*(T0(5)†2))+GC5*(AC+2*BC*T0(5))-
      (422-0.208*T0(4))*9*4.1868*.89*DT(4,5)*0.001*(((TC(4)-
      273)*0.001)†8)
1560 U5=U5+DT(4,5)*(MP(3)*MT(3)-MP(4)*MT(4)-SP(4)*PO(4))
1570 K1R=(-1)*SD*DT(4,1):K2R=(-1)*SD*DT(4,2)
1580 K3R=(-1)*SD*DT(4,3):K4R=(-1)*SD*DT(4,4)
1590 K5R=(-1)*SD*DT(4,5)
1600 A(1,1,1)=O1:A(1,1,2)=O2:A(1,1,3)=O3:A(1,1,4)=O4:A(1,1,5)=O5
1610 A(1,2,1)=R1:A(1,2,2)=R2:A(1,2,3)=R3:A(1,2,4)=R4:A(1,2,5)=R5
1620 A(1,3,1)=W1:A(1,3,2)=W2:A(1,3,3)=W3:A(1,3,4)=W4:A(1,3,5)=W5
1630 A(1,4,1)=U1:A(1,4,2)=U2:A(1,4,3)=U3:A(1,4,4)=U4:A(1,4,5)=U5
1640 A(1,5,1)=K1R:A(1,5,2)=K2R:(A(1,5,3)=K3R:A(1,5,4)=K4R:
      A(1,5,5)=K5R
1650 B(1)=O1*T0(1)+O2*T0(2)+O3*T0(3)+O4*T0(4)+O5*T0(5)-F(1)
1660 B(2)=R1*T0(1)+R2*T0(2)+R3*T0(3)+R4*T0(4)+R5*T0(5)-F(2)
1670 B(3)=W1*T0(1)+W2*T0(2)+W3*T0(3)+W4*T0(4)+W5*T0(5)-F(3)
1680 B(4)=U1*T0(1)+U2*T0(2)+U3*T0(3)+U4*T0(4)+U5*T0(5)-F(4)
1690 B(5)=K1R*T0(1)+K2R*T0(2)+K3R*T0(3)+K4R*T0(4)+K5R*T0(5)-F(5)
1700 REM**** RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATION ****
1710 FOR I = 1 TO 5
1720 A(1,I,6)=B(I)
1730 NEXT I
1740 FOR K=0 TO 4
1750 N=K+1
1760 I=K+1
1770 FOR J=K+1 TO 6
1780 A(N+1,I,J)=A(N,I,J)/A(N,I,K+1)

```

```
1790 NEXT J
1800 FOR I=1 TO 5
1810 IF I=K+1 THEN GOTO 1850
1820 FOR J=K+1 TO 6
1830 A(N+1,I,J)=A(N,I,J)-A(N,I,K+1)*A(N+1,K+1,J)
1840 NEXT J
1850 NEXT I
1860 NEXT K
1870 T(1)=A(6,1,6):T(2)=A(6,2,6):T(3)=A(6,3,6):T(4)=A(6,4,6):
T(5)=A(6,5,6)
1880 IF ABS(T(1)-T0(1))>.001 OR ABS(T(2)-T0(2))>.001 OR
ABS(T(3)-T0(3))>.001 OR ABS(T(4)-T0(4))>.001 OR
ABS(T(5)-T0(5))>.01 THEN T0(1)=T(1):T0(2)=T(2):T0(3)=T(3):
T0(4)=T(4):T0(5)=T(5):GOTO 690
1890 REM **** SORTIE DES RESULTATS ****
1900 PRINT "LA QUANTITE DE POUSSIERES A LA SORTIE DU CYCLONE 1
EST (KG/KG de CL.):";SA(1)
1910 PRINT "LE DEGRE DE CALCINATION EST(%):";PSI*100
1920 FOR I=1 TO 4
1930 PRINT "LA TEMPERATURE DU GAZ A LA SORTIE DU CYCLONE";I;"
EST (°C):";T(I)-273
1940 PRINT "LA TEMPERATURE DE LA MATIERE A LA SORTIE DU
CYCLONE";I;"EST (°C):";TC(I)-273
1950 NEXT I
1960 PRINT "LA TEMPERATURE DU GAZ A LA SORTIE DU FOUR EST
(°C):";T(5)-273
1970 PRINT "LE TEMPERATURE DU CLINKER DANS LA ZONE DE CUISSON
EST (°C):";TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))-273
1980 PRINT "LA CONSOMMATION D'ENERGIE SPECIFIQUE DE
L'INSTALLATION DE CUISSON EST (KCAL/KG de CL.):";
Q/4.1855
1990 INPUT "VOULEZ-VOUS RECOMMENCER?";A$
2000 IF A$<>"O" THEN GOTO 2020
2010 GOTO 190
2020 END
```



A N N E X E B



Organigramme simplifié de l'identification paramétrique.



PROGRAMME D'IDENTIFICATION

---

```

3000  REM *****
          ***** PROGRAMME D'IDENTIFICATION *****
          *****

3010  DIM CA(14): DIM V(2): DIM X(2): DIM Y(2): DIM Z(2):
      DIM R(14)
3020  REM ***APPEL DU PROGRAMME PRINCIPAL DE SIMULATION***
3030  GOSUB 5
3040  TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
3050  FO=((T(1)-593)↑2)+((T(3)-948)↑2)+((T(5)-1463)↑2)+
      ((TF-1723)↑2)
3060  KI=1E-09
3070  PRINT "FO=";FO
3080  A0=T(1):A1=T(3):A2=T(5):A3=TF
3090  REM ****          CALCUL DES DERIVEES AUX MOYENS          ****
          ****          DES DIFFERENCES FINIES CENTREES          ****
3100  FOR IT=1 TO 14
3110  P(IT)=P(IT)+.001
3120  GOSUB 410
3130  TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
3140  Y(1)=T(1):X(1)=T(3):Z(1)=T(5):V(1)=TF
3150  P(IT)=P(IT)-.002
3160  GOSUB 410
3170  TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
3180  Y(2)=T(1):X(2)=T(3):Z(2)=T(5):V(2)=TF
3190  CA(IT)=2*(A0-593)*((Y(1)-Y(2))/ .002)+2*(A1-948)*((X(1)
      -X(2))/ .002)+2*(A2-1463)*((Z(1)-Z(2))/ .002)+2*
      (A3-1723)*((V(1)-V(2))/ .002)
3200  P(IT)=P(IT)+.001
3210  R(IT)=P(IT)
3220  NEXT IT
3230  REM ****          CALCUL DE LA CONSTANTE D'ITERATION KM          ****
3240  KM=ABS(.001/CA(1))
3250  FOR J=2 TO 14
3260  IF ABS(.001/CA(J))>KM THEN GOTO 3280
3270  KM=ABS(.001/CA(J))
3280  NEXT J
3290  PRINT "LA CONSTANTE D'ITERATION KI EST :";KI
3200  REM ****          CALCUL DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION          ****
3310  FOR K=1 TO 14
3320  P(K)=R(K)-KI*CA(K)
3330  PRINT "P(";K;"):";P(K),
3340  NEXT K
3350  GOSUB 410
3360  TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
3370  INPUT "VOULEZ-VOUS CONTINUER ? ";A$

```

```
3380 IF A$<>"0" THEN STOP
3390 REM ****          CALCUL DU CRITERE A MINIMISER          ****
3400 FP=((T(1)-593)↑2)+((T(3)-948)↑2)+((T(5)-1463)↑2)+
      ((TF-1723)↑2)
3410 PRINT "LA VALEUR DU CRITERE EST : ";FP
3420 IF ABS(FP-FO)<.01 THEN STOP
3430 IF FP>FO+.1 THEN KI=0.6*KI:GOTO 3450
3440 GOTO 3500
3450 FOR I=1 TO 14
3460 P(I)=(P(I)+R(I))/2
3470 PRINT "P(";I;"):";P(I),
3480 NEXT I
3490 GOTO 3350
3500 KI=KI*1.6
3510 IF KI>KM THEN KI=KM
3520 FO=FP
3530 GOTO 3080
3540 END
```



n	$\kappa(10^{-10})$	$P(1) = \frac{1}{1000}$	$P(2) = \eta_2$	$P(3) = \eta_3$	$P(4) = \eta_4$	$P(5) = \eta_5$	$P(6) = \eta_6$	$P(7) = \eta_7$	$P(8) = \eta_8$	$P(9) = \eta_9$	$P(10) = \eta_{10}$	$P(11) = \eta_{11}$	$P(12) = \frac{h}{1000}$	$P(13) = d$	$P(14) = p$	$t(1) = t_1$	$t(3) = t_3$	$t(5) = t_5$	$t_f = t_c$	$t(r_1)$
0	10	0,623	0,85	0,80	0,70	0,18	0,18	0,18	0,18	0,25	0,98	0,06	0,60	0,53	0,52	311,448353	669,264022	1163,73777	1418,30684	1800,19826
1	10	0,617602271	0,150256182	0,800384525	0,699833245	0,179680907	0,179715228	0,179604267	0,180383616	0,253386006	0,980519997	0,062676715	0,598446737	0,534586968	0,525218122	322,373865	685,10213	1179,42829	1429,03634	658,923734
2	1,91639803	0,616605546	0,150303093	0,800455549	0,69979934	0,179625315	0,179663066	0,179530648	0,180460097	0,253995554	0,980610554	0,063167776	0,598117395	0,535433326	0,52618073	324,377056	687,964575	1182,24193	1430,96416	609,790898
3	1,92253012	0,615612242	0,850349725	0,800526321	0,699764998	0,17957854	0,179611161	0,179457188	0,180537348	0,254600073	0,980699781	0,063656441	0,597848075	0,536276538	0,527139778	326,379497	690,816847	1185,05696	609,153693	654,777838
4	1,16129366	0,615115477	0,850373027	0,800561712	0,69974755	0,179547435	0,179585241	0,179420403	0,180576486	0,25490092	0,980743875	0,063900460	0,597714665	0,53669815	0,527619274	327,37517	692,22847	1186,43895	1433,80512	626,171161
5	1,16129366	0,615115477	0,850373027	0,800561712	0,69974755	0,179547435	0,179585241	0,179420403	0,180576486	0,25490092	0,980743875	0,063900460	0,597714665	0,53669815	0,527619274	327,37517	692,22847	1186,43895	1433,80512	626,171161
6	0,696776198	0,61536386	0,850361376	0,800544016	0,699756277	0,179562988	0,179598201	0,179438795	0,18056917	0,2547505	0,98072182	0,063778450	0,59778137	0,536487344	0,527379566	326,87558	691,52255	1185,74837	1433,33188	616,168109
7	0,418065719	0,615488051	0,85035555	0,800535169	0,699760638	0,179570764	0,179604681	0,179447992	0,180547133	0,254675286	0,980710800	0,063717446	0,597814729	0,536381941	0,527259652	326,62633	691,169402	1185,40267	1433,09502	612,274676
8	0,250839431	0,615550146	0,850352638	0,800530745	0,699762818	0,179574652	0,179607921	0,17945259	0,18054224	0,25463768	0,980705293	0,063686943	0,597831399	0,536329239	0,527199715	326,501764	690,992825	1185,22976	1432,97644	610,596846
9	0,150503659	0,615581194	0,850351181	0,800528533	0,699763908	0,179576596	0,179609541	0,17945489	0,18053979	0,254618876	0,980702537	0,063671692	0,597839737	0,536302888	0,527169746	326,439446	690,904473	1185,14325	1432,91716	609,828618
10	0,0903021954	0,615596718	0,850350453	0,800527427	0,699764453	0,179577568	0,179610351	0,179456038	0,180538578	0,254609475	0,980701159	0,0636640667	0,597843906	0,536289713	0,527154762	326,408273	690,860274	1185,09997	1432,88754	609,462908
11	0,054181317	0,61560448	0,850350089	0,800526874	0,699764726	0,179578054	0,17961056	0,179456613	0,18053796	0,254604774	0,98070047	0,063660253	0,597845991	0,536283125	0,52714727	326,392723	690,838223	1185,07836	1432,87268	609,281478
12	0,032508790	0,615608361	0,850349907	0,800526598	0,699764862	0,179578297	0,179610959	0,179456901	0,180537654	0,254602423	0,980700125	0,063658347	0,597847033	0,536279831	0,527143524	326,384901	690,827134	1185,06752	1432,8653	609,195249
13	0,052014064	0,6155811661	0,850351159	0,8005285	0,699763924	0,17957684	0,179609567	0,179454924	0,180539758	0,254618592	0,980702495	0,0636714626	0,597839863	0,536302491	0,527169296	326,438447	690,903128	1185,14194	1432,91626	609,81601
14	0,0312084384	0,615595011	0,850350533	0,800527549	0,699764393	0,179577569	0,179610263	0,179455912	0,180538706	0,254610508	0,98070131	0,063664905	0,597843448	0,536291161	0,52715641	326,411666	690,865122	1185,10473	1432,89079	609,501982
15	0,018925063	0,615601689	0,85035022	0,800527079	0,699764627	0,17957793	0,179610611	0,179456407	0,18053818	0,254606465	0,980700718	0,063661626	0,59784524	0,536285496	0,527149996	326,398313	690,846166	1185,08615	1432,87802	609,345587
16	0,012350378	0,615605023	0,850350063	0,800526836	0,699764744	0,179578115	0,179610785	0,179456654	0,180537917	0,254604444	0,980700421	0,063859986	0,597846136	0,536282663	0,527146745	326,391595	690,836635	1185,07683	1432,87167	609,271023

Tableau B.1 : Résultats de l'Identification Paramétrique.



WF <sub>1</sub> (kg/h)	S <sub>1</sub> (g)	φ (x)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	T <sub>5</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	q (kcal/ kg cl.)
			T' <sub>1</sub> (°C)	T' <sub>2</sub> (°C)	T' <sub>3</sub> (°C)	T' <sub>4</sub> (°C)			
70000	39,090	59,018	409,16	593,59	788,65	969,55	1262,97	1497,32	863,190
			308,92	548,02	765,92	955,38			
72000	39,092	54,155	398,30	581,09	776,81	960,57	1254,20	1490,20	849,660
			300,36	535,83	753,89	946,30			
74000	39,093	49,698	387,94	569,06	765,26	951,66	1245,48	1483,08	837,171
			292,22	524,12	742,20	937,31			
76000	39,095	45,602	378,05	557,44	753,98	942,83	1236,80	1475,95	825,591
			284,47	512,84	730,79	928,39			
78000	39,097	41,837	368,57	546,21	742,95	934,04	1228,14	1468,82	814,821
			277,07	501,97	719,66	919,55			
80000	39,098	38,362	359,49	535,34	732,16	925,30	1219,51	1461,66	804,758
			269,98	491,43	708,75	910,73			
82000	39,099	35,165	350,75	524,79	721,56	916,59	1210,89	1454,50	795,349
			263,20	481,25	698,09	901,97			
84000	39,100	32,215	342,34	514,53	711,15	907,90	1202,28	1447,31	786,513
			256,68	471,37	687,62	893,23			
86000	39,101	29,489	334,23	504,56	700,92	899,23	1193,68	1440,10	778,195
			250,40	461,77	677,32	884,50			
88000	39,102	26,978	326,39	494,85	690,84	890,56	1185,08	1432,87	770,358
			244,36	452,44	667,21	875,79			
90000	39,103	24,658	318,81	485,37	680,91	881,90	1176,48	1425,61	762,947
			238,52	443,35	657,25	867,07			
92000	39,104	22,518	311,48	476,12	671,11	873,23	1167,87	1418,33	755,933
			232,89	434,49	647,44	858,39			
94000	39,105	20,546	304,36	467,08	661,44	864,56	1159,25	1411,03	749,281
			227,45	425,85	637,78	849,69			
96000	39,105	18,727	297,46	458,24	651,89	855,88	1150,63	1403,69	742,960
			222,18	417,42	628,25	840,98			
98000	39,106	17,054	290,75	449,58	642,46	847,19	1141,99	1396,34	736,945
			217,07	409,19	618,85	832,78			
100000	39,107	15,512	284,24	441,11	633,13	838,49	1133,35	1388,95	731,218
			212,12	401,13	609,55	823,56			

Tableau B.3 : Effet du débit de farine de la température, le degré de calcination et la consommation d'énergie spécifique avec  $deb=185000 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $V_p=1,3 \text{ tours/mn}$



$V_r$ (tours/min)	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_6$ (°C)	$Q$ (kcal/kg cl.)
			$T_1'$ (°C)	$T_2'$ (°C)	$T_3'$ (°C)	$T_4'$ (°C)			
0,90	39,105	20,723	314,68	478,05	669,12	864,62	1141,44	1447,11	764,057
			235,75	436,89	646,06	850,50			
0,95	39,104	21,592	316,47	480,62	672,45	868,60	1147,98	1445,07	765,019
			237,06	439,27	649,31	854,39			
1	39,104	22,433	318,15	483,03	675,57	872,33	1154,11	1443,11	765,920
			238,30	441,50	652,34	858,02			
1,05	39,104	23,247	319,72	485,29	678,49	875,82	1159,98	1441,24	766,767
			239,45	443,59	655,89	861,43			
1,10	39,103	24,035	321,21	487,42	681,25	879,11	1165,51	1439,44	767,561
			240,54	445,55	657,86	864,63			
1,15	39,103	24,802	322,61	489,43	683,84	882,21	1170,76	1437,70	768,315
			241,57	447,42	660,39	867,65			
1,20	39,103	25,547	323,94	491,33	686,30	885,14	1175,75	1436,04	769,031
			242,55	449,18	662,78	870,51			
1,25	39,103	26,272	325,19	493,13	688,62	887,92	1180,52	1434,43	769,710
			243,47	450,85	665,05	873,22			
1,30	39,102	26,978	326,39	494,85	690,84	890,56	1185,08	1432,87	770,358
			244,36	452,44	667,21	875,79			
1,35	39,102	27,666	327,53	496,48	692,94	893,07	1189,44	1431,37	770,976
			245,20	453,96	669,27	878,25			
1,40	39,102	28,334	328,62	498,04	694,95	895,47	1193,63	1429,91	771,563
			246	455,40	671,23	880,58			
1,45	39,102	28,987	329,66	499,52	696,87	897,76	1197,65	1428,50	772,127
			246,77	456,78	673,10	882,81			
1,50	39,101	29,623	330,66	500,95	698,71	899,95	1201,51	1427,13	772,665
			247,50	458,10	674,89	884,94			
1,55	39,101	30,243	331,62	502,32	700,47	902,06	1205,24	1425,79	773,179
			248,20	459,36	676,60	886,98			
1,60	39,101	30,849	332,54	503,63	702,17	904,08	1208,84	1424,50	773,675
			248,88	460,57	678,24	888,94			
1,65	39,101	31,446	333,42	504,89	703,79	906,01	1212,30	1423,24	774,158
			249,53	461,75	679,84	890,83			
1,70	39,100	32,027	334,27	506,11	705,35	907,88	1215,66	1422,02	774,619
			250,16	462,88	681,36	892,65			

Tableau B.4 : Effet de la vitesse de rotation du four sur la température, le degré de calcination et la consommation d'énergie spécifique avec  $WF_1 = 88000$  kg/h et  $deb = 185000$  m<sup>3</sup>/h.

$\eta_1$	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	$q$ (kcal   kg cl.)
			$T_1'$ (°C)	$T_2'$ (°C)	$T_3'$ (°C)	$T_4'$ (°C)			
0,75	662,354	22,277	210,18	433,86	654,40	872,89	1172,81	1425,55	802,181
			139,39	384,95	628,09	857,36			
0,80	406,761	23,275	236,20	447,43	662,52	876,90	1175,59	1427,21	795,354
			162,91	399,98	636,81	861,54			
0,85	350,651	24,284	261,73	460,79	670,51	880,81	1178,30	1428,83	788,492
			185,98	414,78	645,39	865,62			
0,90	220,778	25,306	286,80	473,96	678,37	884,61	1180,94	1430,41	781,592
			208,63	429,35	653,83	869,59			
0,95	104,578	26,336	311,45	486,95	686,13	888,32	1183,52	1431,94	774,643
			230,87	443,71	662,15	873,45			
1,00	0	27,382	335,71	499,78	693,78	891,95	1186,04	1433,45	767,651
			252,76	457,89	670,37	877,24			

$\eta_2$	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	$q$ (kcal   kg cl.)
			$T_1'$ (°C)	$T_2'$ (°C)	$T_3'$ (°C)	$T_4'$ (°C)			
0,60	60,339	24,254	349,85	451,81	670,27	880,69	1178,22	1428,78	788,695
			275,76	414,34	645,13	865,50			
0,65	54,790	24,803	345,67	460,65	674,53	882,76	1179,66	1429,64	784,978
			269,94	422,23	649,71	867,65			
0,70	50,034	25,348	341,20	469,34	678,70	884,77	1181,05	1430,47	781,301
			263,87	429,95	654,18	869,75			
0,75	45,912	25,890	336,49	477,91	682,79	886,73	1182,42	1431,28	777,651
			257,58	437,53	658,58	871,80			
0,80	42,305	26,432	331,56	486,39	686,82	888,65	1183,75	1432,08	774,015
			251,09	445,01	662,91	873,81			
0,85	39,123	26,973	326,43	494,79	690,81	890,55	1185,07	1432,86	770,382
			244,40	452,38	667,18	875,78			



$\eta_3$	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	$q$ (kcal / kg cl.)
			$T'_1$ (°C)	$T'_2$ (°C)	$T'_3$ (°C)	$T'_4$ (°C)			
0,60	42,580	23,885	360,31	524,68	663,16	879,29	1177,25	1428,20	791,185
			272,77	487,60	642,03	864,03			
0,65	41,512	24,681	351,76	518,12	670,42	882,31	1179,35	1429,45	785,788
			265,43	479,65	648,70	867,18			
0,70	40,596	25,457	343,29	510,96	677,41	885,17	1181,33	1430,64	780,550
			258,29	471,14	655,08	870,17			
0,75	39,803	26,221	334,88	503,21	684,17	887,90	1183,23	1431,77	775,438
			251,31	462,11	661,22	873,03			
0,80	39,109	26,971	326,48	494,93	690,76	890,53	1185,06	1432,86	770,413
			244,43	452,55	667,16	875,77			
0,85	38,497	27,711	318,06	486,14	697,22	893,07	1186,82	1433,91	765,452
			237,63	442,48	672,92	878,40			

$\eta_4$	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	$q$ (kcal / kg cl.)
			$T'_1$ (°C)	$T'_2$ (°C)	$T'_3$ (°C)	$T'_4$ (°C)			
0,60	39,487	25,312	345,06	519,27	711,89	883,62	1180,97	1430,42	781,362
			258,52	476,20	689,91	869,61			
0,65	39,279	26,168	335,50	506,86	701,48	887,22	1183,11	1431,70	775,685
			251,25	464,09	678,66	872,83			
0,70	39,102	26,981	326,35	494,79	690,79	890,57	1185,09	1432,87	770,332
			244,32	452,38	667,15	875,80			
0,75	38,947	27,756	317,56	483,02	679,85	893,72	1186,92	1433,97	765,252
			237,69	441,02	655,44	878,56			
0,80	38,813	28,502	309,05	471,50	668,70	896,69	1188,64	1435,00	760,411
			231,32	429,97	643,54	881,16			
0,85	38,694	29,217	300,80	460,21	657,36	899,51	1190,26	1435,97	755,768
			225,16	419,17	631,47	883,59			
0,90	38,588	29,909	292,78	449,11	645,84	902,21	1191,79	1436,88	751,303
			219,18	408,50	619,23	885,89			

Tableaux B.5 : Effet du degré de séparation sur la température, le degré de calcination et la consommation d'énergie spécifique avec  $W_1 = 80000$  kg/h,  $deb = 185000$  m<sup>3</sup>/h et  $V_F = 1,3$  tours/mn.

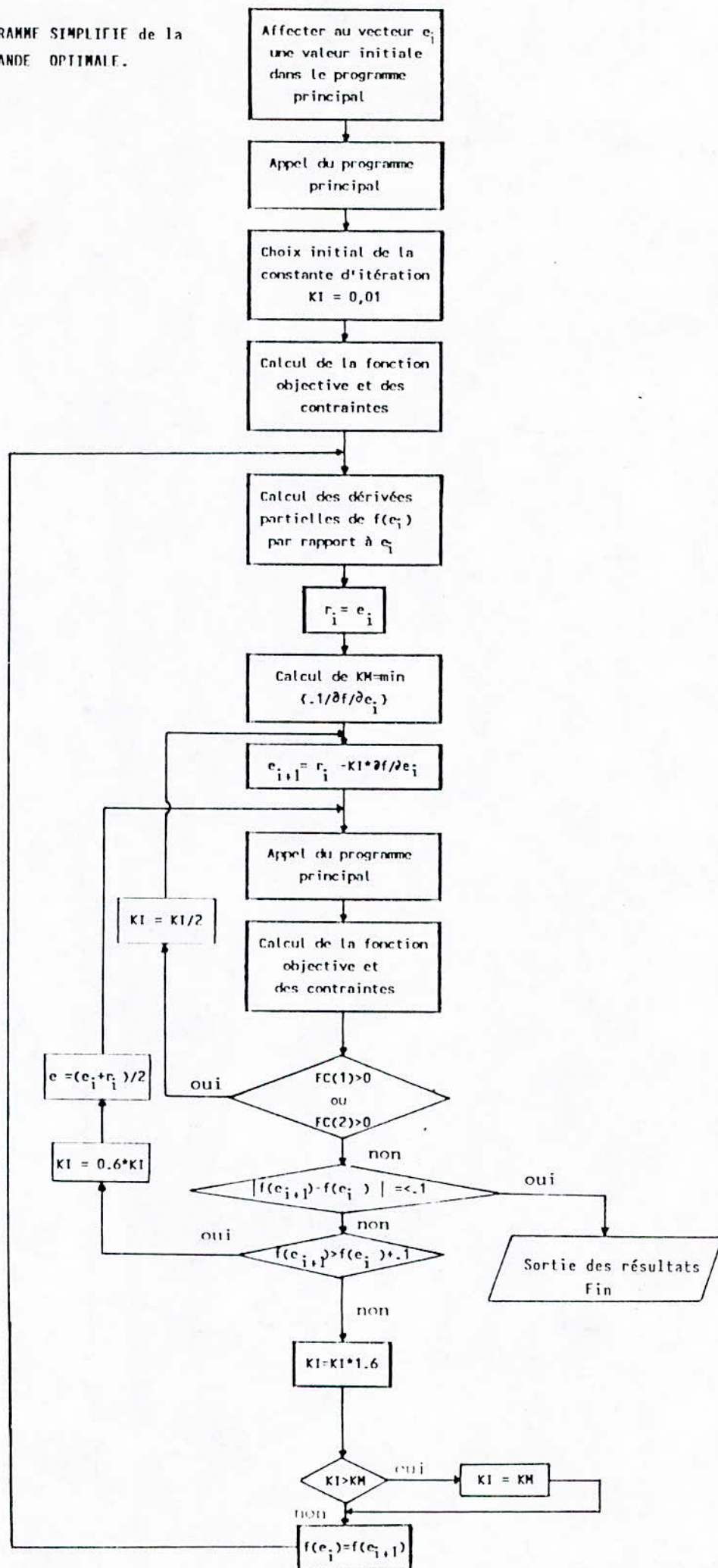
$G_1^A$ (m <sup>3</sup> kg cl.)	$S_1$ (g)	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$T_5$ (°C)	$T_c$ (°C)	$q$ (kcal kg cl.)
			$T_1'$ (°C)	$T_2'$ (°C)	$T_3'$ (°C)	$T_4'$ (°C)			
0	39,101	29,612	385,30	526,17	709,50	899,28	1191,14	1436,49	752,858
			297,48	487,03	687,27	884,91			
0,05	39,102	28,808	367,71	516,78	703,91	896,69	1189,34	1435,42	758,187
			281,63	476,68	681,27	882,21			
0,10	39,102	28,062	351,08	507,93	698,64	894,23	1187,63	1434,40	763,143
			266,63	466,91	675,60	879,63			
0,15	39,102	27,364	335,33	499,58	693,66	891,89	1186,00	1433,42	767,76
			252,41	457,66	670,24	877,18			
0,20	39,102	26,718	320,38	491,67	688,94	889,66	1184,45	1432,50	772,087
			238,93	448,92	665,17	874,85			
0,25	39,103	26,112	306,18	484,17	684,47	887,53	1182,97	1431,61	776,142
			226,11	440,63	660,36	872,63			
0,30	39,103	25,546	292,66	477,04	680,22	885,50	1181,56	1430,77	779,952
			213,91	432,75	655,80	870,50			
0,35	39,103	25,014	279,78	470,27	676,17	883,55	1180,21	1429,96	783,538
			202,27	425,25	651,45	868,47			
0,40	39,103	24,516	267,48	463,81	672,31	881,68	1178,91	1429,19	786,923
			191,18	418,12	647,32	866,53			
0,45	39,103	24,045	255,74	457,65	668,63	879,89	1177,67	1428,45	790,117
			180,57	411,30	643,37	864,66			
0,50	39,104	23,600	244,51	451,17	665,12	878,17	1176,48	1427,74	793,139
			170,42	404,79	639,60	862,87			
0,55	39,104	23,180	233,75	446,16	661,76	876,52	1175,33	1427,05	796,003
			160,70	398,57	635,99	861,15			
0,60	39,104	22,782	223,44	440,78	658,54	874,94	1174,23	1426,40	798,722
			151,38	392,61	632,54	859,50			

Tableau B.6 : Effet de l'infiltration d'air faux dans le cyclone 1 sur la température, le degré de calcination et la consommation d'énergie spécifique avec  $W_{f1} = 88000$  kg/h,  $deb = 185000$  m<sup>3</sup>/h et  $V_r = 1,3$  tours/min.



ANNEXE C

ORGANIGRAMME SIMPLIFIÉ de la  
COMMANDE OPTIMALE.





## PROGRAMME de la COMMANDE OPTIMALE

```

5000  REM *****
      ****          PROGRAMME DE LA COMMANDE          ****
      ****          OPTIMALE                          ****
      *****

5010  DIM R(3): DIM CA(3): DIM FC(2)

5020  REM ***APPEL DU PROGRAMME PRINCIPAL de SIMULATION***
5030  GOSUB 5
5040  TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
5050  FO=(Q/4.1855)+(100/PSI)
5060  KI=0.01
5070  FC(1)=TF-1733:FC(2)=1703-TF
5080  PRINT "FO-";FO
5090  REM ****          CALCUL DES DERIVEES AUX MOYENS          ****
      ****          DES DIFFERENCES FINIES CENTREES          ****

5100  FOR IT=1 TO 3
5110  E(IT)=E(IT)+0.1
5120  GOSUB 240
5130  MD=(Q/4.1855)+(100/PSI)
5140  E(IT)=E(IT)-0.2
5150  GOSUB 240
5160  DM=(Q/4.1855)+(100/PSI)
5170  CA(IT)=(MD-DM)/.2
5180  E(IT)=E(IT)+0.1
5190  R(IT)=E(IT)
5200  NEXT IT
5210  REM ****          CALCUL DE LA CONSTANTE D'ITERATION KM          ****
5220  KM=ABS(.1/CA(1))
5230  FOR J=2 TO 3
5240  IF ABS(.1/CA(J))>KM THEN GOTO 5260
5250  KM=ABS(.1/CA(J))
5260  NEXT J
5270  PRINT "LA CONSTANTE D'ITERATION KI EST:" ; KI
5280  REM ****          CALCUL DES GRANDEURS DE COMMANDE          ****
5290  FOR K=1 TO 3
5300  E(K)=R(K)-KI*CA(K)
5310  PRINT "E(";K;")-";E(K),
5320  NEXT K
5330  GOSUB 240 : TF=TH1-((A-1)/(A-Z))*(TH1-TC(4))
5340  INPUT "VOULEZ-VOUS CONTINUER?"; A$
5350  IF A$<>"O" THEN STOP
5360  REM ****          CALCUL DU CRITERE A MINIMISER ET          ****
      ****          DES CONTRAINTES                          ****
5370  FP=(Q/4.1855)+(100/PSI):FC(1)=TF-1733:FC(2)=1703-TF
5380  PRINT "LA VALEUR DU CRITERE EST:"; FP

```

```
5390 PRINT "LES CONTRAINTES SONT:";"TF-1733=";FC(1),  
      "1703-TF=";FC(2)  
5400 IF FC(1) >0 OR FC(2)>0 THEN KI=KI/2:GOTO 5270  
5410 IF ABS(FP-FO)<.01 THEN STOP  
5420 IF FP>FO+.1 THEN KI=KI*0.6:GOTO 5440  
5430 GOTO 5490  
5440 FOR I=1 TO 3  
5450 E(I)=(E(I)+R(I))/2  
5460 PRINT "E(";I;")=";E(I)  
5470 NEXT I  
5480 GOTO 5330  
5490 KI=KI*1.6  
5500 IF KI>KM THEN KI=KM  
5510 FO=FP  
5520 GOTO 5090  
5530 END
```

Dans le programme principal de simulation :

1. Eliminer les lignes : 190, 200, 210, 220, 240
2. Ajouter les lignes suivantes :

```
190 E(1) = 130 :E(2)=185 :E(3)=106.5
```

```
240 VIT= E(1)/100 : DEB=E(2)*1000: WC=E(3)*1000
```

```
2030 RETURN
```



n	$E(1)=V_r \cdot 100$	$E(2)=deb/1000$	$E(3)=WC/1000$	$\phi$ (%)	$T_1$ (°C)	$q$ (kcal/kg.cl)	$FC(1)=T_c - 1460$	$FC(2)=1430-T_c$	$f(e_1)$	KI
0	130	185	106,50	34,552767	349,045481	793,535802	-6,9376	-23,06242	1082,92721	0
1	130,011797	185,076931	106,369497	34,938194	350,357959	794,874042	-5,98287678	-24,0171232	1080,65029	0,01
2	130,020643	185,134060	106,272147	35,3211113	351,339286	795,878152	-5,27225780	-24,7277422	1078,99495	0,00766267806
3	130,029583	185,191368	106,174154	35,654303	352,329195	796,894121	-4,55819845	-25,4418016	1077,36518	0,00787126738
4	130,038559	185,248452	106,076204	35,9896861	353,320814	797,984933	-3,84570217	-26,1542978	1075,77232	0,00803250612
5	130,047575	185,305321	105,978269	36,327360	354,314392	798,940887	-3,13457298	-26,8654270	1074,21550	0,00820062347
6	130,056632	185,361967	105,880357	36,6672662	355,309886	799,971856	-2,42491531	-27,5750847	1072,69467	0,00837351056
7	130,065733	185,418393	105,7822461	37,0095082	356,307296	801,008066	-1,71660185	-28,2833928	1071,20890	0,00855206883
8	130,074879	185,474573	105,684599	37,3539833	357,306418	802,049249	-1,00982094	-28,9901798	1069,75832	0,00873590022
9	130,084074	185,530515	105,586761	37,7007353	358,307370	803,095543	-0,304501534	-29,6954985	1068,34236	0,00892670438
10	130,09332	185,586213	105,488944	38,0497858	359,310174	804,147013	-0,399385452	-30,3993855	1066,96058	0,00912403040
11	130,088697	185,558364	105,537853	37,8749192	358,808351	803,620450	-0,047524929	-30,0475249	1067,64742	0,00456201520
12	130,086385	185,544439	105,562307	37,7877699	358,557719	803,357836	-0,128438473	-29,8715615	1067,99372	0,00228100760

Tableau C.1 - Résultats de la commande optimale.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BIEZUNSKI  
Mesures et Régulation Automatique n° 4 à 12  
1972, n° 1 à 3 et 9 - 1973.
- [2] B. K. M. I.  
Préchauffeur pré-axial Ciments, Bétons, Plâtres.  
Chaux N° 754 - 3/85.
- [3] R. H. BOGUE  
La chimie du ciment Portland - Edition Eyrolles.
- [4] R. BOUDAREL - P. GUICHET - R. DELMAS  
Commande optimale des processus.
- [5] WALTER H. DUDA  
Cement data book International Process  
Engineering in the cement Industry.
- [6] FENG FEI  
Thermal analyses of cyclone preheater system  
based on a mathematical model-technical  
Session 5.
- [7] M. A. GLINKOV  
Fondement de la théorie générale du  
fonctionnement des fours - Edition MASSON et  
CIE.
- [8] I. A. GNEDINA  
Calculation of the efficiency of cyclone  
preheaters - Technical Session 5.
- [9] HEILIGENSTAEDT  
Thermique appliquée aux fours industriels -  
Tomes 1 et 2 - DUNOD Paris 1971.

./...



- [10] V. KAFAROV  
Les méthodes cybernétiques des processus de la technologie chimique - 1974.
- [11] M. MIQUEL et P. PREVOT  
Application de la théorie des graphes à la modélisation et simulation des préchauffeurs Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux - N° 749 - 4/84.
- [12] G. MONNOT  
La combustion dans les fours et les chaudières - Publications de l'Institut Français du Pétrole - 1978.
- [13] J.P. NOUGIER  
Méthodes de calcul numérique - Edition MASSON.
- [14] M. PAPADAKIS et M. VENUAT  
Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre - Edition DUNOD.
- [15] H. PERTHUIS  
La combustion industrielle.
- [16] J. RICHALET  
Modélisation et Identification du processus - Technique de l'ingénieur.
- [17] M. SINGH - A. TITLI  
Large scale systems : Décomposition, Coordination, Control. 1978.
- [18] P.D. SUNAVALA  
Mathematical analysis of the  $t^\circ$  distribution of gaz and charge in dry process rotary cement kilns Journal of the institute of fuel n° 402 1977.
- [19] J. WILSON - H.C. ITEN  
Optimizing energy utilization in cement plant opérations I. EEE trans on industry application Vol. 12, n° 5 - 1973.

