

24/91

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE

Presentee par : Mr ADJTOUTAH ABDENCOUR ingénieur E.N.P
pour l'obtention d'un diplome de **MAGISTER EN ELECTRONIQUE**

SUJET

**ANALYSE ET MODELISATION D'UNE
CLASSE DE SYSTEMES COMPLEXES.
APPLICATION : Four rotatif a ciment**

Soutenue le 31 Decembre 1991 devant le jury compose de:

MM.

A.CHIKMA	President	Professeur	E.N.P
F.CHIGARA	Rapporteur	Charge de cours	E.N.P
B.DERRAS	Examineur	Maitre de conference	E.N.P
A.FARAH	Examineur	Maitre de conference	E.N.P
B.BOUSSEKSOU	Examineur	Charge de cours	E.N.P
M.LAROUCI	Invite	Directeur Unite	E.N.D.E.C

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE

Presentee par : **Mr ADJTOUTAH ABDENOUR** ingenieur **E.N.P**
pour l'obtention d'un diplome de **MAGISTER EN ELECTRONIQUE**

SUJET

**ANALYSE ET MODELISATION D'UNE
CLASSE DE SYSTEMES COMPLEXES.**

APPLICATION : Four rotatif a ciment

Soutenue le 31 Decembre 1991 devant le jury compose de:

MM.

A.CHIKIMA	President	Professeur	E.N.P
F.CHIGARA	Rapporteur	Charge de cours	E.N.P
B.DERRAS	Examineur	Maitre de conference	E.N.P
A.FARAH	Examineur	Maitre de conference	E.N.P
B.BOUSSEKSOU	Examineur	Charge de cours	E.N.P
M.LAROUCI	Invite	Directeur Unite	E.N.D.M.C

R E M E R C I E M E N T S

Ce travail a été effectué au département d'électronique de l'Ecole Nationale Polytechnique, en étroite collaboration avec la cimenterie de AIN- TOUTA de l'Entreprise Régionale des Ciments de l'Est (E.R.C.E).

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance, et à exprimer toute ma gratitude à tous les responsables et enseignants du département d'électronique pour leur diligence, leur amabilité et pour toutes les facilités qui m'ont été accordées pour mener à terme cette étude.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur **A.CHEKIMA**, Président du conseil scientifique du département, de me faire l'honneur de présider le jury

J'adresse mes remerciements, tout particulièrement à Monsieur **F.CHIGARA** Chargé de cours, pour avoir bien voulu diriger cette étude, et surtout pour son aide et sa disponibilité.

Je suis honoré par la présence, comme membre du jury, de Monsieur **Ahcene FARAH** Maître de conférence et Directeur Adjoint chargé de la post-graduation, de Monsieur **B.DERRAS** Maître de conférence et de Monsieur **Boualem BOUSSEKSOU**, Chargé de cours.

Je remercie le Professeur **R.BELABES**, du département de chimie et le Professeur **S.BENKOUSSAS**, du département de génie mécanique, pour l'aide qu'ils m'ont consentie.

Je ne saurais oublier l'aide précieuse de mes collègues **A .OUCHAR**, **L.SAADAOUI** et **S.MEKAOUI**, les encouragements de mon ami **R.AKSAS** et l'attention que Monsieur **D. BERKANI**, chef de département, m'a manifestée tout le long de ce travail. Je leur adresse mes vifs remerciements.

Je suis particulièrement redevable envers Monsieur **A.KHENAFI** Directeur de la cimenterie de AIN-TOUTA pour sa disponibilité sans faille et son aide appréciable.

Je remercie très chaleureusement Monsieur **ZEGGAR**, responsable de

laboratoire de la cimenterie et Monsieur **DURJAC** pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée à la fois par leurs connaissances du procédé et par la collecte des données.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance aux responsables de l'**E.N.D.M.C** et à tout le personnel des structures informatiques (**U.E.D** et **U.R.E.G**) pour les facilités qu'ils m'ont accordées.

Je remercie plus particulièrement Monsieur **A.DERRAS** (Ingénieur informaticien à l'**U.E.D**) pour sa participation à la mise au point des programmes développés. Sa contribution a été décisive.

J'associe à ces remerciements Monsieur **M.LAROUCI**, Directeur de l'unité recherche (**U.R.S.T**) de l'**E.N.D.M.C.**, pour son apport au document final.

S O M M A I R E

Avant-propos

Abréviations et symboles

Liste des tableaux et figures

Introduction générale

PREMIERE PARTIE : ANALYSE DES SYSTEMES COMPLEXES

Chapitre I : Méthodes d'analyse des systèmes complexes

1.1	Introduction	1
1.2	Notion de système complexe	1
1.3	Analyse des systèmes complexes	2
	1.3.1 Généralités	
	1.3.2 Méthodes d'analyse des systèmes complexes	3
1.4	Conclusion	10

Chapitre II : Méthodologie d'analyse des processus industriels

2.1	Préambule	12
2.2	Pôles de la méthodologie	12
	2.2.1 Etude théorique	12
	2.2.2 Etude expérimentale	12
	2.2.3 Expérience et savoir-faire des opérateurs	13
2.3	Méthodes utilisées	13
	2.3.1 Approche théorique	13
	2.3.2 Approche expérimentale	16
2.4	Outils utilisés	18
2.5	Logiciel développé.....	19
2.6	Généralisation de la méthodologie	22

DEUXIEME PARTIE : APPLICATION PRATIQUE

Chapitre III: Description du procédé de cuisson en cimenterie

3.1	Introduction	30
3.2	Principe de la fabrication du ciment	30
3.3	Différents types de procédés	30

3.4	Procédé de cuisson dans l'ensemble du processus	31
3.5	Description de l'intallation de cuisson	33
3.5.1	Préchauffeur à cyclones	34
3.5.2	Four rotatif	34
3.5.3	Refroidisseur	37
3.6	Principaux phénomènes du procédé de cuisson	37
3.6.1	Aspect thermique	37
3.6.2	Aspect chimique	38
3.7	Caractérisation du système four	41
3.8	Environnement informatique du procédé	42

Chapitre IV : Application de la méthodologie

4.1	Objectif de l'analyse	44
4.2	Etude théorique	44
4.2.1	Analyse des phénomènes physiques du procédé	44
4.2.2	Hypothèses simplificatrices	46
4.2.3	Formulation du modèle	47
4.2.4	Simulation et validation du modèle	54
4.2.5	Analyse des résultats	59
4.2.6	Etude de l'influence de paramètres	61
4.3	Etude expérimentale	63
4.3.1	Horizon d'observation	63
4.3.2	Collecte de l'information	64
4.3.3	Codage des données	64
4.3.4	Filtrage des données	64
4.3.5	Synchronisation	64
4.3.6	Analyse primaire	65
4.3.7	Analyse quantitative	67

Conclusion générale

Références

Annexe A : Présentation du logiciel CHADOC

Annexe B : Méthodes d'analyse statistique des données

Annexe C : Terminologie cimentière

Annexe D : Liste des variables et paramètres

ABBREVIATIONS ET SYMBOLES

A_g	: m^2	: Aire occupée par les gaz
A_i	:	: Valeur initiale de % Al_2O_3 / % CaO
A_m	: m^2	: Aire occupée par la matière
A_p	: m^2	: Aire occupée par la paroi
A_v	: h^{-1}	: Facteur de fréquence de C_4AF
A_x	: h^{-1}	: Facteur de fréquence de C_2S
A_y	: h^{-1}	: Facteur de fréquence de C_3S
A_z	: h^{-1}	: Facteur de fréquence de C_3A
A_1	: h^{-1}	: Facteur de fréquence de $CaCO_3$
Cl	:	: Chaux (%) libre dans le clinker
C_{p_g}	: Kcal/ Kg. °C	: Chaleur spécifique des gaz
C_{p_m}	: Kcal/ Kg. °C	: Chaleur spécifique de la matière
C_{p_p}	: Kcal/ Kg. °C	: Chaleur spécifique de la paroi
E_v	: Kcal/ K.mole. °C	: Energie d'activation de C_4AF
E_x	: Kcal/ K.mole. °C	: Energie d'activation de C_2S
E_y	: Kcal/ K.mole. °C	: Energie d'activation de C_3S
E_z	: Kcal/ K.mole. °C	: Energie d'activation de C_3A
f_1	:	: Coefficient de conduction gaz-paroi
f_2	:	: Coefficient de conduction matière-gaz
f_3	:	: Coefficient de conduction paroi-matière
f_4	:	: coefficient de conduction paroi-atmosphère
FA	: T/h	: Débit d'alimentation en farine du four
F_{as}	: Nm^3/h	: Débit d'air secondaire
FC	: Nm^3/h	: Débit combustible
F_i	:	: Valeur initiale de % Fe_2O_3 / % CaO
F_1	:	: Facteur d'obstruction du four
h_0	:	: Fraction de radiation non absorbée
K_v	: m/h	: Vitesse de réaction de C_4AF
K_x	: m/h	: Vitesse de réaction de C_2S
K_y	: m/h	: Vitesse de réaction de C_3S
K_z	: m/h	: Vitesse de réaction de C_3A
M_A	: g	: Poids moléculaire de Al_2O_3
M_c	: g	: Poids moléculaire de $CaCO_3$
M_c'	: g	: Poids moléculaire de de CaO
M_F	: g	: Poids moléculaire de Fe_2O_3

M_s	: g	: Poids moléculaire de SiO_2
M_v	: g	: Poids moléculaire de C_4AF
M_x	: g	: Poids moléculaire de C_2S
M_y	: g	: Poids moléculaire de C_3S
M_z	: g	: Poids moléculaire de C_3A
NR	: %	: Niveau de remplissage du four
P	: %	: Pente (inclinaison) du four
PCI	: Kcal/ Nm ³	: Pouvoir calorifique inférieur du gaz
q_c	: Kcal	: Chaleur des réactions exothermiques
q_f	: Kcal	: Chaleur fournie par la flamme
r1	: m	: Rayon interne du four
r2	: m	: Rayon externe du four
R	: Kcal/K.mole.C	: Constante des gaz
S_i	:	: Valeur initiale de % SiO_2 / % CaO
S/S	:	: Sous-système
T_a	: °C	: Température atmosphérique
T_{as}	: °C	: Température de l'air secondaire
T_f	: °C	: Température fumée (gaz sortie four)
T_g	: °C	: Température des gaz dans le four
T_m	: °C	: Température de la matière
T_p	: °C	: Température de la paroi
T_v	: °C	: Température de la virole
V_g	: m/s	: Vitesse des gaz du four
V_m	: m/s	: Vitesse de la matière dans le four
V_t^m	: °C	: Valeur de la température mesurée
V_t^c	: °C	: Valeur de la température calculée
x	: m	: Position le long du four
α_c	:	: Facteur global de transmission de chaleur à travers la paroi
α_1	:	: Coefficient de transfert de chaleur gaz-matière
α_2	:	: Coefficient de transfert de chaleur gaz-paroi
α_3	:	: Coefficient de transfert de chaleur paroi-matière
α_4	:	: Coefficient de transfert de chaleur paroi-atmosphère
ΔH_c	: cal	: Chaleur de réaction de $CaCO_3$
ΔH_x	: cal	: Chaleur de réaction de C_2S
ΔH_y	: cal	: Chaleur de réaction de C_3A
ϵ_g	:	: Emissivité des gaz
ϵ_m	:	: Emissivité de la matière
ϵ_p	:	: Emissivité de la paroi

ρ_g	:	Kg/m ²	:	Densité surfacique des gaz
ρ_m	:	Kg/m ²	:	Densité surfacique de la matière
ρ_p	:	Kg/m ²	:	Densité surfacique de la paroi
θ	:	Deg.	:	Angle au sommet du talus matière
θ_r	:	Deg.	:	Angle d'écoulement matière
ψ	:		:	Facteur stochéométrique de combustion
η	:		:	Excès d'air

LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1 : Principales étapes de la procédure d'automatisation.
- Fig.1.2 : Principe de la méthode de coordination du modèle.
- Fig.1.3 : Algorithme de la méthode du modèle.
- Fig.1.4 : Principe de la méthode de coordination du critère.
- Fig.1.5 : Algorithme de la méthode du critère.
- Fig.2.1 : Procédure pour la construction du modèle de connaissance
- Fig.2.2 : Principe de la validation du modèle.
- Fig.2.3 : Démarche suivie pour l'étude expérimentale.
- Fig.2.4 : Structure générale du logiciel développé.
- Fig.2.5 : Organigramme général du logiciel développé.
- Fig.2.6 : Organigramme de l'organisation de la base de données.
- Fig.2.7 : Organigramme de la saisie des paramètres.
- Fig.2.8 : Organigramme de la saisie des valeurs des paramètres.
- Fig.2.9 : Procédure d'appel du logiciel CHADOC.
- Fig.2.10 : Représentation schématique de la méthodologie proposée
- Fig 3.1 : Principe de la fabrication du ciment.
- Fig.3.2 : Représentation schématique de la cimenterie de AIN-TOUTA
- Fig.3.3 : Intallation de cuisson.
- Fig.3.4 : Modes de transfert de chaleur dans le four.
- Fig.3.5 : Principales réactions chimiques dans le four.
- Fig.3.6.a: Profil chimique du four.
- Fig.3.6 b: Profil thermique du four.
- Fig.3.7 : Relations internes du système (four).
- Fig.3.8 : Représentation schématique du système de conduite.
- Fig.4.1 : Construction du modèle hybride.
- Fig.4.2 : Décomposition physique de l'installation de cuisson.
- Fig.4.3. : Bilan thermique d'une section élémentaire du four.
- Fig.4.4 : Bilan matière d'une section élémentaire du four.
- Fig.4.5 : Algorithme de simulation statique du modèle.
- Fig.4.6 : Profil thermique calculé du four.
- Fig.4.7 : Profil thermique mesuré du four.
- Fig.4.8 : Profil chimique calculé du four.
- Fig.4.9 : Influence du rayonnement interne du four (r1).
- Fig.4.10 : Graphe causal.
- Fig.4.11 : Arbre dichotomique obtenu par la ségmentation.

Fig.4.12 : Variation des teneurs en chaux libre en fonction du débit farine FA

Fig.4.13 : Principales classes de fonctionnement du procédé.

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1.1 : Principales méthodes d'analyse des systèmes complexes.

Tab.3.1 : Comparaison des trois procédés.

Tab.3.2 : Opérations fondamentales du procédé de cuisson.

Tab.3.3 : Réactions chimiques et longueurs des zones du four.

Tab.4.1 : Plage de vraisemblance des retards / CaO

Retard de synchronisation des variables / CaO.

Tab.4.2 : Matrice des coefficients de corrélation sur une
journée de fonctionnement.

Tab.4.3 : Codage en classes des variables.

Tab.4.4 : Nombre de points par classe.

Tab.4.5 : Valeurs moyennes des variables par classe.

Tab.4.6 : Caractérisation des classes du procédé.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Durant ces dernières décennies, l'essentiel des études et recherches en automatisme a porté sur la commande des systèmes complexes [1,2,3,4]. Malgré les progrès considérables accomplis et grâce notamment à la commande hiérarchisée [2] et au fuzzy logic control [5], la commande des processus industriels complexes, essentiellement multidimensionnels reste encore à développer.

Cette commande est l'ultime étape d'une procédure d'automatisation dont la phase analyse / modélisation constitue le prélude indispensable. L'analyse est particulièrement difficile dans le cas des processus industriels de production. Cette difficulté est liée aussi bien aux caractéristiques propres de ces systèmes (multivariables, non linéaires et souvent non stationnaires) qu'aux contraintes de leur environnement (critères de commande multiples et conflictuels, non intervention directe sur le procédé et existence de bouclages ...)

les méthodes classiques d'analyse ne permettent pas d'appréhender correctement ces procédés à cause des hypothèses simplificatrices sur lesquelles elles reposent (linéarité, stationnarité et décomposition en sous-systèmes) [6]. L'analyse des systèmes complexes requiert une approche spécifique au cas par cas. Elle ne cesse de susciter le développement de méthodologies nouvelles

Dans cette optique notre étude se propose, à partir de l'examen d'un cas concret; four rotatif d'une cimenterie; de dégager une méthodologie d'analyse applicable à une classe de systèmes représentant les processus industriels continus de production. Cette étude est divisée en deux parties.

La partie théorique expose des notions relatives aux méthodes récentes d'analyse et de contrôle des systèmes complexes et présente la méthodologie adoptée pour l'analyse des processus industriels. Les notions théoriques rappelées sont destinées à préciser le contexte théorique de l'étude et à justifier le recours à la définition d'une méthodologie. La méthodologie adoptée emprunte deux voies complémentaires :

.Une approche théorique qui consiste à décrire, sous forme d'équations, les phénomènes de transfert d'énergie et de transformation des matières régissant le fonctionnement du procédé. Elle est destinée à élaborer un modèle de con-

connaissance utilisable pour les simulations;

.Une approche expérimentale basée sur l'observation et le recueil de données réelles; elle permet d'isoler les variables représentatives du procédé, d'identifier leurs relations, de sélectionner les variables actives au sens d'un critère fixé et de caractériser les modes de marche du procédé.

Sur la base de cette méthodologie, un logiciel d'Analyse, Modélisation et Simulation des Procédés Industriels (A.M.S.P.I) a été développé. Il répond au souci de généraliser et de faciliter la mise en oeuvre de la méthodologie d'analyse adoptée.

La partie application pratique décrit d'abord le procédé de cuisson en cimenterie, très représentatif de la classe de systèmes complexes considérée. Elle présentera ensuite l'illustration, sur le four de la cimenterie de AIN-TOUTA, de la méthodologie adoptée. Cette partie précisera les principes de base des traitements réalisés et exposera les principaux résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

ANALYSE DES SYTEMES COMPLEXES

1.1 Introduction

L'analyse d'un système est une phase déterminante et préalable au calcul de sa commande (Fig.1.1). Son objectif final vise à trouver une formulation mathématique au problème de la commande. Cette formulation englobe les équations du modèle représentant intimement le système ainsi que les relations exprimant l'indice de performance et les contraintes.

Cette analyse est particulièrement difficile dans le cas des processus industriels complexes. La difficulté tient aux caractéristiques propres de ces systèmes qui commandent la prise en compte de plusieurs facteurs ainsi que leurs inter-relations, difficiles à identifier, souvent non linéaires et non stationnaires.

Après quelques généralités sur des notions importantes nous présenterons succinctement les méthodes récentes d'analyse des systèmes complexes. Ces méthodes ne sont pas applicables à la classe de systèmes considérée, toutefois elles sont présentées pour mettre en relief les facteurs qui les rendent inadaptées et qui mènent à la construction d'une méthodologie.

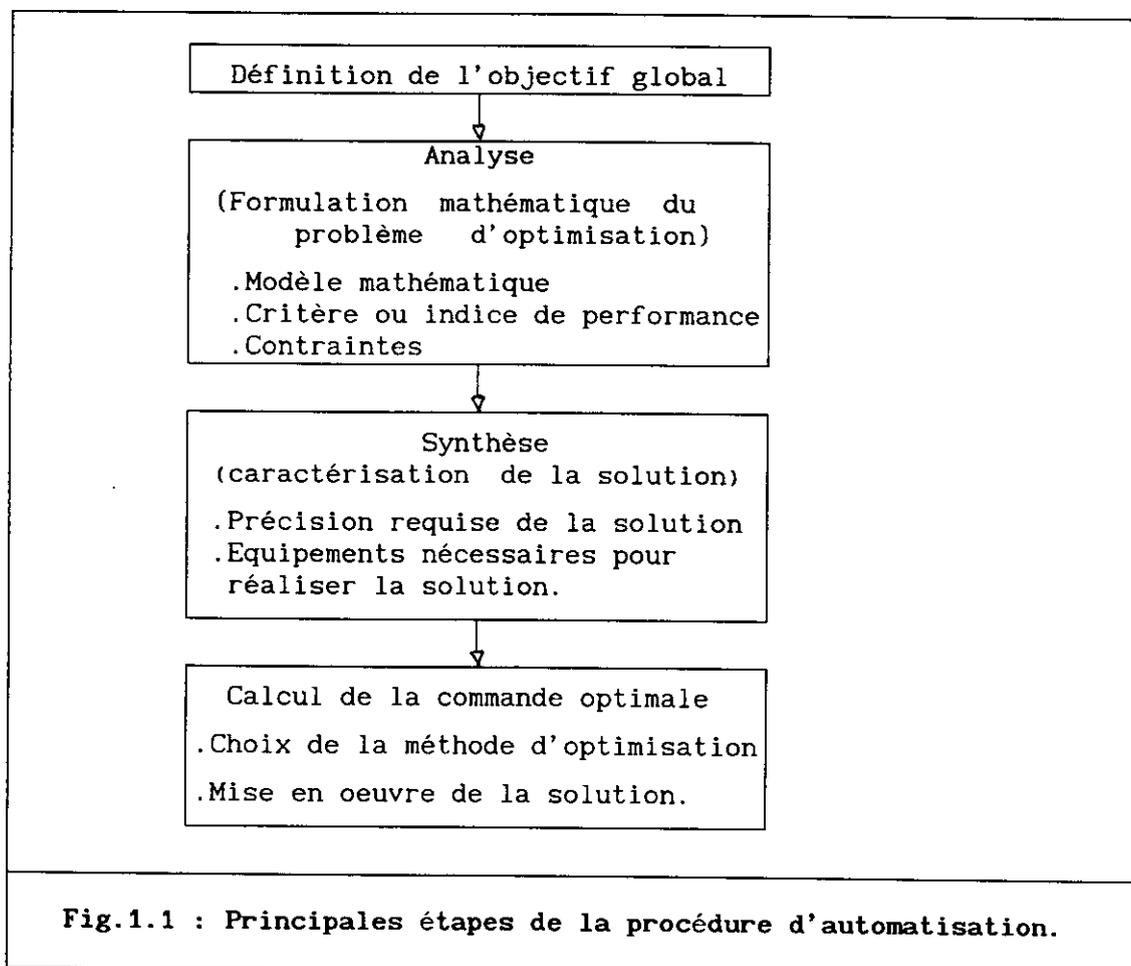
1.2 Notion de systèmes complexes

Dans la pratique, une tendance courante, source de confusions, assimile souvent, système complexe et système de grandes dimensions .Or un système peut être complexe sans être de grande taille (broyeur d'une cimenterie) et inversement.

La complexité est une notion relative, définie comme étant " un caractère fondamental qui apparaît comme l'incapacité de décrire tout le système et de déduire son comportement à partir de la connaissance du comportement de ses parties " [7]. Cette définition convient parfaitement aux processus industriels continus de production. La complexité de ces systèmes est attribuée aux facteurs suivants :

. Les aspects multivariables, non linéaires et non stationnaires auxquels s'ajoute une pluralité des objectifs de commande parfois antagonistes (minimum de consommation d'énergie et niveau maximum de production);

. L'existence de bouclages internes qui rendent difficile la compréhension des phénomènes physiques par le seul principe des relations de cause à effet.



1.3 Analyse des systèmes complexes

1.3.1 Généralités

L'analyse d'un système implique, la définition des entrées, des sorties et des commandes, la construction du modèle, l'estimation des paramètres du modèle et la définition des critères de commande.

La notion relative de système amène nécessairement différentes méthodolo-

gies d'analyse, qui se distinguent essentiellement par les objectifs spécifiques à atteindre. Ceci conduit à la mise en oeuvre de techniques variées plus ou moins complexes.

1.3.2 Méthodes d'analyse des systèmes complexes

Ces méthodes consistent soit à réduire la taille du système par une procédure d'aggrégation [1,8], soit à décomposer le système en sous-systèmes, dans le but d'utiliser des méthodes de décomposition-coordination pour la commande optimale [1,2,9].

a Aggrégation

La description précise de la majorité des systèmes physiques conduit à un nombre important d'équations différentielles (ou aux différences). De ce fait, l'analyse de ces systèmes et l'application de résultats classiques de la commande optimale sont difficiles, voir impossibles. Pour éviter les difficultés liées à la commande, des stratégies sous-optimales peuvent être définies en particulier par l'intermédiaire de modèles de dimensions réduites.

L'aggrégation est l'une des technique d'analyse des grands systèmes dynamiques linéaires. Elle permet la réduction du système réel de dimension n en un modèle réduit de dimension m ($m < n$) et facilite l'étude du système réel.

L'avantage de cette technique consiste en l'existence d'une relation linéaire entre les états du système réel et réduit de la forme :

$$Z(t) = L \cdot X(t) \quad (1.1)$$

.Le système réel peut être représenté par l'équation d'état :

$$\dot{X}(t) = A.X(t) + B.U(t) \quad (1.2)$$

.Le système agrégé (réduit) aura pour représentation :

$$\dot{Z}(t) = F \cdot Z(t) + G.U(t) \quad (1.3)$$

avec :

A = matrice d'évolution du système réel

B = matrice de commande du système réel

X = Vecteur d'état du système réel de dimension n

U = Vecteur d'entrée de dimension r

Z = Vecteur d'état de dimension m du système réduit ($r < m < n$)

L = matrice d'aggrégation de dimension (m, n)

G = matrice de commande du système réduit

F = matrice d'évolution du système réduit

L'objectif de l'aggrégation, est de déterminer les matrices (F,L,G) du modèle réduit à partir du modèle réel. Dans la pratique on trouve plusieurs méthodes permettant de définir un modèle réduit [1,8,9]. Les modèles réduits les plus connus retiennent les modes dominants du système réel. Parmi ceux ci on peut citer les modèles proposés par Nicholson, Davidson, Marshal, Mitra, Chidanbara.

b. La décomposition-coordination

Ces méthodes consistent à décomposer le grand système en N sous-systèmes invariants, coordonnés ensemble pour donner le système initial. Une première méthode consiste à partir du modèle de processus invariant dans le temps, et à le subdiviser en plusieurs sous processus. Dans ce cas on parle de la décomposition statique du grand système. [1,2,9]

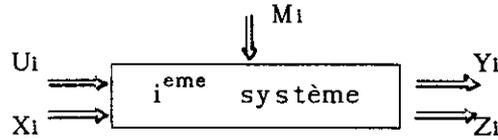
Une autre méthode pourra se faire en partant des observations du changement d'état du grand système. Celle ci se caractérise par la décomposition du système en sous-systèmes représentés par les vecteurs d'état et les matrices d'état auxquels leurs équations d'état convergent à la solution globale du système initial. Dans ce cas on parle de la décomposition dynamique du grand système. [1,2,9]

b.1 Principe de la décomposition statique

Le problème d'optimisation est scindé en deux étapes :
.En premier lieu, le problème dans son ensemble (fonction objective et contraintes) est transformé en une forme de deux ou plusieurs niveaux, avec des objectifs séparés pour chaque niveau.

.En second lieu, les parties de l'objectif du premier niveau ou problèmes qui n'ont pas de relation avec d'autres parties sont mis à part, formant une décomposition du problème du premier niveau.

Le système étudié est ainsi divisé en N sous-systèmes du type suivant:



avec :

M_i : Variables de commande pour le i^{eme} système

U_i : Entrées entre le système global et le système i

X_i : Entrées intermédiaires fournies par les autres s/s

Y_i : Sorties entre le sous-système i et le système global

Z_i : Sorties intermédiaires du sous/système i

M_i, U_i, X_i, Y_i, Z_i sont de dimensions respectives $m_{mi}, m_{ui}, m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}$. Ce système est décrit par les équations suivantes :

$$Z_i = T_i(M_i, X_i) \quad (1.4)$$

$$Y_i = S_i(M_i, X_i) \quad (1.5)$$

T_i, S_i sont des fonctions de dimensions respectives m_{zi}, m_{yi} . L'interconnexion, dans le cas d'un couplage linéaire entre les sous-systèmes, est représentée par :

$$X_i = \sum_{j=1}^N C_{ij} \cdot Z_j \quad i=1,2,\dots,N \quad (1.6)$$

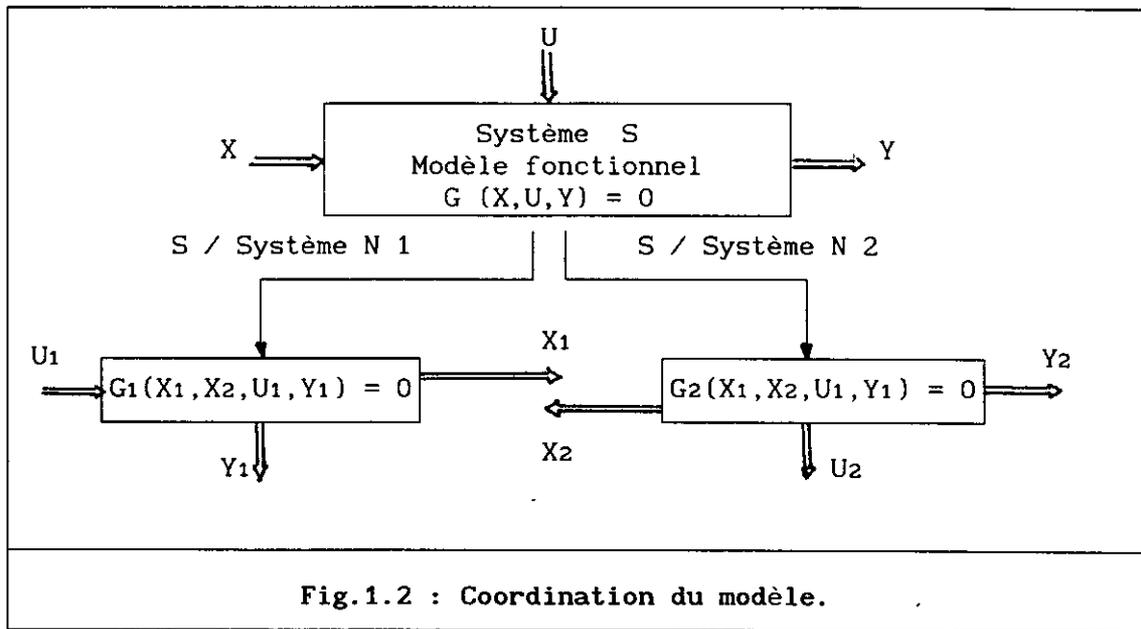
La fonction objective fixée initialement est supposée avoir une forme séparable additive :

$$F = \sum_{i=1}^N f_i(M_i, X_i) \quad (1.7)$$

L'objectif est d'optimiser l'équation (1.7) sous les contraintes d'égalités des équations (1.4,5).

Quoi qu'il existe un grand nombre de méthodes pour transformer un problème d'optimisation, en système multidimensionnel, celles ci constituent des combinaisons de deux différentes approches, qui sont appelées **Méthode de coordination du Modèle** (Fig.1.2) et **Méthode de Coordination du Critère** (Fig.1.3).

b.1.1 Méthode de coordination du modèle



avec :

- U : Variables de commande du système global
- U_i: Variables de commande du sous-système i (i = 1,2)
- X : Variables d'entrée du système global
- X_i: Variables d'interaction entre les sous-systèmes
- Y : Variables de sortie du système global
- Y_i: Variables de sortie du sous-système i

Le système S est supposé invariant et est caractérisé par le modèle mathématique :

.Processus : $G_1 (X_1, U_1, Y_1) = 0$ (1.8)

.Critère : $P_1 (X_1, U_1, Y_1) \text{ ——— minimum}$ (1.9)

Dans la décomposition on suppose que le système soit formé de plusieurs

Dans la décomposition on suppose que le système soit formé de plusieurs sous-systèmes à plusieurs niveaux de commande, qu'il y ait une interaction entre les entrées et sorties intermédiaires de ces sous-systèmes et que l'objectif fixé soit assuré par la réunion des objectifs imposés par les sous-systèmes.

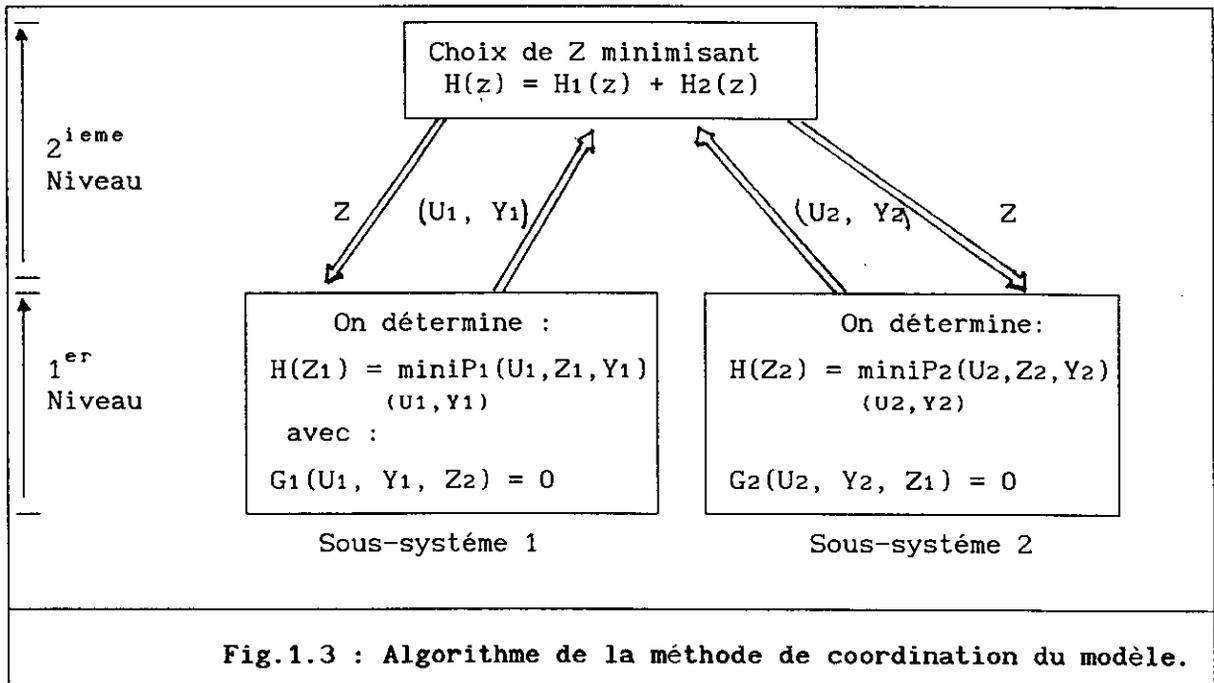
Le problème global d'optimisation est converti en un problème à plusieurs niveaux (ici 2) en fixant les vecteurs d'interaction entre les systèmes à une certaine valeur telle que : $X_i = Z = \text{constante}$

.Sous ces conditions, le problème intégral peut être séparé en un problème de premier niveau et un problème de deuxième niveau.

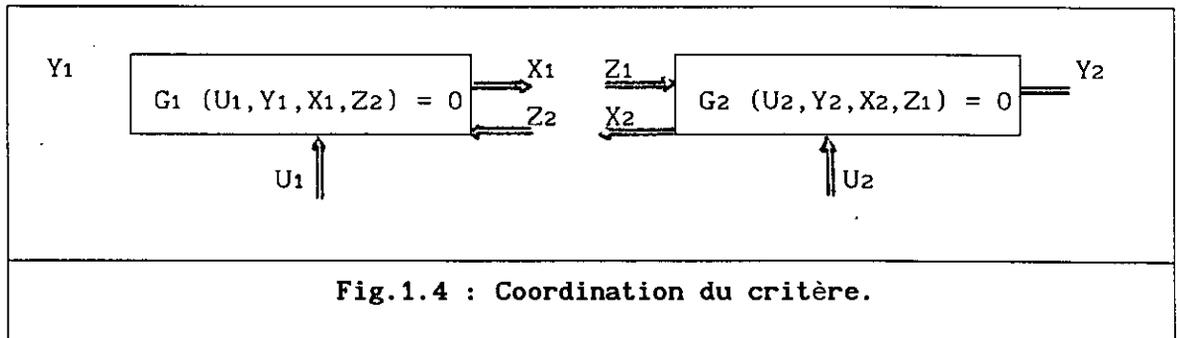
L'algorithme de la méthode (fig.1.3) montre que le problème de premier niveau consiste à déterminer :

$$H(Z) = \text{mini } P(U,Y,Z) , G(U,Y,Z) = 0 \quad (1.10)$$

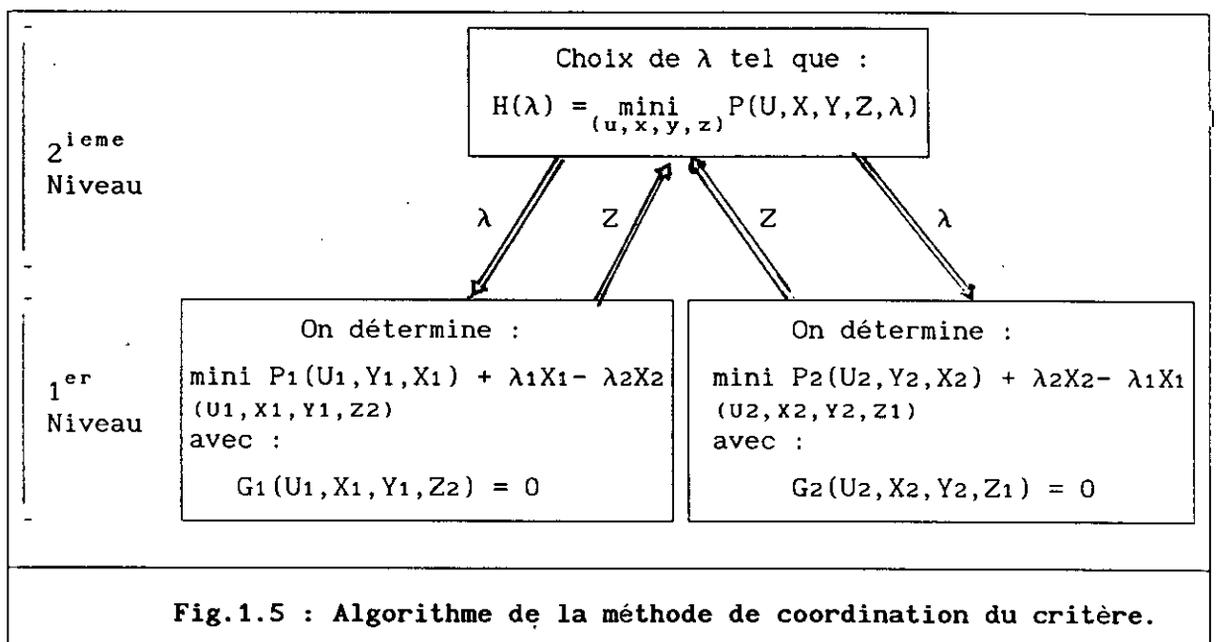
.Le problème de deuxième niveau consiste à rechercher le minimum de $H(Z)$. Cette méthode n'est applicable que dans le cas où $m_{u1} > m_{x1}$.



Cette méthode est représentée par : (Fig1.4).



En général, les entrées n'étant pas égales, l'optimisation consiste à obtenir un vecteur de pénalisation λ de façon à réaliser l'égalité entre X et Z . La figure (Fig.1.5) représente l'algorithme de cette méthode [9].



b.2 Principe de la décomposition dynamique

L'analyse dynamique consiste à décomposer le système dont l'état change au cours de l'observation en plusieurs sous systèmes couplés et ayant chacun, des performances fonctionnelles et des contraintes. La solution s'obtient en

deux étapes [9]:

- .Solution du sous problème posé à chaque sous-système;
- .Coordination des solutions pour trouver la solution globale.

Hypothèse:

- a. Soit l'instant d'observation $t \in [t_0, t_1]$
- b. Soit S une hyper-surface quelconque définie par :
$$h(X_i, t) = 0 \text{ pour } t \in [t_0, t_1] \quad i = 1, 2, \dots, N$$
- c. $X_i(t)$ variable d'état continue par morceau pour que la commande soit admissible.

Chaque sous-système i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) est défini par les variables $U_i(t)$, $Y_i(t)$, $Z_i(t)$, respectivement variable de commande, variable de sortie observable et variable d'entrée.

Chaque sous-système est caractérisé par les points suivants :

1. L'équation d'état :

$$\dot{X}_i(t) = F_i(X_i, U_i, Z_i, t) \quad t \in [t_0, t_1]$$

où $X_i(t)$ variable d'état continue par morceau.

2. Les conditions initiales connues :

$$X_{i0}(t_0) = X_{i0}$$

3. Les contraintes d'inégalités

$$R_i(X_i, U_i, Z_i, t) > 0$$

4. Couplages entre les sous-systèmes

$$Z_i(t) = \sum_{j=1}^N L_{ij} \cdot Y_j$$

$$Y_j = C_j(X_j, U_j, Z_j, t)$$

Avec :

L_{ij} : Matrice de couplage ou de permutation entre les sous-systèmes;

Y_j : Sortie observable ou non

5. Critère du système :

le critère principale du système est une fonction objective telle que :

$$J_i(U_i, Z_i) = \sum_{t=1}^N g_i(X_i, t) + \int_{t_0}^{t_1} f_i(X_i, U_i, Z_i, t) dt$$

L'optimisation de chaque critère $J_i(U_i, Z_i)$ relatif au sous-système i doit aboutir à un compromis qui permet d'optimiser le système global.

Les méthodes d'optimisation des critères sont nombreuses parmi celles ci nous citerons [1,2,9]:

- . La méthode variationnelle : suivant que les équations différentielles soient de Lagrange, Hamilton, Euler, Kolomogorow....
- . La méthode duale.
- . La méthode de sauts et de points singuliers...

1.4 Conclusion

Le tableau (tab.1.1) récapitule les méthodes d'analyse des systèmes complexes. Relevons que leur applicabilité est subordonnée à diverses hypothèses simplificatrices ou caractéristiques d'une classe de systèmes complexes particuliers (très souvent linéaires) telles que :

- .Système linéaire complètement observable et commandable;
- .Système invariant, avec couplage linéaire entre sous-systèmes;
- .Système dynamique, avec couplage identifié entre sous-systèmes.

Ces conditions, ne correspondent pas à la réalité des processus industriels complexes pour lesquels, il est nécessaire de se doter d'une méthodologie en vue d'effectuer leur analyse.

Méthode	Principe de base	Nature du système et conditions d'utilisat.
Aggrégation	Réduire la dimension (n) du grand système	.Système linéaire complètement observable et commandable. .Equations différentielles linéaires et stationnaires
Décomposition coordination.		
1. Statique coordination du modèle	.Subdiviser le procédé en s/s .L'optimisation revient à un problème à plusieurs niveaux (n) avec des interactions fixées.	Système invariant couplage entre sous-systèmes linéaire Contrainte d'égalité $Z = X = \text{constante}$ $F(\text{objec}) = \sum \text{des objec.}$
coordination du critère	.Subdiviser le système en s/s à partir de son fonctionnement. Le problème revient au choix du paramètre de pénalisation tel que: $h(z) = \text{mini}P(u, y, x, z,)$	système invariant couplage linéaire entre sous-systèmes $F(\text{objec}) = \sum \text{des objec.}$
2. dynamique	.Subdiviser le système initial en sous-systèmes .Optimiser chaque s/s séparément. Trouver un compromis optimisant le système global.	Objectifs des s/s identifiés, intervalle d'observation limité, Conditions aux limites connues.

Tableau 1.1 : Principales méthodes d'analyse des systèmes complexes

CHAPITRE II

CHAPITRE II

METHODOLOGIE D'ANALYSE DES PROCESSUS INDUSTRIELS

2.1 Préambule

La méthodologie proposée, aborde l'étude du procédé suivant deux voies principales, l'une relative à son observation, l'autre à sa connaissance théorique. Ces deux approches doivent être menées simultanément. Leur complémentarité et leurs apports mutuels permettent d'intégrer au mieux les contraintes de structure et d'environnement des systèmes complexes et de construire un modèle évolutif global qui, tout en respectant les caractéristiques structurelles fondamentales du procédé, sera apte à sa commande en temps réel.

2.2 Les pôles de la méthodologie

2.2.1 L'étude théorique

Elle intègre toutes les connaissances à priori sur le procédé et consiste à décrire, sous forme d'équations, et de façon précise les phénomènes physiques, chimiques et thermiques du procédé. Elle permet de construire le modèle de connaissance très représentatif, dans un large domaine, de son comportement. Ce modèle inapte à la commande en temps réel est utilisé pour les simulations

Ces simulations, sont importantes et serviront notamment à valider le modèle et simplifier sa structure, effectuer une analyse phénoménologique poussée du procédé, étudier l'influence de paramètres et interpréter les résultats de l'analyse statistique.

2.2.2 L'étude expérimentale

Cette étude consiste à observer le procédé sur un large horizon et collecter un maximum de données réelles. Elle permet d'obtenir, par application de méthodes statistiques, les grandeurs caractéristiques de l'évolution du procédé

L'étude expérimentale servira à, affiner les objectifs de l'analyse, simplifier la structure du modèle de connaissance, construire au besoin un modèle expérimental de régulation, orienter l'analyste sur les décompositions possibles du procédé, valider les modèles construits.

2.2.3 Expérience et savoir- faire des opérateurs

Ils interviennent à tous les niveaux de la démarche et permettent de poser les hypothèses simplificatrices indispensables à la formulation des équations du modèle. Ils orientent l'analyste et l'aident à intégrer les aspects particuliers du procédé (dysfonctionnements). Ils permettent d'interpréter les résultats des études précédentes.

2.3 Méthodes utilisées

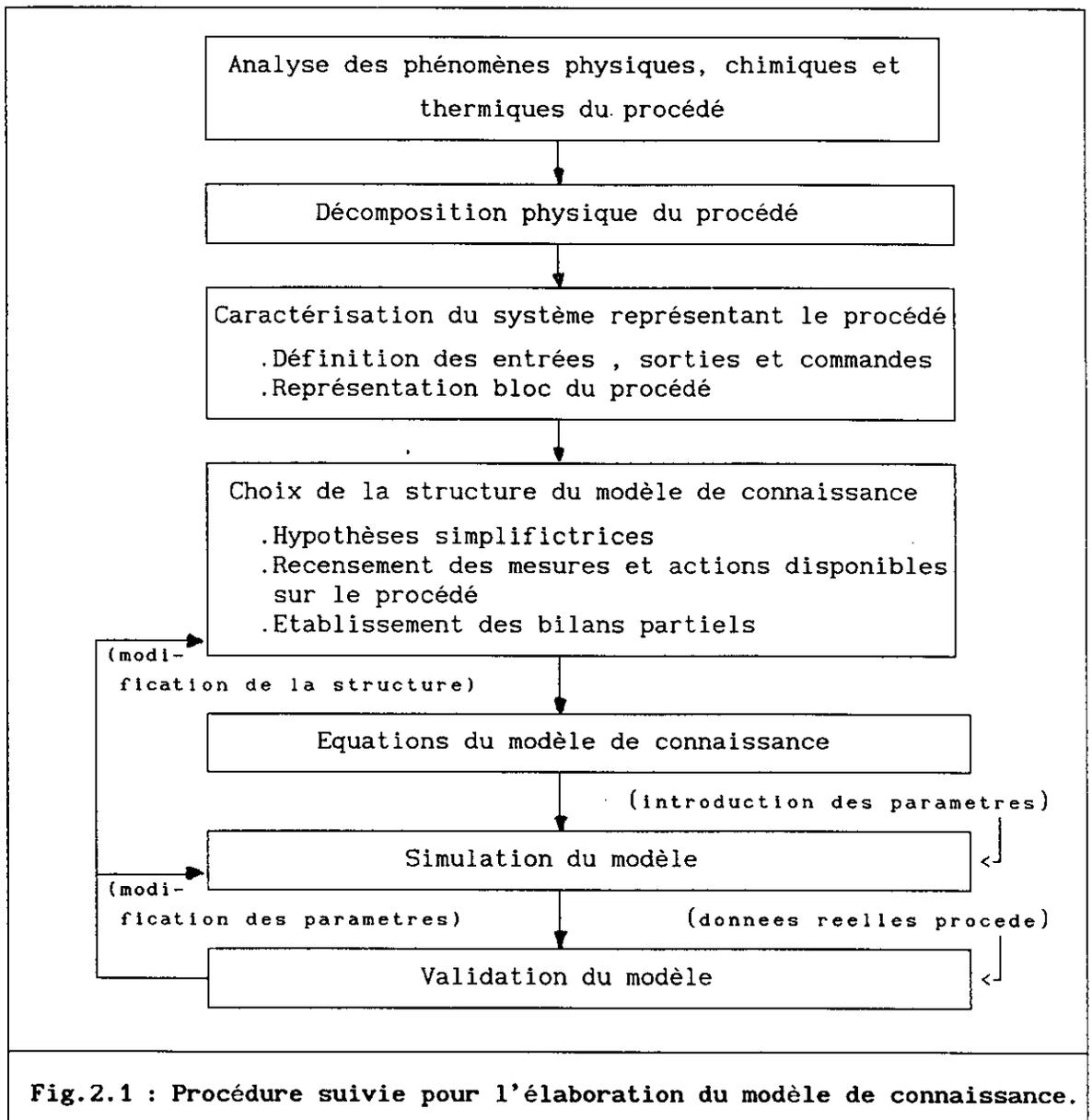
2.3.1 Etude théorique

La démarche suivie (Fig.2.1) pour élaborer le modèle de connaissance comporte plusieurs étapes dont les plus importantes sont:

a. Simulation

Il s'agit généralement de résoudre un système d'équations différentielles. Il existe pour cela un grand nombre de méthodes d'intégration numérique qui se distinguent par leur précision et leur rapidité de calcul [10]. Pour la simulation du modèle de connaissance, nous adopterons la méthode la plus précise Runge-Kutta d'ordre 4 [11].

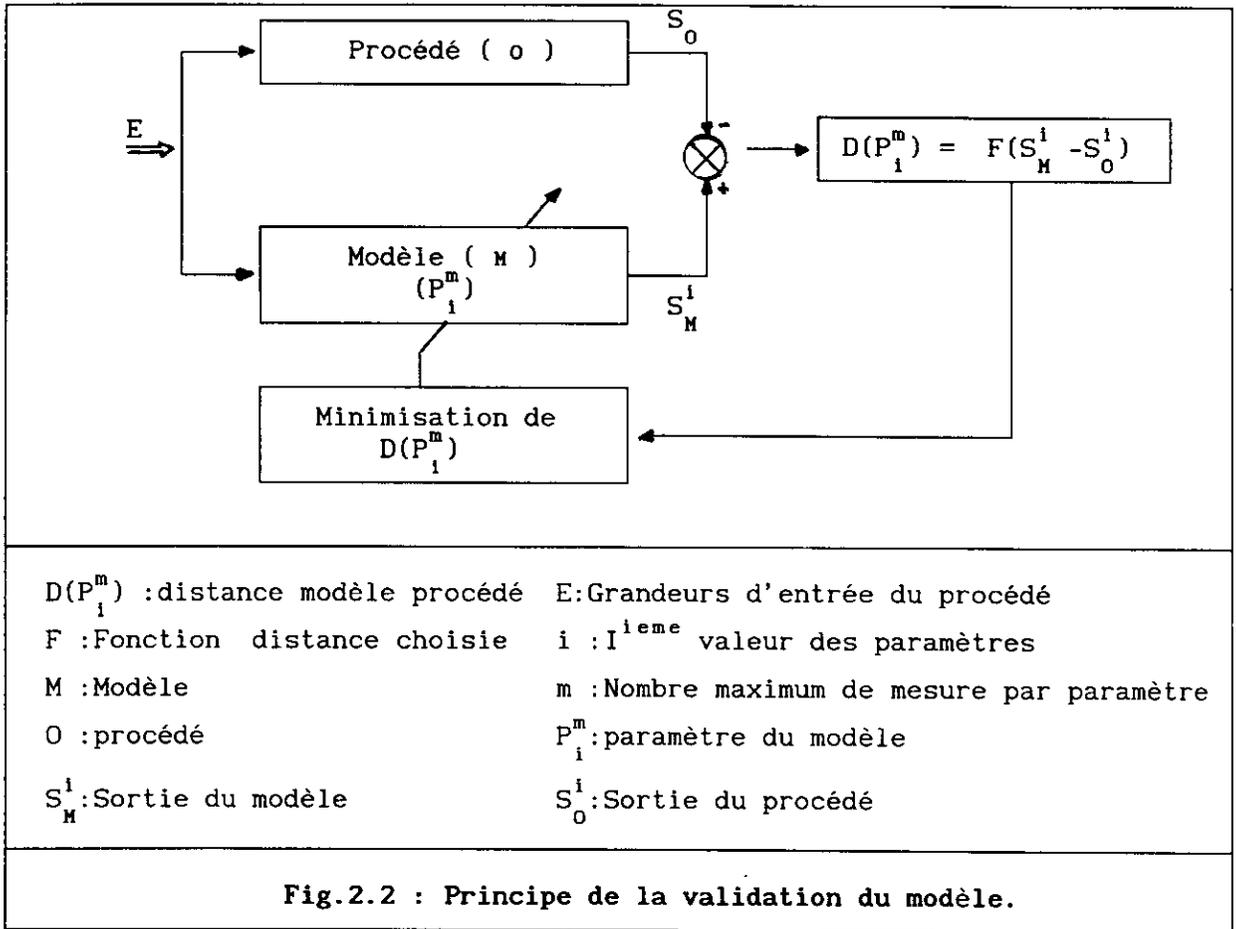
Pour intégrer les non linéarités, la simulation numérique est indiquée, même dans le cas où une solution analytique existe.



b. Identification

Le principe de cette identification (Fig.2.2) consiste à déterminer la valeur des paramètres du modèle (M) dont le comportement sera le plus proche du procédé (O). Pour valider le modèle, on introduit un critère de distance entre le procédé et celui ci :

$$D(O,M) = \sum_{i=1}^m F(S_M^i - S_O^i) = \sum_{i=1}^m F(X) \quad (2.1)$$



$D(P_i^m)$: distance modèle procédé	E: Grandeurs d'entrée du procédé
F : Fonction distance choisie	i : I ^{ème} valeur des paramètres
M : Modèle	m : Nombre maximum de mesure par paramètre
O : procédé	P_i^m : paramètre du modèle
S_M^i : Sortie du modèle	S_0^i : Sortie du procédé

F étant généralement définie par [10]:

$$F = \left\| X \right\| , \left\| X^2 \right\|$$

Comme le modèle n'est jamais parfait, le problème revient à minimiser la distance $D(P_i^M)$. On fera appel aux méthodes itératives de recherche de minimum

Méthodes itératives de recherche de minimum.

Principe.

Soit la distance $D(O,M) = F(P) = \sum_{i=1}^m (S_i^M - S_i^O)^2$ une fonction des paramètres à minimiser .

Les méthodes itératives vont nous permettre de calculer les valeurs $(P_1, P_2$

P₃...), à partir d'une valeur initiale P₀.

P représente le vecteur des paramètres à identifier. Si nous choisissons les points successifs de façon que :

$$F(P_0) > F(P_1) > F(P_2) > \dots > F(P_i)$$

Cette suite, bornée par $F(\hat{P})$, convergera. Les algorithmes qui permettent de générer les points P sont très variés. Nous distinguerons les méthodes théoriques (Méthode gradient, Méthode de Newton...) et les méthodes heuristiques (Méthode du gradient simplifiée, Méthode de Partan, Méthode de convergence finale quadratique...) [12].

Dans la pratique, la meilleur méthode est celle qui convergera le plus rapidement et dont le temps de calcul est minimum. Si nous disposons de très bonnes connaissances sur le procédé, nous pouvons choisir convenablement P₀ et évaluer le minimum recherché. Une indication sur la valeur de ce minimum, permettra de vérifier rapidement cette convergence.

2.3.2 Etude expérimentale

La procédure adoptée (Fig.2.3) pour mener l'étude expérimentale intègre les étapes essentielles suivantes :

a. Choix de l'horizon d'observation

Il faut élargir au mieux la période d'observation du procédé, une à deux années sont généralement nécessaires. Cette période est requise pour s'affranchir des contraintes de non-intervention directe sur le procédé, et des effets de bouclages . Elle permet de constituer une base de données riche en informations, par des acquisitions systématiques (portant sur le plus grand nombre possible de variables).

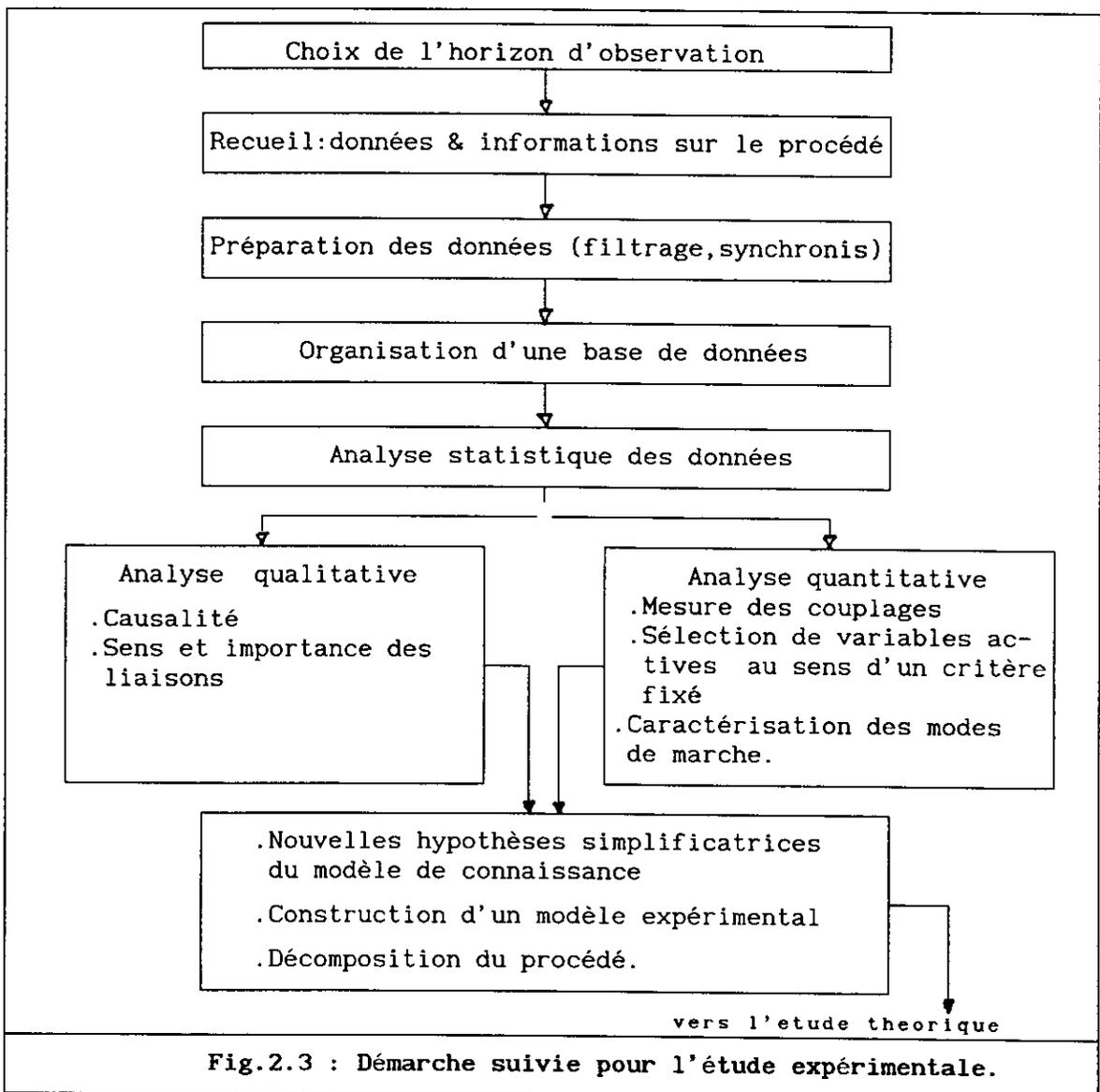
b. Collecte de l'information

Constituant la "matière première" de l'analyse, l'information revêt un caractère important, elle regroupe :

- . L'ensemble des mesures physiques : Information quantitative;
- . L'ensemble des variables logiques d'état : Information qualitative codée;
- . Toutes les indications fournies par les opérateurs sur la marche du procédé : Information qualitative non codée.

La collecte de l'information consiste à organiser sur le site des campagnes de recueil de données, il s'agira de :

- . Mesurer en temps réel les variables de marche du procédé telles que la composition des matières, les vitesses, les températures;
- . Recenser les dysfonctionnements survenus de façon à détecter et caractériser, les cycles et tendances de comportement.



c. Traitements préliminaires des données

Les informations collectées subiront un prétraitement, avant leur organisation en base de données. Cette opération consiste en:

- . Un codage des variables en fonction des traitements prévus;
- . Un filtrage des valeurs pour éliminer les mesures aberrantes;
- . Une synchronisation permettant, de s'affranchir de la dynamique du procédé et de neutraliser les retards purs dûs principalement au déplacement de la matière, à l'inertie thermique et au temps de mesure (analyse de composition en particulier). Cette synchronisation doit se faire sur la variable la plus en retard du procédé.

d. Analyse du procédé par les données réelles

Elle comporte une analyse qualitative et une analyse quantitative des données. L'analyse qualitative a pour but de caractériser les liaisons inter-variables (sens et importance) et les causalités physiques . L'analyse quantitative est destinée à mesurer les couplages inter-variable, sélectionner les variables les plus actives au sens d'un critère fixé et caractériser le mode de fonctionnement du procédé.

e. Les méthodes utilisées

Ces traitements emploieront en général, des méthodes statistiques d'analyse de données [13,14,15,16]. Toutefois en tenant compte de leur diversité, il est nécessaire de dégager les caractéristiques d'utilisation qui permettront de choisir les méthodes adaptées aux objectifs de l'analyse (Annexe B1, B2, B3, B4).

2.4 Outils utilisés

Outre les lois physiques et mathématiques utilisées pour la décrire des phénomènes du procédé, la méthodologie proposée nécessitera le recours à l'outil informatique. Ce dernier est utilisé pour gérer la base de données, et réaliser l'analyse du procédé.

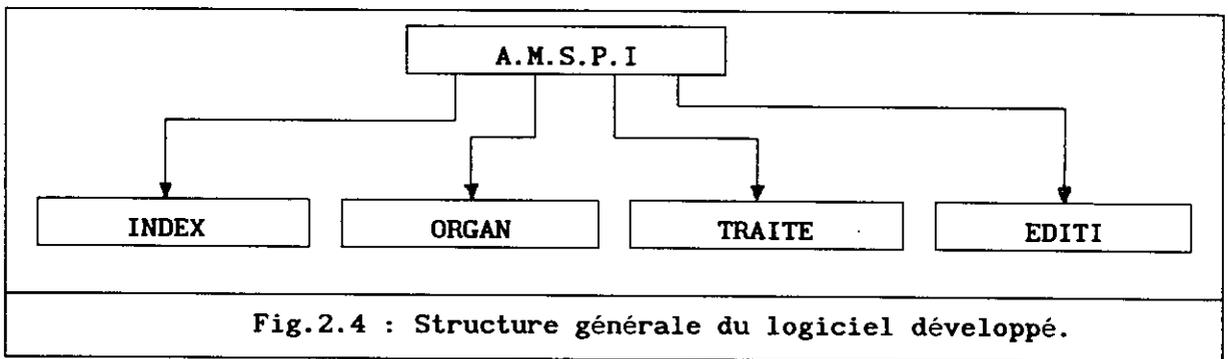
2.5 Logiciel développé

Ce logiciel est développé en application de la méthodologie proposée pour l'analyse des systèmes industriels complexes. Il utilise comme langage DBASE3 PLUS, très bien adapté à la gestion des fichiers de données, mais assez limité du point de vue calculs scientifiques. Il intègre comme utilitaires deux logiciels, CHADOC pour l'analyse statistique de données et GRAPHER pour les tracés de courbes (Annexe A1).

Les programmes développés (Annexe A2) et les utilitaires nécessitent un espace mémoire de plus de 600 K octets. Vu le nombre important de variables appelées en mémoire par la majorité des traitements, ce logiciel ne pourra être implanté que sur un équipement de mémoire vive supérieure à 1 M octets. Le temps du traitement le plus long (simulation) est d'environ 05 minutes (temps enregistré sur un micro-ordinateur muni d'un microprocesseur de fréquence 12 Mhz. (TOCAN 286)).

2.5.1 Présentation du logiciel.

La structure générale du logiciel comporte 05 modules (Fig.2.4) qui nécessitent des chaînages pour une exécution correcte des traitements.



a- Le module A.M.S.P.I permet de lancer le logiciel et de gérer les appels, sans verrouillage, des autres modules. (Fig.2.5)

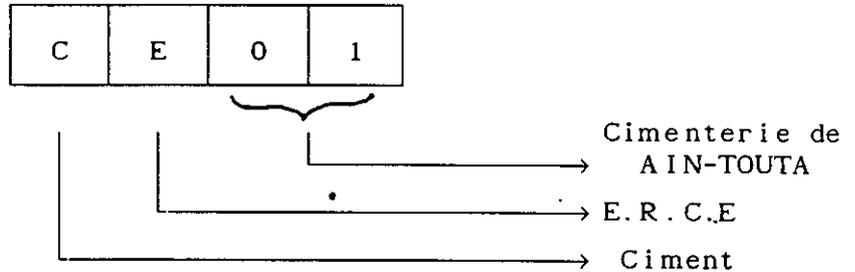
b- Le module INDEX permet au besoin (dans le cas où la structure d'un fichier a été modifiée par exemple) de réindexer les fichiers de données

c- Le module **ORGAN** gère la base de données, il offre la possibilité de saisir, modifier, et consulter les fichiers des paramètres ou de leurs valeurs (Fig.2.6,7,8).

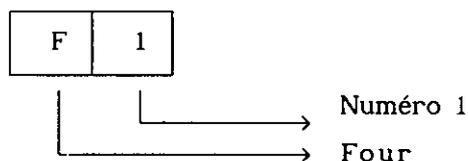
d- Le module **TRAITE** gère un ensemble de dix programmes qui réalisent le filtrage des valeurs des paramètres, les traitements statistiques pour analyse du procédé, la simulation et la validation du modèle de connaissance et enfin la sélection de paramètres dont on veut étudier l'influence (Fig.2.9,4.1).

2.5.2 Nomenclature et codification des processus et installations.

La nomenclature des processus reprend toutes les unités de fabrication des matériaux de construction (cimenterie, briquèterie...). La structure de base retenue pour leur codification prévoit 04 caractères alpha-numériques. Les 02 premiers indiquent la nature du produit fabriqué et son appartenance régionale (ERCE Est, ERCC Centre...). Les 02 derniers désignent l'unité.



La nomenclature des installations énumère les principaux ateliers de l'unité (fours, broyeurs, concasseurs...). La codification des installations s'est faite sur un structure à deux caractères.



2.5.3 Classification des données.

Nous distinguerons trois grandes familles :

a- Les paramètres caractéristiques intrinsèques du procédé (type :p).

Ces paramètres regroupent les invariants telles que les données initiales et aux limites, les caractéristiques géométriques du four, les données sur les compositions des matières et du combustible. Les données variables telles les coefficients d'échange thermique, les densités surfaciques spécifiques (matières, gaz et paroi), les chaleurs spécifiques, les énergies d'activation.

b- Les variables caractéristiques de l'évolution du comportement du procédé (type : V)

Ces paramètres regroupent toutes les mesures possibles sur le procédé (températures, pressions, débits, vitesses...) et donnant son état de marche.

c- Les données qualitatives (type :A)

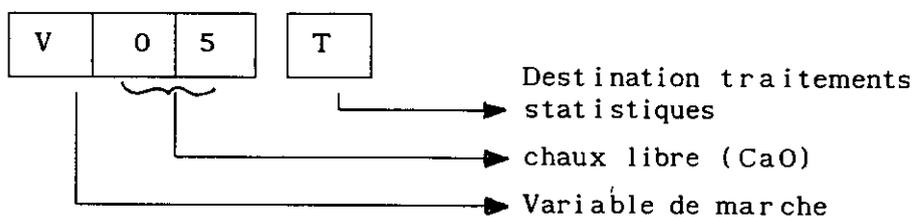
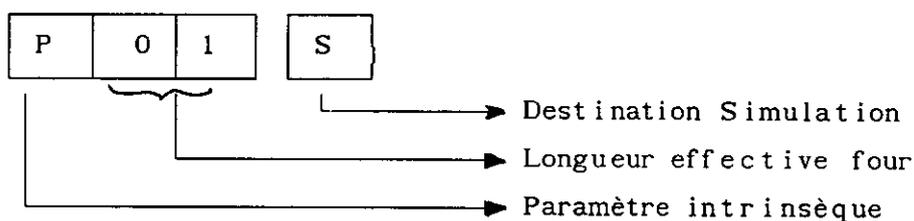
Il s'agit d'appréciations recueillies auprès des hommes du procédé et relatives aux phénomènes perturbants, périodiquement enregistrés et au comportement en général du procédé (stabilité, réactions aux commandes...).

d- Les caractéristiques de la virole du four (type :X).

Ils concernent les épaisseurs virole, croutage et réfractaires ainsi que leurs coefficients de conduction thermique.

2.5.4 Codification des paramètres.

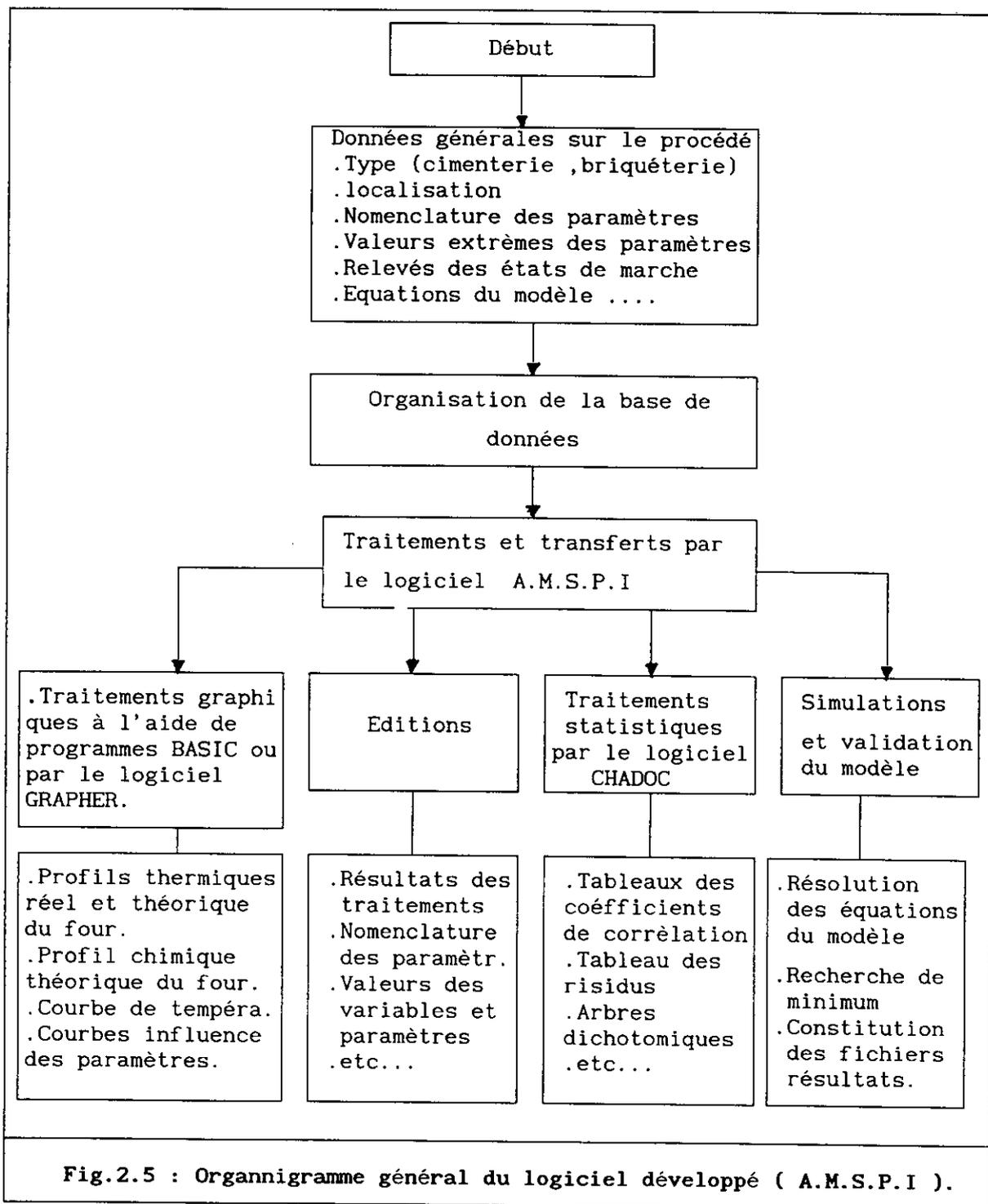
Afin de pouvoir les traiter sous différentes formes, toutes les données seront regroupées par nature (vitesses, débits, appréciations...) et codées selon les traitements qu'elles auront à subir. La structure de code retenu est la suivante:

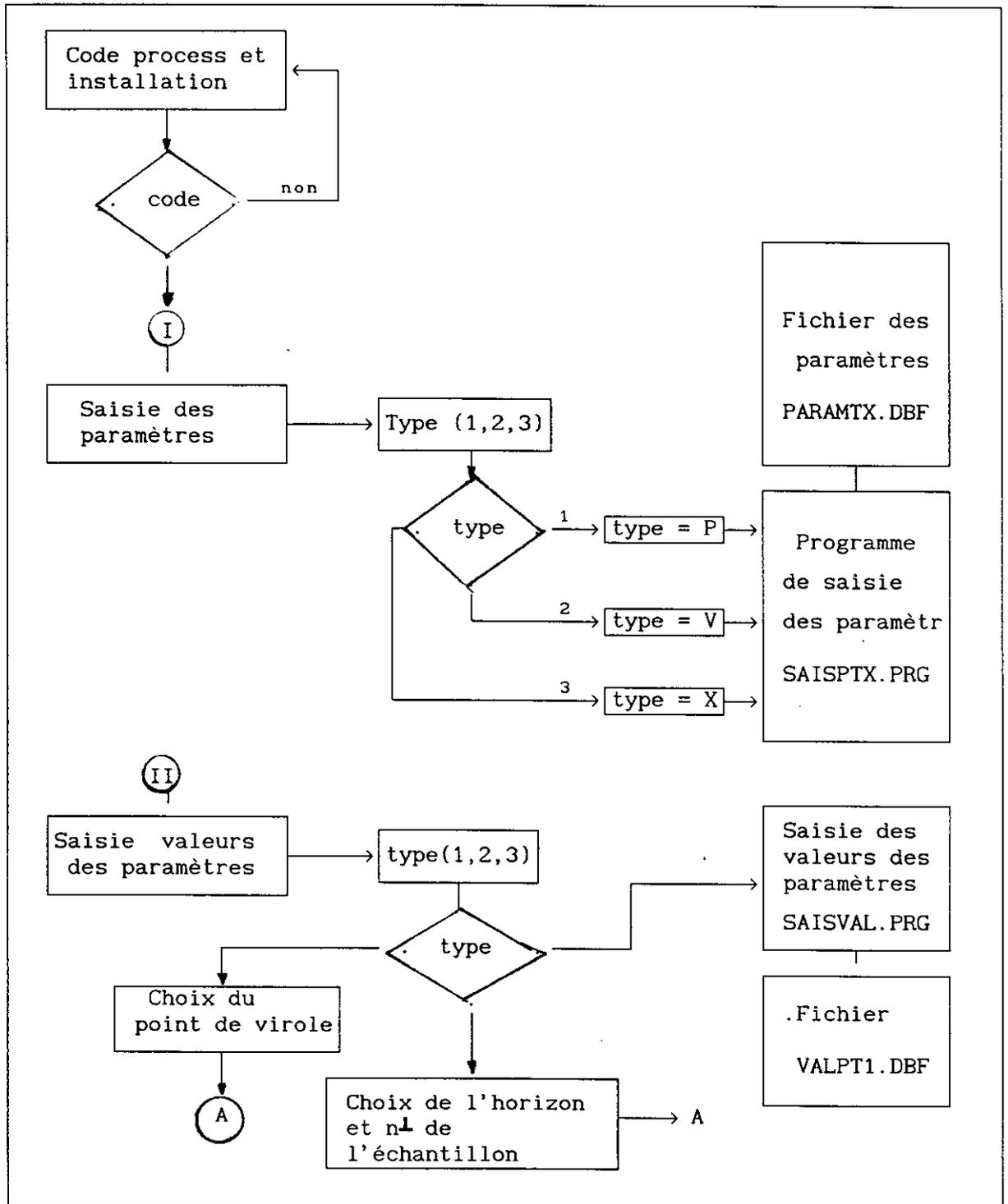


2.6 Généralisation de la méthodologie

Cette méthodologie, dégagée et mise en oeuvre à partir de l'étude d'un cas industriel concret, offre des possibilités d'adaptation et de généralisation. Il est cependant nécessaire de bien définir les objectifs de l'analyse projetée et d'avoir de bonnes connaissances sur la nature et les réalités du procédé à analyser.

La structure modulaire de cette méthodologie permet d'intégrer d'autres techniques destinées à l'étude d'aspects particuliers à un procédé (Fig.2.10).





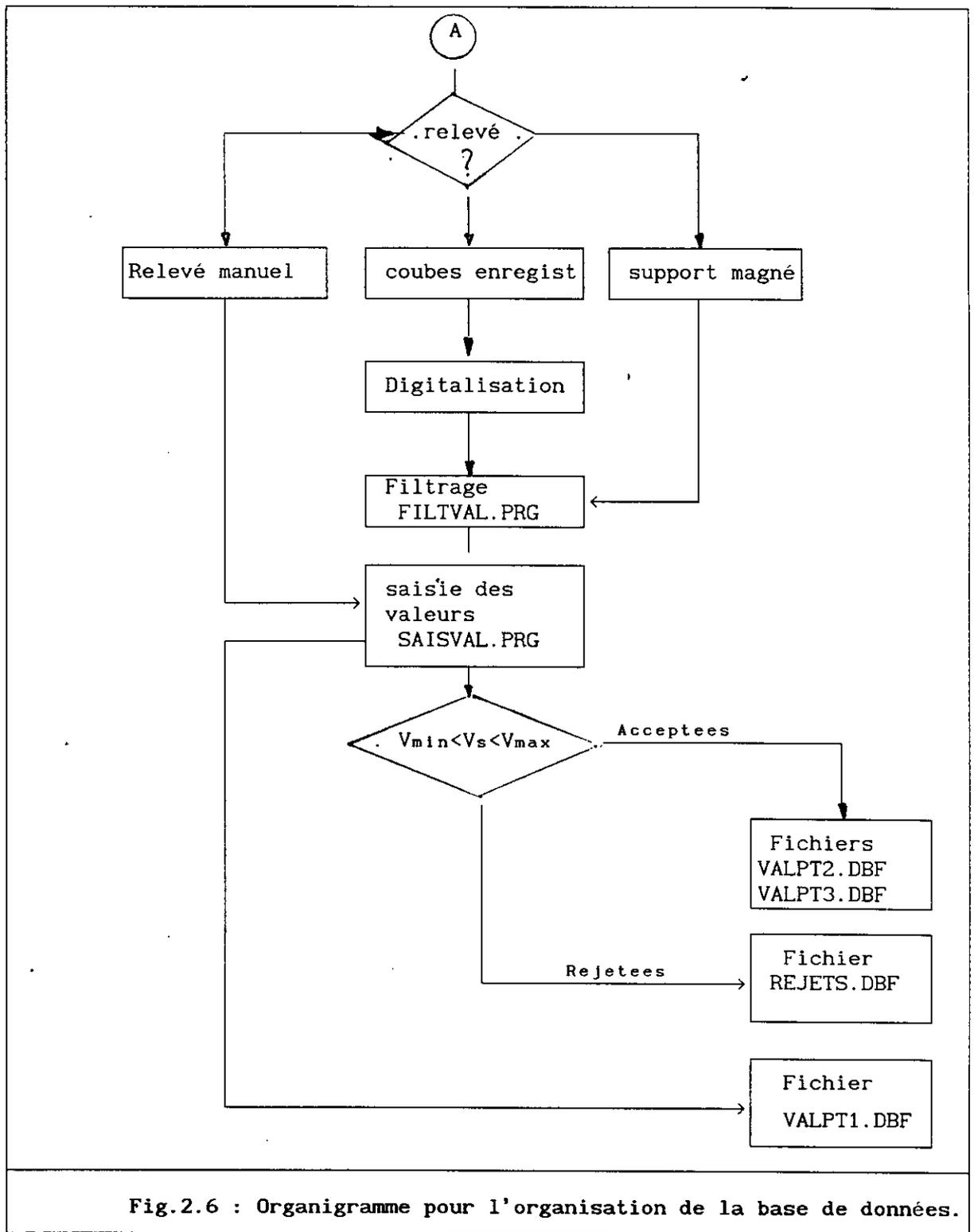


Fig.2.6 : Organigramme pour l'organisation de la base de données.

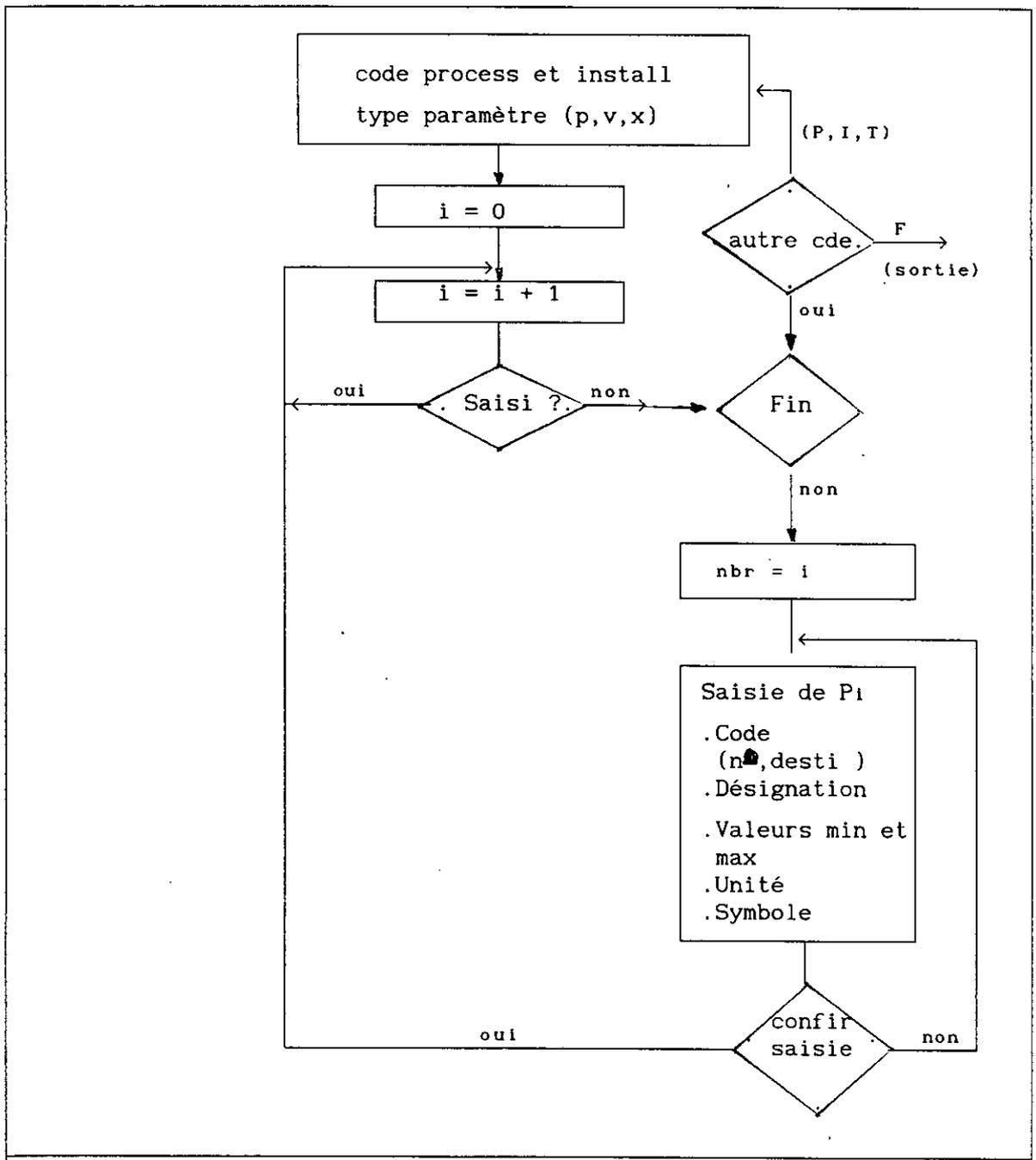


Fig.2.7 : Organugramme du programme de saisie des paramètres.

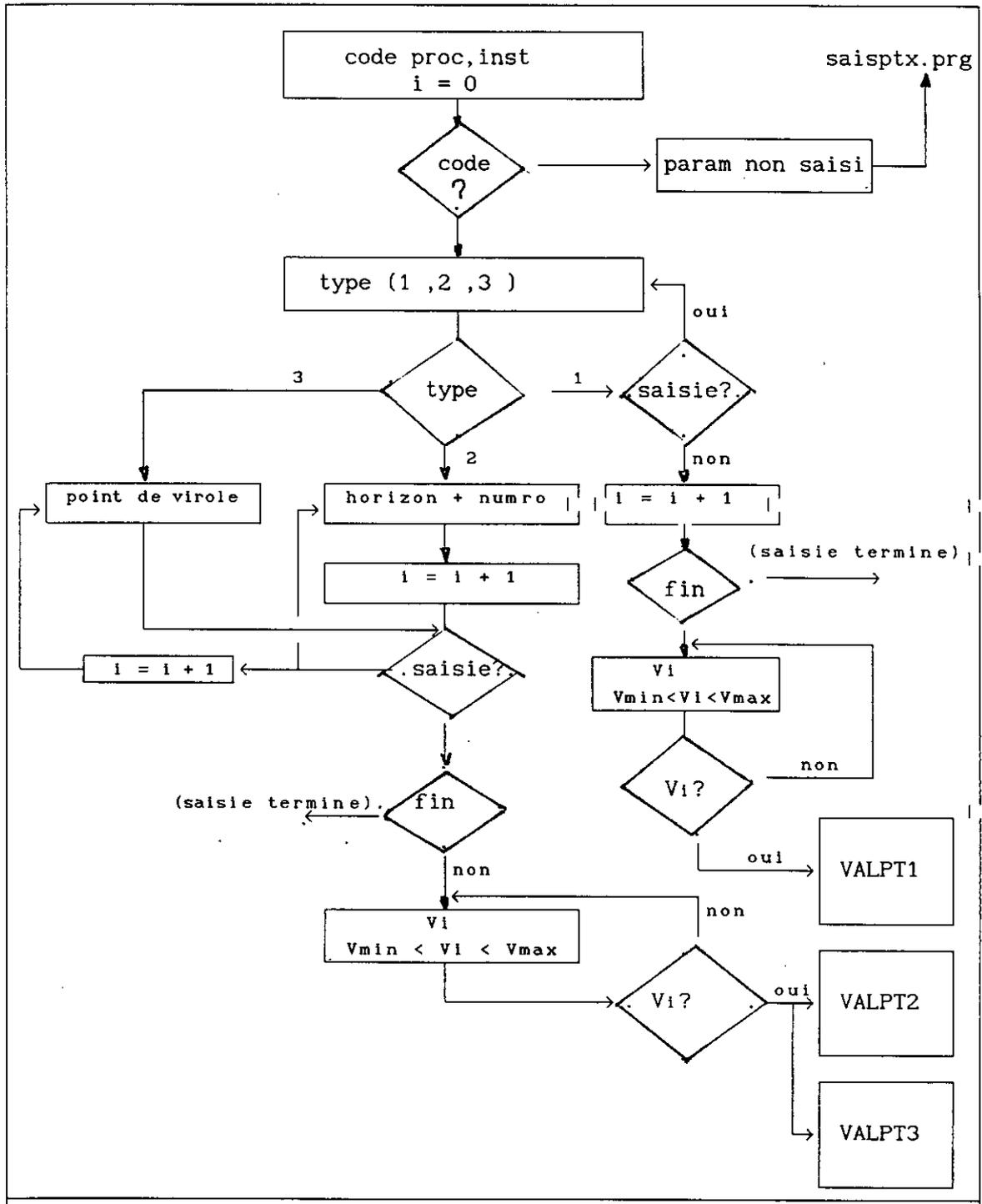
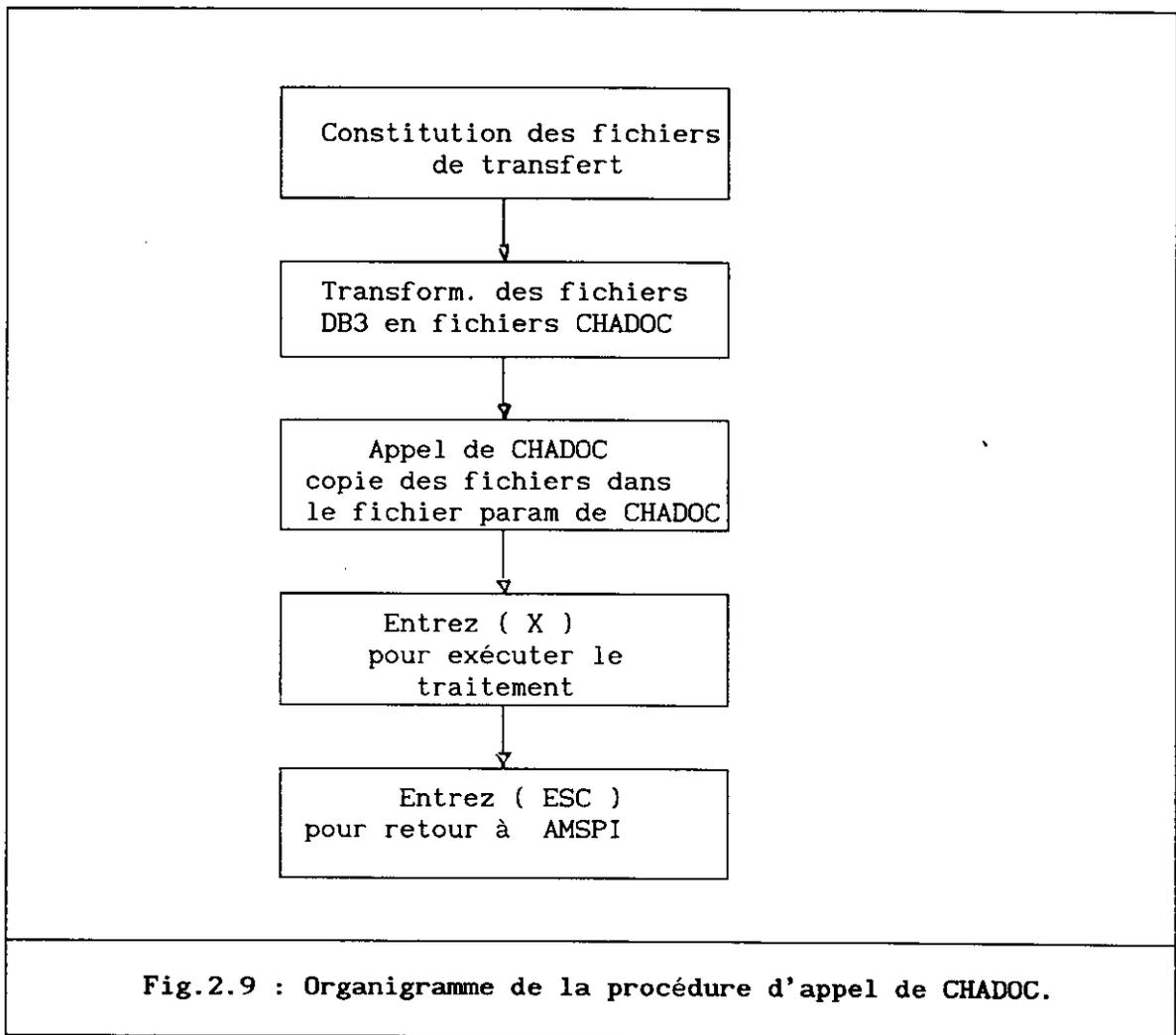


Fig.2.8 : Organigramme de la saisie des valeurs des paramètres.



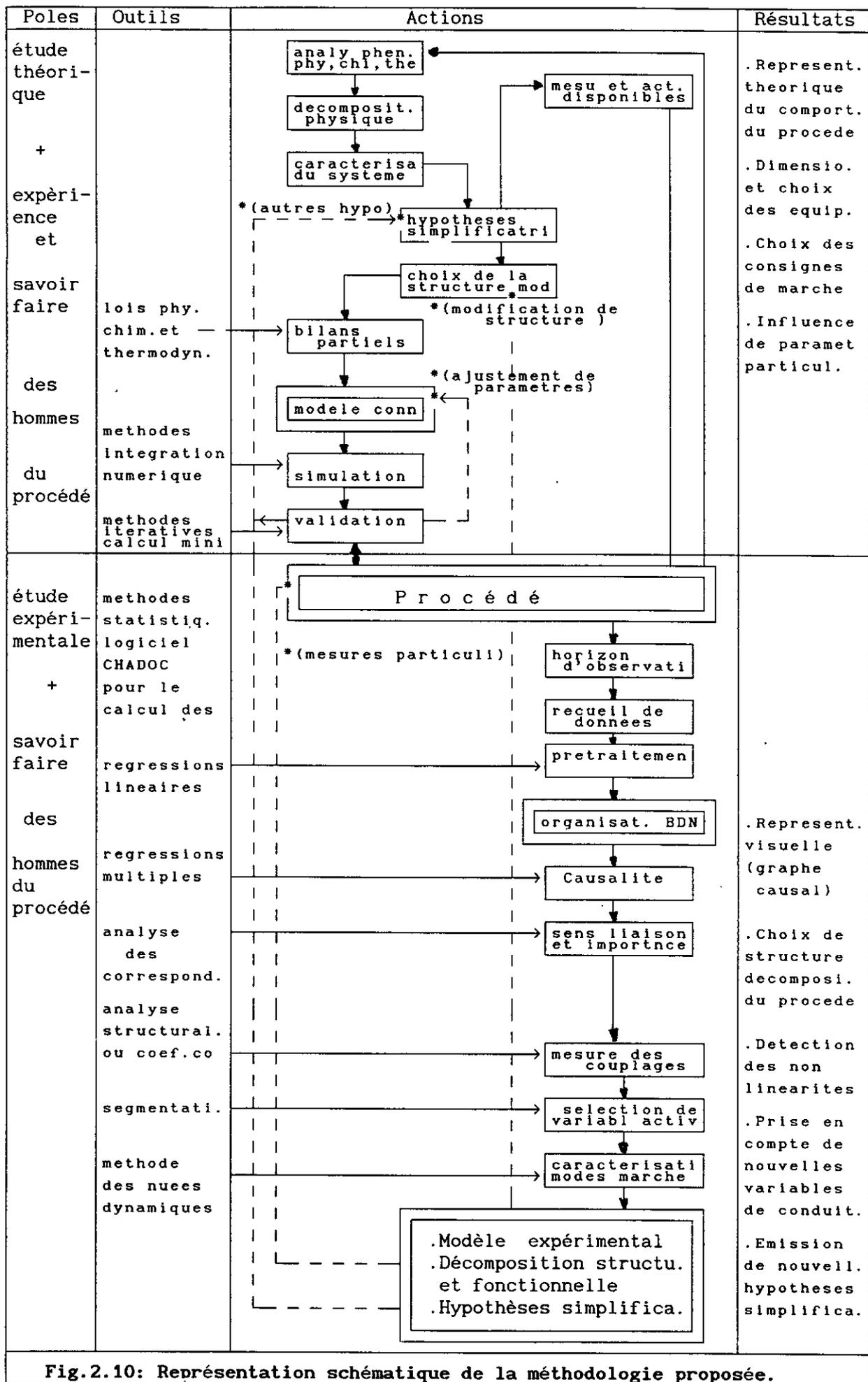


Fig.2.10: Représentation schématique de la méthodologie proposée.

CHAPITRE III

CHAPITRE III

DESCRIPTION DU PROCEDE DE CUISSON

3.1 Introduction

L'installation de traitement thermique des matières premières (atelier de cuisson) d'une cimenterie constituera l'application de base venant illustrer la méthodologie proposée.

Ce procédé a été choisi car il utilise dans son principe de base des phénomènes physiques, chimiques et énergétiques communs aux procédés industriels continus de production. Il serait donc représentatif de cette classe de systèmes.

Ce présent chapitre se propose de décrire ce procédé replacé dans son contexte global. Cette description précédée de quelques généralités sur le processus de fabrication de ciment comprend :

- . Une énumération des installations composant la cimenterie de AIN-TOUTA
- . Une description sommaire de l'installation de cuisson;
- . Une description des principaux phénomènes régissant le fonctionnement du four rotatif à ciment;
- . Une caractérisation de ce procédé en tant que système.

L'environnement informatique du procédé sera brièvement décrit vu son importance sur la collecte des données.

3.2 Principe de la fabrication du ciment

La fabrication du ciment consiste à faire passer dans un four rotatif un mélange de 80 % de calcaire (essentiellement CaCO_3) et 20 % d'argile (avec 14 % SiO_2 , 4% de Al_2O_3 et 2% de Fe_2O_3). Ces matières dosées sont portées à une température voisine de 1500°C pour permettre leur combinaison [17,18].

3.3 Différents types de procédés

Le ciment est fabriqué selon trois procédés (Fig.3.1), chacun présentant

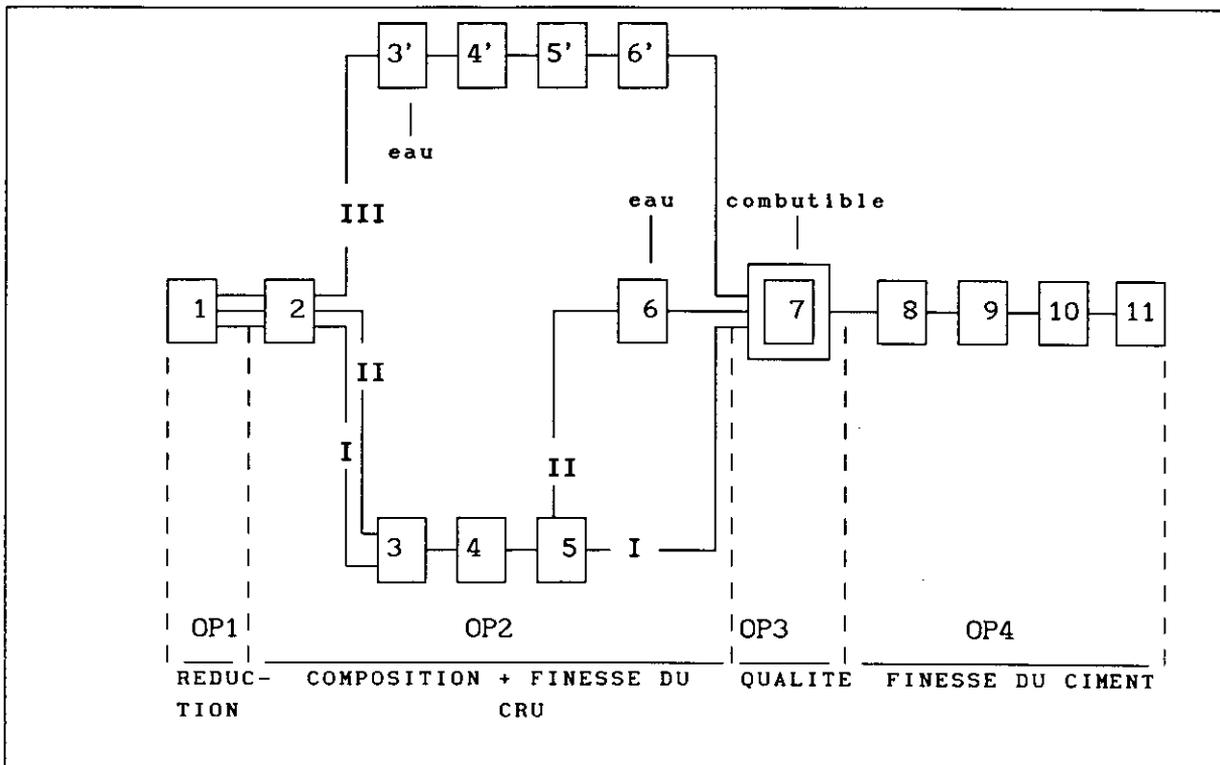
des avantages et des inconvénients. Les considérations économiques et les qualités des matières premières restent primordiales dans le choix du procédé à utiliser (Tabl.3.1).

Procédés	Avantages	Inconvénients	Observations
Voie sèche	.Consommation calorifique 900 Kcal / Kg Cl. (770) pour RSP .Installation simple	.Investissement couteux .Problèmes de dépoussièrage .Problème de concrétions	.Employé quand les matières sont très pauvres ou pauvres en eau
Voie Semi-sèche	.Consommation calorifique 800 Kcal/Kg Clin .Bonne régularité de marche.	.Investissement et entretien couteux .Nécessité de granulation régulière.	.Employé quand les matières sont naturellement pauvres en eau.
Voie humide	.Homogénéisation très bonne et facile à réaliser	.Forte consommation calorifique	.Employé pour des matières riches en eau et faciles à délayer.

Tableau 3.1 : Comparaison des trois procédés.

3.4 Procédé de cuisson dans l'ensemble du processus

La fabrication du ciment comporte plusieurs opérations (Tab.3.2). Selon le procédé employé, ces opérations peuvent présenter des différences notoires. Cependant la cuisson est identique pour les trois procédés et constitue leur point commun. C'est sans doute l'opération la plus sensible et la plus importante. Au cours de la cuisson s'effectuent les réactions chimiques essentielles. La cuisson détermine en grande partie, les qualités du ciment, les autres opérations peuvent, il est vrai les influencer, mais il n'est pas toujours possible de remédier aux défauts de la cuisson. Cette opération participe à raison de près de 50 % au coût de la production du ciment. Elle détermine de façon conséquente la consommation d'énergie.



Opérations :

- OP1 : Extraction des matières premières (M.P)
- OP2 : Préparation des M.P ou production du cru
- OP3 : Cuisson ou production du clinker
- OP4 : Préparation du ciment

Ateliers :

- 1 : Carrières
- 2 : Concassage des matières premières
- 3,3' : Stockage, délayage
- 4,4' : Broyage du cru
- 5,5' : Dosage, homogénéisation-stockage farine cru
- 6,6' : Granulation, stockage
- 7 : Cuisson
- 8 : Stockage clinker
- 9 : Broyage du clinker
- 10 : Stockage du ciment
- 11 : Expéditions du ciment

Procédé :

- I : Procédé par voie sèche
- II : Procédé par voie semi-sèche
- III : Procédé par voie humide

Fig.3.1 : Principe de fabrication du ciment.

OP	DESIGNATION DE L'OPERAT .	BUT DE L'OPERATION	OBSERVATIONS
OP1	Extraction des matières premières de l'écorce terrestre.	Préparer les blocs de matière	Identique quel que soit le procédé
OP2	Production du cru comprend .le concassage .la préhomogénéisation (stockage amont du broyeur) .le broyeur .l'homogénéisation cru stockage aval du broyeur	Préparer la matière à la cuisson et garantir au cru la composition et la finesse requises	Présente des différences notoires selon le procédé utilisé (delayage en voie humide semi-seche.)
OP3	Traitement thermique du cru	Transformer les matières , obtenir le clinker	Représente le point commun des 3 procédés
OP4	Préparation du ciment	Garantir la finesse du ciment	Identique aux 3 procédés

Tableau 3.2 : Opérations fondamentales du procédé de cuisson.

3.5 Description de l'installation de cuisson

Cette installation fait partie de la cimenterie de AIN-TOUTA (BATNA). Cette cimenterie d'une capacité de $2 \times 500.000 \text{ t / an}$ (2 fours) utilise le procédé par voie sèche. Elle est composée de plusieurs unités (Fig.3.2). Les carrières (argile et calcaire) d'où sont extraites les matières premières. Les stations de concassage (argile et calcaire 1000 t/h , ajouts 150 t/h) destinées à réduire la taille des blocs de matières. L'atelier de broyage cru est composé de 2 broyeurs de 140 t/h chacun. L'atelier de cuisson regroupe 2 fours dont le débit clinker est de 1560 t/J . Le broyage du ciment comprend 2 broyeurs de 100 t/h chacun. Les expéditions du ciment s'effectuent à partir de 2 stations, une pour les camions et une pour les wagons .

L'atelier de cuisson (Fig.3.3) représente la partie centrale de la cimenterie. Il est composé de deux lignes de cuisson en tout point identiques et complètement indépendantes du point de vue fonctionnement. Une ligne est constituée de trois parties inter-dépendantes : Le préchauffeur, le four et le refroidisseur.

3.5.1 Préchauffeur

C'est un échangeur gaz/matière, il reçoit la matière par son extrémité haute et réalise sa décarbonatation partielle (25 % à 30 %). Ce préchauffeur est du type à cyclones, il possède 4 étages. Le préchauffeur améliore le rendement thermique de l'installation de cuisson.

3.5.2 Four rotatif

Il complète la décarbonatation et réalise la réaction de clinkérisation. Il est constitué d'un cylindre d'acier de 68 m de longueur effective et de 4,6 m de diamètre. Il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires qui protègent les tôles des températures élevées (1850°C pour les gaz et 1450°C pour la matière).

Il tourne sur lui même à vitesse réglable lente (0.67 à 2 tr/mn). Sa rotation et son inclinaison (3.5 %) produisent l'avance naturelle de la matière. En amont, la matière pénètre à la température de 800°C . En aval, les gaz chauds (1850°C) sont injectés, à l'aide de la tuyère. Il se produit un échange à contre-courant entre les gaz et la matière. Au fur et à mesure que la matière avance, elle se chauffe et se transforme.

Le four réalise la poursuite de la décarbonatation, la dissociation des minéraux et la recombinaison de la chaux (CaO) avec les principaux oxydes.

On distingue trois zones relatives à ces mécanismes physico-chimiques, la zone de décarbonatation, la zone de clinkérisation et la zone de refroidissement (Tab.3.3). Les limites entre ces différentes zones dépendent des températures et des réactions chimiques intervenant dans la matière. Cependant, elles varient dans le temps et leurs longueurs dépendent de la quantité d'énergie thermique reçue des gaz et de la paroi.

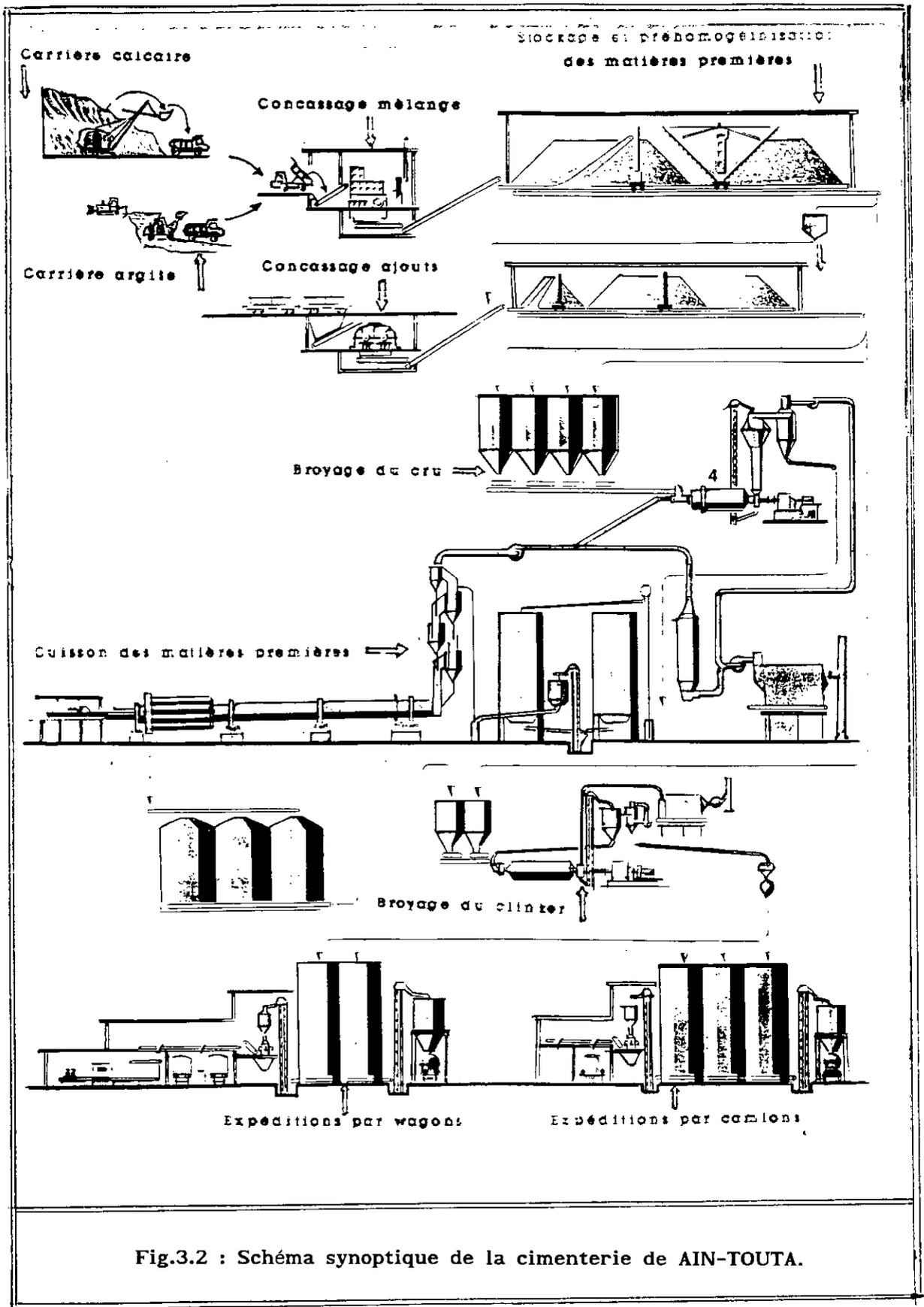


Fig.3.2 : Schéma synoptique de la cimenterie de AIN-TOUTA.

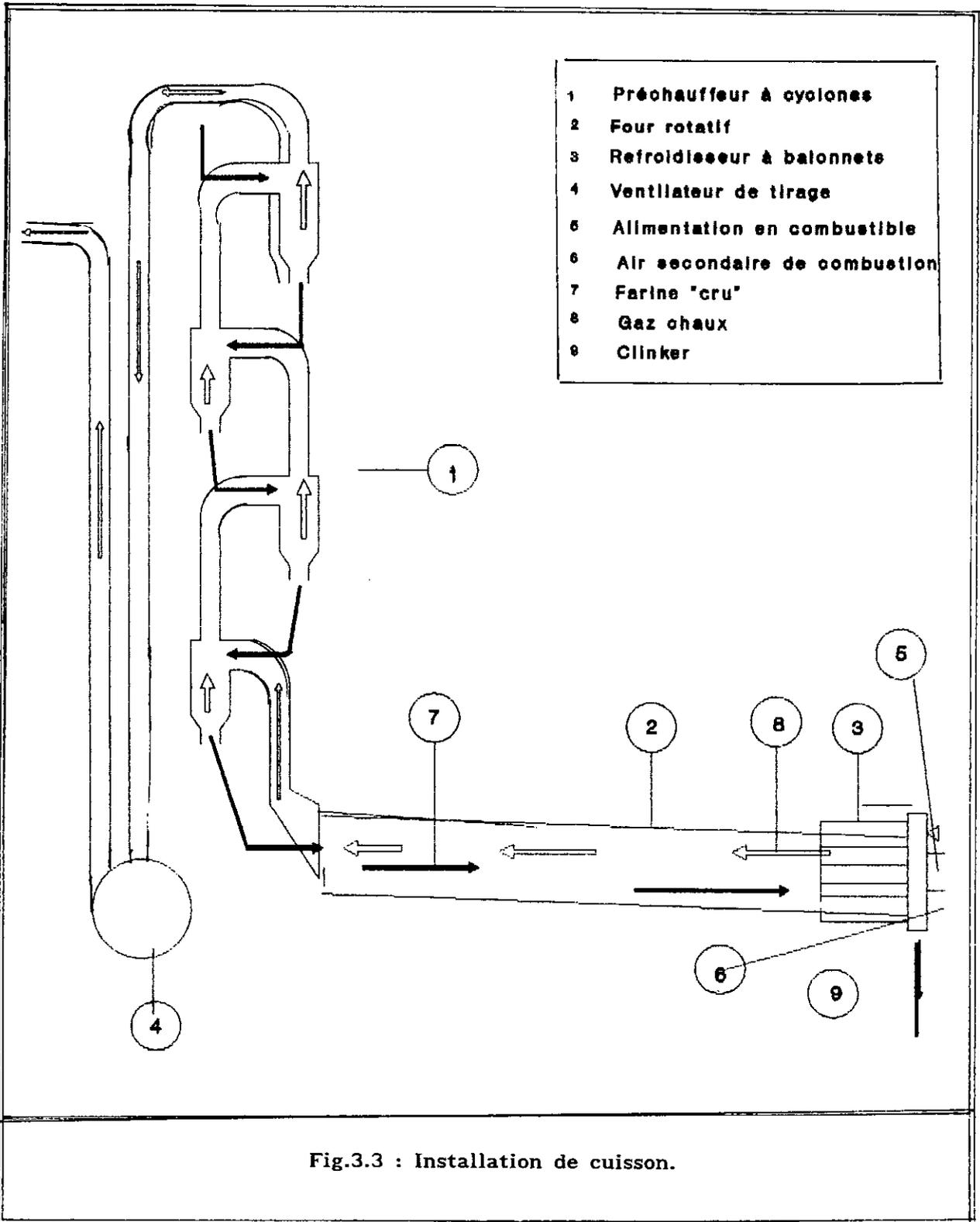


Fig.3.3 : Installation de cuisson.

TEMP. (°C)	REACTION CHIMIQUE	NATURE	ENTH.REACT. Kcal/Kg cli	ZONE FOUR (m)
600 à 1100	$\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Décarbonatation	End.Th.	425	0 à 20
1100 à 1200	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C ₂ S) Début de recombinaisons	Exo.Th.	-175	20 à 30
1250	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \longrightarrow \text{C}_4\text{AF}$ $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \longrightarrow \text{C}_3\text{A}$ Début de la phase liquide C ₄ AF = 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ C ₃ A = 3CaO.Al ₂ O ₃	End.Th End.Th	97 18	30 à 40 35 à 40
1250 à 1500	Poursuite de la clinkérisation. $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow \text{C}_2\text{S}$ $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \longrightarrow 3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C ₃ S)	Exo.Th. End.Th	-175 35	40 à 50 40 à 50
1200 à 100	Cristallisation Refroidissement			50 à 68

Tableau 3.3 : Réactions chimiques et longueurs des zones.

3.5.3 Refroidisseur

Il refroidit le clinker sortant du four, et récupère de la chaleur. Il agit sur le rendement thermique de l'installation de cuisson et sur la qualité du clinker. L'installation de cuisson de AIN-TOUTA est dotée d'un refroidisseur à balonnets. Ce sont des tubes en tôle d'acier de 19,8 m de long et de 2,1 m de diamètre munis de releveurs. Le clinker est refroidi au contact de l'air frais injecté dans les tubes.

3.6 Principaux phénomènes du procédé de cuisson

Deux aspects fondamentaux indissociables caractérisent le fonctionnement du four. L'aspect thermique et l'aspect chimique.

3.6.1 L'aspect thermique

Il est extrêmement important car il conditionne la cuisson du produit, sa

qualité et l'apport calorifique. Il influe considérablement sur l'évolution, et la vitesse des réactions chimiques. L'aspect thermique est décomposable en deux phénomènes :

a. Les mécanismes d'échange de chaleur

Ils constituent l'élément fondamental du fonctionnement thermique du four et font intervenir les trois modes de transmission de la chaleur [19,20]. Le rayonnement a lieu entre d'une part les gaz et la matière et d'autre part la paroi et la matière. La convection se produit entre les gaz et la matière. La conduction (appelée effet paroi) intervient au contact du talus matière et de la paroi lors de la rotation du four.

Ces mécanismes de transfert de chaleur ont été étudiés par A. Folliot [20], qui a montré que les modes dominants (Fig.3.4) à considérer, dans le cas du four, sont le rayonnement et la convection.

b. La combustion

Le fonctionnement du four nécessite un apport important de chaleur. Cet apport est fourni par une flamme de diffusion [21,22,23]. Les caractéristiques de cette flamme dépendent de la qualité du combustible (composition, PCI), de la température de l'air secondaire et de l'excès d'air.

6.2 L'aspect chimique

L'aspect chimique (Fig.3.5) concerne la transformation des matières dans le four.

Le processus chimique du four à ciment est en réalité beaucoup plus complexe [24]. Des facteurs souvent impossible à prendre en considération influent sur la fabrication du clinker. Nous citerons :

Les variations des compositions chimiques, minéralogiques et granulométriques du cru;

Les teneurs en soufre du combustible;

Les conditions de refroidissement et le gradient de température dans le four.

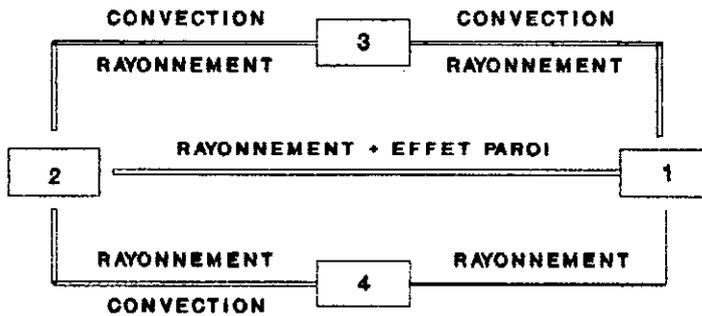
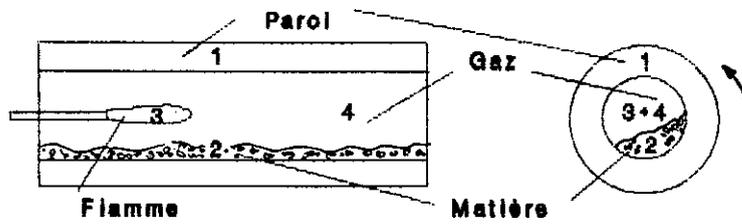
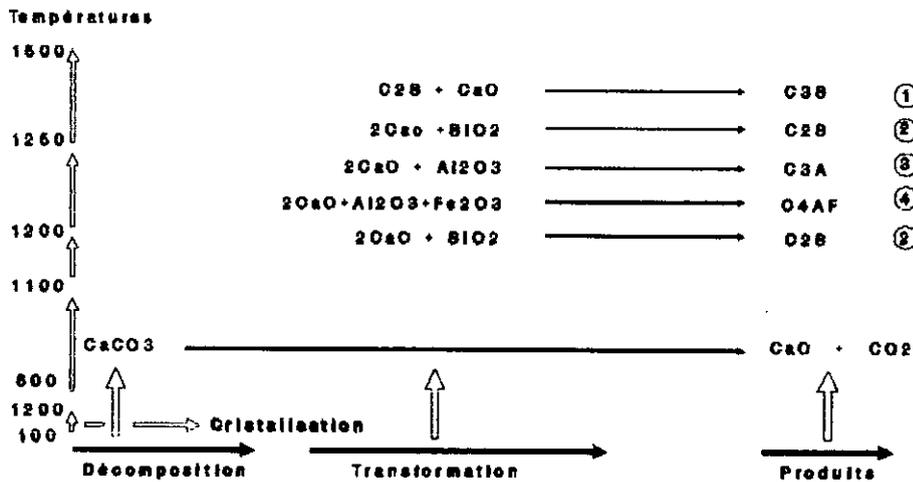


Fig.3.4 : Modes de transfert de chaleur dans le four à ciment.



- ① $C_3S = 3CaOSiO_2$: Confère au ciment sa résistance maxi à 7 j
- ② $C_2S = 2CaOSiO_2$: Développe la résistance à long terme
- ③ $C_3A = 3CaOAl_2O_3$: Donne au ciment de très bonnes résistances initiales
- ④ $C_4AF = 4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$: Conditionne la couleur du ciment
- ② $C_2S = 2CaOSiO_2$: Confère au ciment sa résistance maxi à 7 j

Fig.3.5 : Principaux phénomènes chimiques dans le four et leurs produits.

A travers ce profil, une appréciation de l'état du fonctionnement du four peut être faite. Plus les courbes de variation des températures présentent des écarts importants, plus les échanges thermiques sont faibles. Tant que les teneurs en CaO après la zone de cuisson restent inférieurs à 3 % et voisines de cette limite, le critère de consommation minimum d'énergie est satisfait [25].

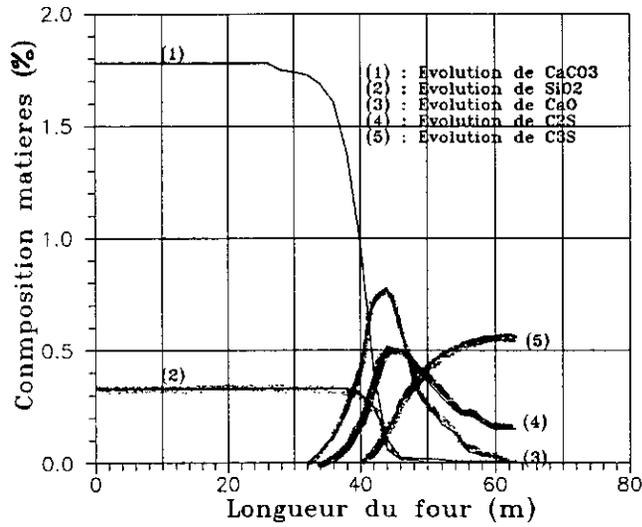


Fig.3.6,a : Profil chimique du four.

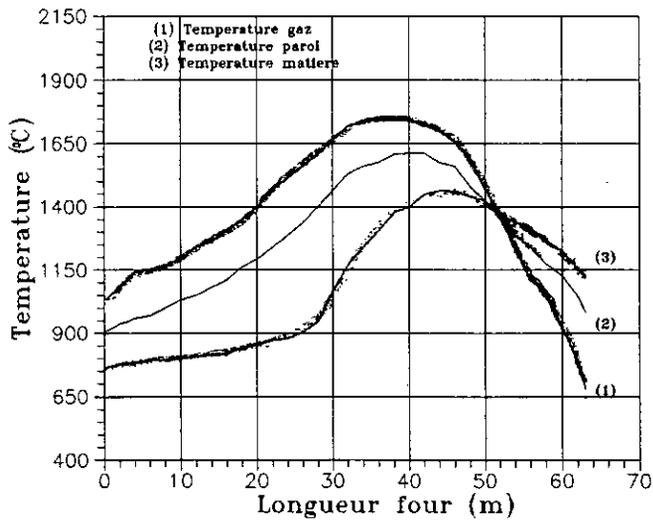
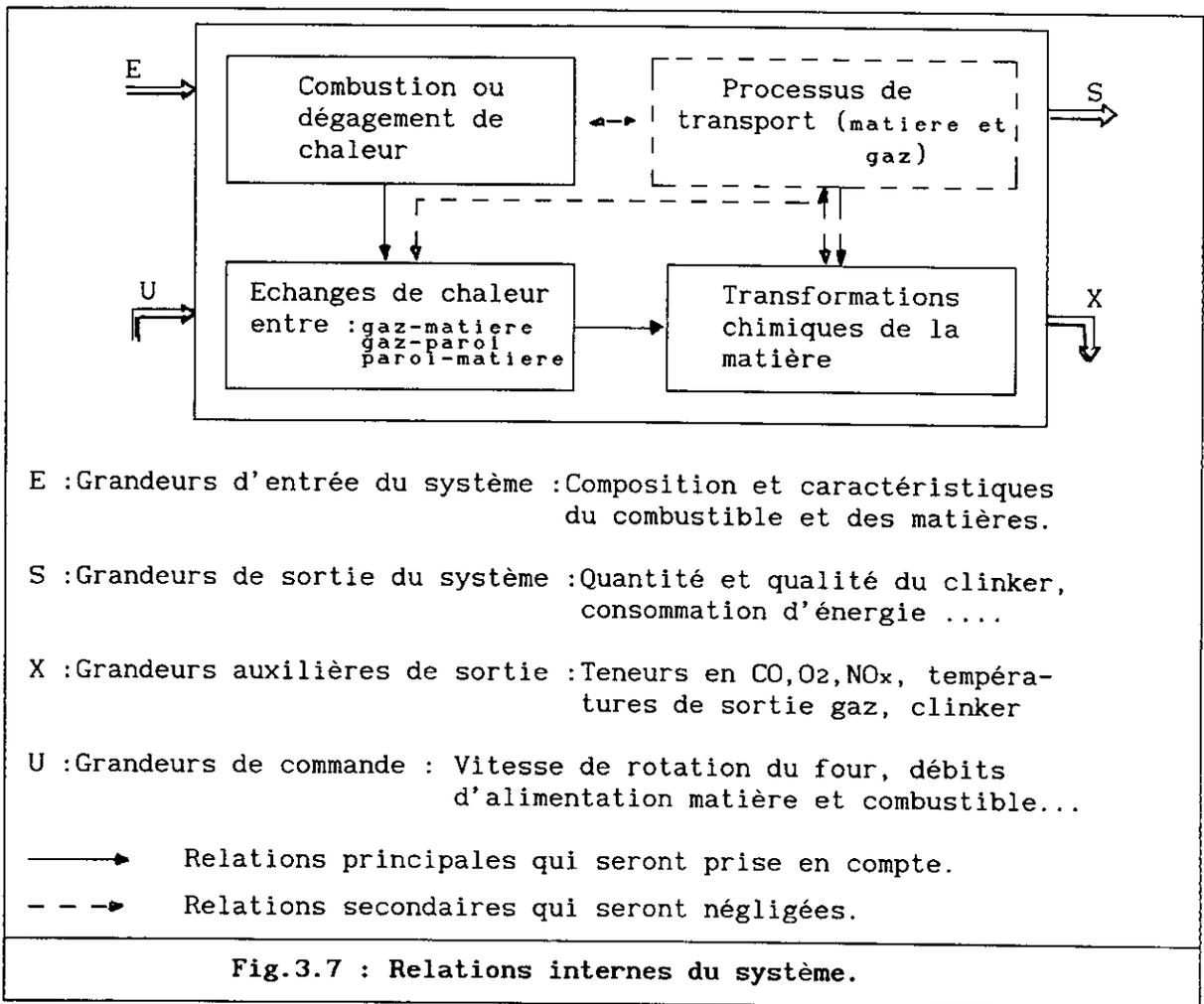


Fig.3.6,b : Profil thermique du four.

3.7 Caractérisation du système four à ciment

Le four remplit quatre fonctions du processus de cuisson, il achemine les gaz et la matière, il sert de chambre de combustion, il transmet la chaleur à la matière, et enfin il constitue le milieu réactionnel pour les transformations chimiques de la matière.

Les inter-actions entre ces diverses fonctions (Fig.3.8) sont extrêmement complexes et difficiles à identifier. Aussi, nous ne retiendrons que les connexions déterminantes sur le résultat du processus de cuisson. Ces relations sont celles reliant la production de la chaleur et ses mécanismes de transmission et celles existantes entre la transmission de la chaleur et les transformations chimiques de la matière.



Le fonctionnement du four influence plusieurs paramètres, la qualité du clinker, le niveau de production et la consommation d'énergie. Les phénomènes d'échanges de chaleur, mis en jeu sont régis par des lois non-linéaires. Ces phénomènes sont souvent bruités. L'environnement du four pose d'énormes difficultés pour disposer de mesures fiables caractérisant son fonctionnement.

Le four en tant que système à commander, est caractérisé par l'aspect multivariables, les non-linéarités entre les variables et les non stationnarités. A ces caractéristiques s'ajoutent les critères multiples de commande, les contraintes de son environnement ainsi que les difficultés d'identifier les inter-relations entre les phénomènes complexes mis en jeu. Ces considérations sont propres aux processus industriels continus de production et permettent de qualifier le four de système complexe.

3.8 Environnement informatique du procédé

Le système de conduite (Fig.3.8) implanté sur la cimenterie de AIN-TOUTA utilise un mini ordinateur auquel sont connectés des systèmes spécifiques tels que le SEMSCANNER, le FUZZYLOGIC. Les ateliers directement contrôlés génèrent pour leur bonne marche et vis à vis du système près de 3500 entrées logiques (tout ou rien), 1600 sorties logiques, 580 entrées analogiques et 100 sorties analogiques. Ce système assure diverses fonctions.

a. la surveillance:

Elle porte sur les valeurs des paramètres (température, pression, débit..) les états des moteurs, les valeurs de contrôle laboratoire (composition des matières et des produits), le comptage (des consommations gaz, électricité, production, heures de marche), le contrôle des alarmes et le traitement individuel de point de mesure.

b. Le contrôle:

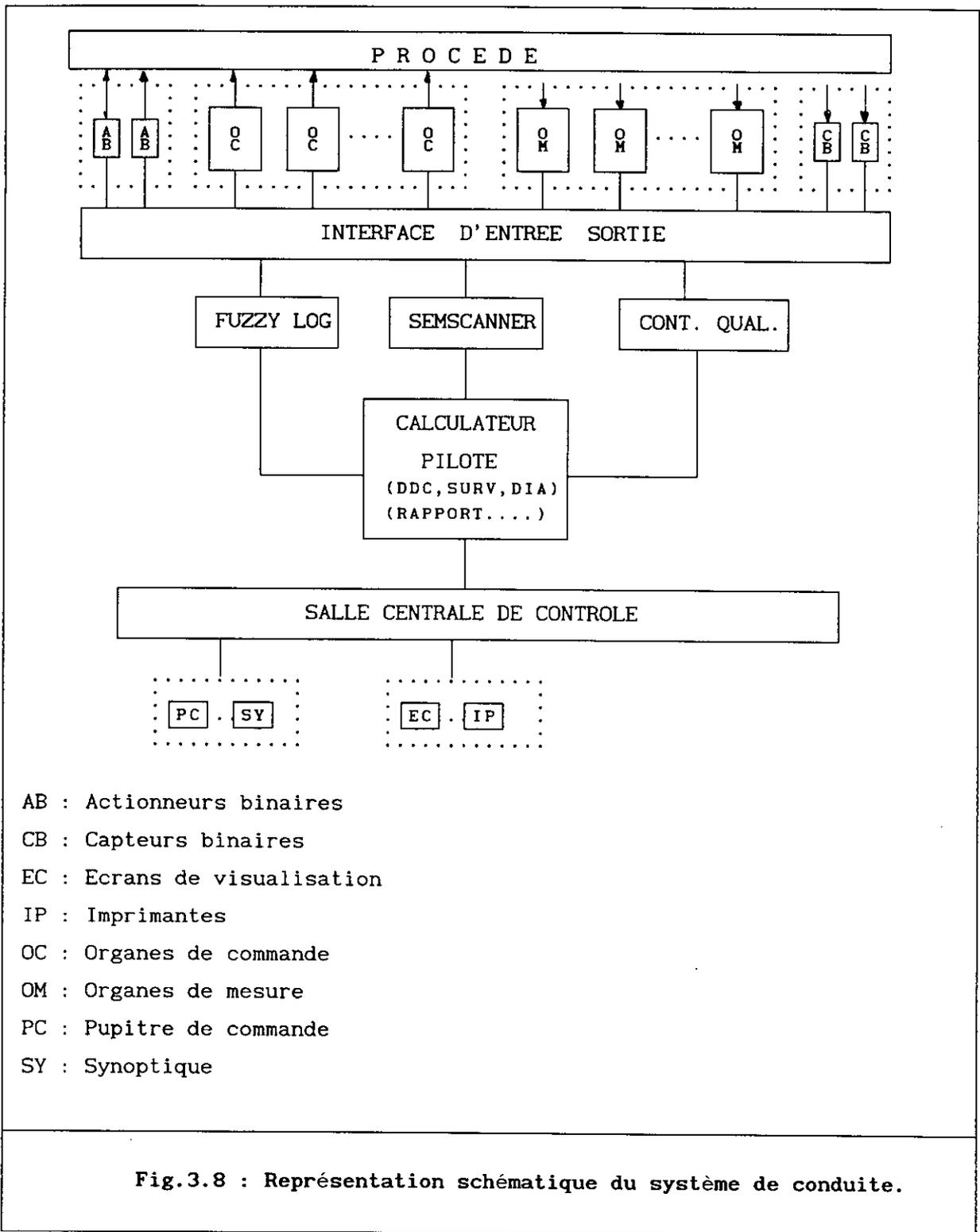
Il réalise la commande continue (D.D.C, FUZZYLOGIC, SEMSCANNER) et la commande séquentielle (démarrage et arrêt des moteurs).

c. Le dialogue:

Il permet de manière automatique ou sur demande de l'opérateur d'afficher, des valeurs de points de mesure, des alarmes, des graphiques, des données de programmation . Il permet également l'introduction de valeurs de consignes, la programmation des règles de contrôle FUZZY et l'édition de rapports de marche.

d. les éditions:

L'édition des rapports concerne les journaux de déroulement, les rapports d'usine, les rapports d'alarme, les tracés des courbes de déroulement (état de marche) et les tracés de la température virole du four.



CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

4.1 Objectifs de l'analyse

Le cahier de charge de cette étude limite l'objectif de l'analyse à la construction du modèle de connaissance du procédé et à la caractérisation de l'évolution de son comportement.

Les résultats de ces étapes, serviront ultérieurement à l'élaboration d'un modèle " hybride ". Ce modèle sera apte à la commande en temps réel du procédé. Sa structure est obtenue par simplification du modèle de connaissance et ses paramètres sont déterminés au moyen de simulations successives à partir de mesures réelles (Fig.4.1).

4.3 Etude théorique du procédé

4. 3.1 Analyse des phénomènes physiques du procédé

a. Décomposition physique de l'installation de cuisson

L'installation de cuisson est composée de trois éléments ayant chacun une existence physique propre. Ces éléments sont liés entre eux par des flux de matière et d'énergie. Pour l'analyse de cette installation, il est plus facile de considérer chacun de ses éléments séparément et de s'intéresser ensuite à leurs couplages. Cette démarche permet de décomposer l'installation de cuisson en trois sous-systèmes (Fig.4.2).

L'analyse et la commande optimale des sous-systèmes S/S1 et S/S3 ont fait l'objet d'une étude séparée [26]. La présente étude portera sur le système S/S2 (four). Une fois la commande optimale de ce dernier calculée, il est possible d'appliquer la méthode de décomposition-coordination, en vue d'optimiser l'ensemble de l'installation de cuisson.

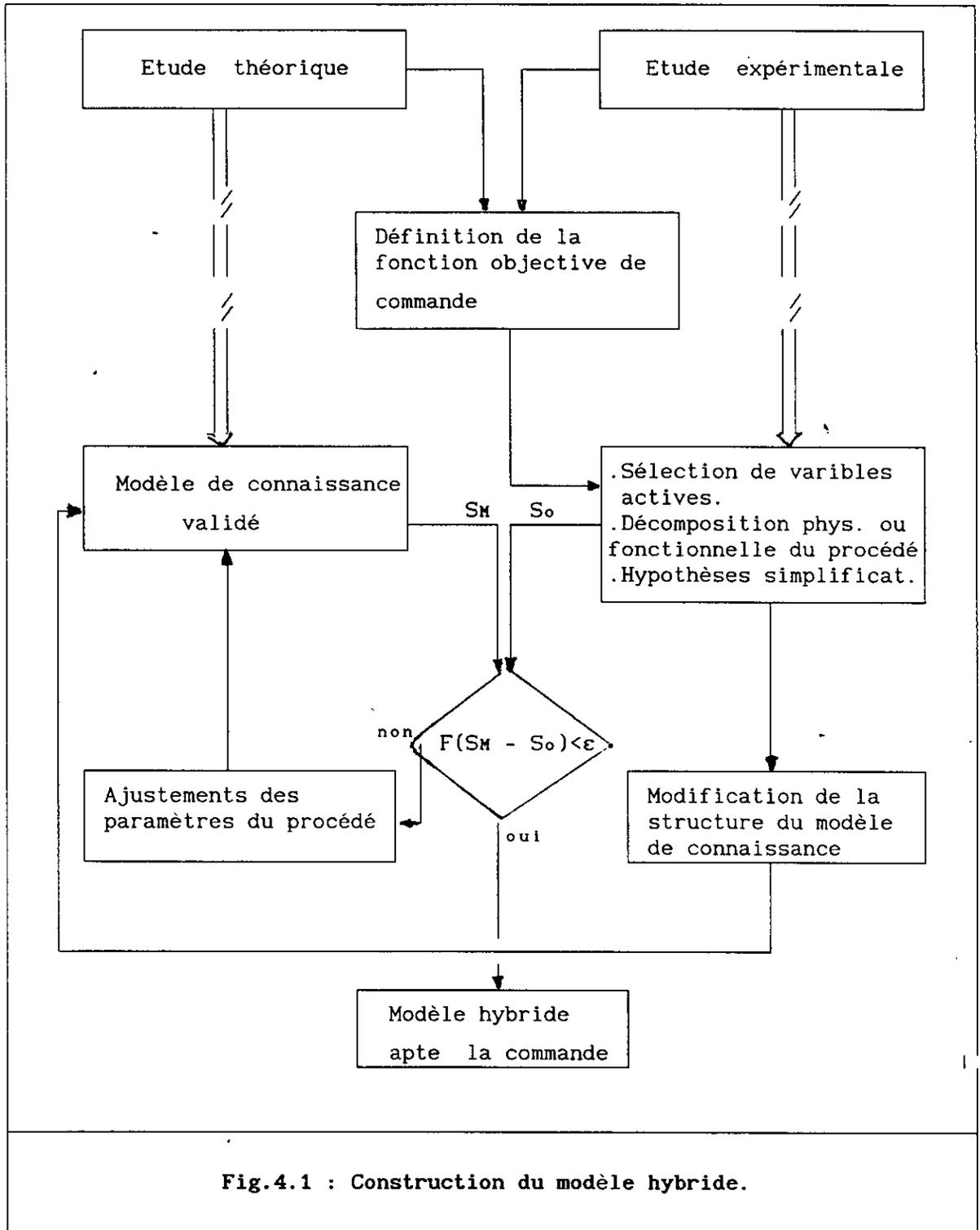
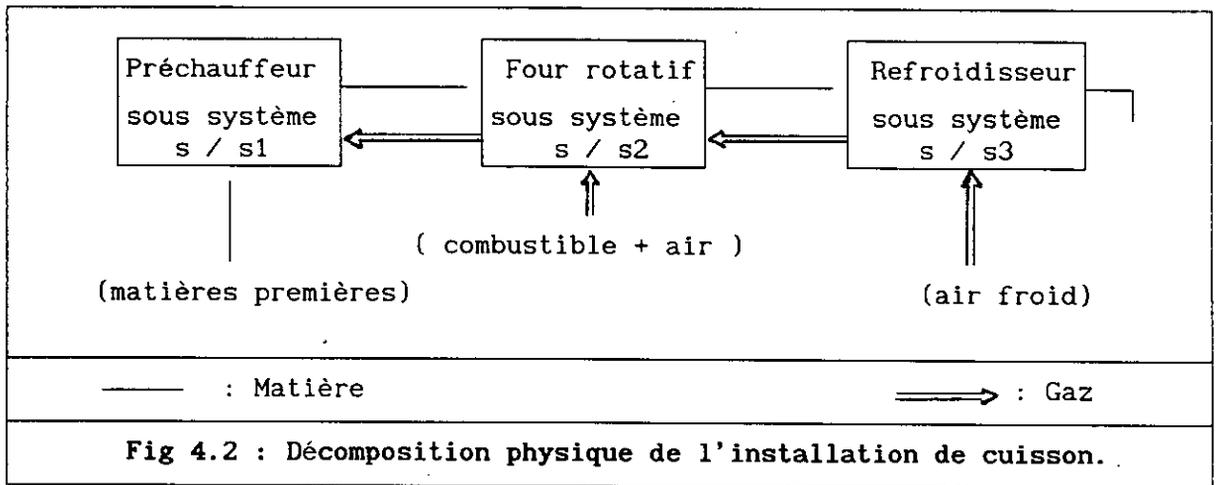


Fig.4.1 : Construction du modèle hybride.



b. Phénomènes physiques, chimiques et thermiques du four

Le fonctionnement du four est essentiellement déterminé par deux aspects, l'aspect thermique (échange de chaleur et sa production) et l'aspect chimique (réactions chimiques de transformation des matières).

La mise en équation de tous ces phénomènes comporte d'énormes difficultés. A la nature complexe des phénomènes physico-chimiques mis en jeu, s'ajoute la dynamique d'ensemble du système. Cette dynamique comprend, la rotation du four, le déplacement relatif de la matière qui renouvelle sans cesse ses surfaces de contact avec les gaz et la paroi, ainsi que le mouvement des gaz chargés de poussières. Afin de s'affranchir partiellement de ces contraintes et d'aboutir à une formulation des équations décrivant ces phénomènes, des hypothèses simplificatrices s'imposent.

4.3.2 Hypothèses simplificatrices

Nous reprendrons, pour l'essentiel, les hypothèses simplificatrices qui ont servi à l'élaboration d'un modèle thermo-chimique du four à ciment [27,28, 29], et nous considérerons que :

.Les échanges de chaleur entre gaz et matière sont des échanges à contre-courant;

- .Les températures des gaz, de la paroi et de la matière, ne dépendent que du temps et de la position le long du four;
- .Les poussières contenues dans le flux des gaz ne sont pas prises en considération;
- .Les rayons, interne et externe, du four sont constants;
- .Les vitesses des gaz et de la matière sont constantes;
- .Les coefficients de transferts, les chaleurs (spécifiques, latentes et de réactions) ne dépendent ni de la température ni de la position;
- .La conduction dans la matière et dans la direction axiale de la paroi est négligeable;
- .Les vitesses des réactions chimiques suivent la loi d'ARRHENIUS.

4.3.3 Formulation du modèle

a. Aspect thermique

Il est décrit par les équations donnant l'évolution des températures (T_g, T_m, T_p) et la chaleur délivrée par la combustion (Q_r). La formulation de ces équations passe par l'élaboration du bilan thermique d'une section élémentaire du four de longueur Δx [29].

Soit une section élémentaire (Fig.4.3):

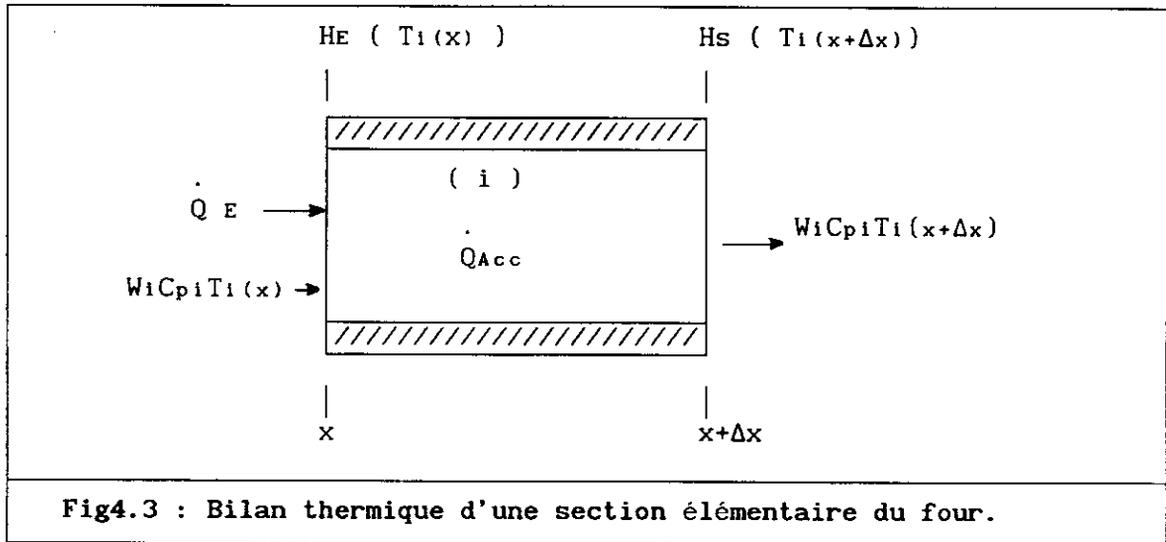


Fig4.3 : Bilan thermique d'une section élémentaire du four.

L'équation donnant le bilan thermique s'écrit :

$$\dot{Q}_{1Acc} + H_s = \dot{Q}_{1E} + H_E \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{1Acc} = (\rho_1 A_1) \Delta x C_{v1} \frac{\delta T_1}{\delta t} \quad (4.1.a)$$

$$H_E = W_1 C_{p1} T_1(x) \quad (4.1.b)$$

$$H_s = W_1 C_{p1} T_1(x+\Delta x) \quad (4.1.c)$$

Avec :

- A_1 : Aire de l'élément i
- C_{p1} : Chaleur spécifique isobare de i
- C_{v1} : Chaleur spécifique isométrique de i
- H_E : Enthalpie de i à l'entrée de la section
- H_s : Enthalpie de i à la sortie de la section
- \dot{Q}_{Acc} : Energie accumulée par l'élément i
- \dot{Q}_{1E} : Energie transmise à i à l'entrée de la section
- $T_1(x)$: Température de i à l'entrée de la section
- $T_1(x+\Delta x)$: Température de i à la sortie de la section
- W_1 : Débit de i supposé constant
- ρ_1 : Densité de i

Les équations (4.1.a,b,c) donnent :

$$\rho_1 A_1 \Delta x \cdot C_{v1} \cdot \frac{\delta T_1}{\delta t} = -W_1 C_{p1} \cdot [T_1(x+\Delta x) - T_1(x)] + \dot{Q}_{1E} \quad (4.2)$$

En posant :

$$W_1 = V_1 \rho_1 A_1 \quad \text{avec } V_1 : \text{vitesse de } (i)$$

Nous auront:

$$\rho_1 A_1 C_{p1} V_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} = \dot{q}_{1E} - \rho_1 A_1 C_{v1} \frac{\delta T_1}{\delta t} \quad (4.3)$$

Avec :

$$\dot{q}_{iE} = \frac{Q_{iE}}{\Delta x} ; \text{ chaleur transmise à } i \text{ par unité de longueur du four.}$$

L'équation (4.3) représente l'équation générale du bilan thermique d'une section du four d'où seront déduites les équations décrivant les évolutions des températures T_g , T_m et T_p .

Le terme \dot{q}_{iE} représente la quantité de chaleur reçue pendant δt et peut être calculée si on connaît les mécanismes de transfert de chaleur dans le four. Les modes dominants de ces transferts sont le rayonnement plus la convection entre les gaz et la matière et les gaz et la paroi, le rayonnement plus la conduction (effet paroi) entre la paroi et la matière [20].

si l'on suppose les effets de transfert de chaleur par rayonnement et convection cumulatifs, le terme \dot{q}_{iE} aura pour expression:

a. Dans le cas des gaz (i=g)

$$\dot{q}_g = \alpha_1.(T_m - T_g) + \alpha_2.(T_p - T_g) + q_f \quad (4.4)$$

avec : q_f chaleur dégagée par la combustion pendant δt

b. Dans le cas de la matière (i=m)

$$\dot{q}_m = \alpha_1.(T_g - T_m) + \alpha_3.(T_p - T_m) + q_c \quad (4.5)$$

avec : q_c chaleur fournie par les réactions exothermiques pendant δt

c. Dans le cas de la paroi (i=p)

$$\dot{q}_p = \alpha_2.(T_g - T_p) + \alpha_3.(T_m - T_p) + \alpha_4.(T_a - T_p) \quad (4.6)$$

Si l'on considère que les gaz atteignent leur état stable très rapidement par rapport à la matière et à la paroi alors :

$$\frac{\delta T_g}{\delta t} = 0.$$

Comme il n'y a pas de transfert de chaleur dans la direction axiale de la paroi alors :

$$\frac{\delta T_p}{\delta X} = 0.$$

Finalement le comportement thermique du four est décrit par le système d'équations suivant :

$$A_m V_m \rho_m C_{pm} \frac{\delta T_m}{\delta X} = \alpha_1 (T_g - T_m) + \alpha_3 (T_p - T_m) + A_m \cdot q_c - A_m \rho_m C_{pm} \frac{\delta T_m}{\delta t} \quad (4.7)$$

$$A_g V_g \rho_g C_{pg} \frac{\delta T_g}{\delta X} = \alpha_1 (T_m - T_g) + \alpha_2 (T_p - T_g) + q_f \quad (4.8)$$

$$A_p \rho_p C_{pp} \frac{\delta T_p}{\delta t} = \alpha_2 (T_g - T_p) + \alpha_3 (T_m - T_p) + \alpha_4 (T_a - T_p) \quad (4.9)$$

Avec :

$$\alpha_1 = 2r_1 \cdot \sin(\theta/2) \cdot \left[f_2 + 1.73 \cdot 10^{-9} \cdot \epsilon_g \epsilon_m (T_g^2 + T_m^2) (T_g + T_m) \right] \quad (4.10)$$

$$\alpha_2 = r_1 \theta \left[f_1 + 1.73 \cdot 10^{-9} (1-h_0) \epsilon_g \epsilon_p (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g) \right] \quad (4.11)$$

$$\alpha_3 = r_1 \cdot (2\pi - \theta) \cdot \left[f_3 + 1.73 \cdot 10^{-9} h \cdot \epsilon_p \epsilon_m (T_m^2 + T_p^2) (T_m + T_p) \right] \quad (4.12)$$

$$\alpha_4 = 2\pi \cdot f_4 \cdot r_2 \quad (4.13)$$

$$A_p = 2\pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (4.14)$$

$$A_g = r_1^2 / 2 \cdot (\theta - \sin(\theta)) \quad (4.15)$$

$$A_m = r_1^2 / 2 \cdot (2\pi - \theta + \sin(\theta)) \quad (4.16)$$

$$h = 1 + 2 \cdot h_0 \cdot \sin(\theta/2) / (2\pi - \theta) \quad (4.16.b)$$

θ est calculé à partir des expressions suivantes [28]:

$$\sin^4(\theta/2) + NR.(2.r1).\sin^2(\theta/2) + 4.NR^2 = 0 \quad (4.17)$$

$$NR = \frac{(0.2091)^2(FA) \sqrt{F\theta r}}{r_1^2 (P) \rho_m} \quad (4.18)$$

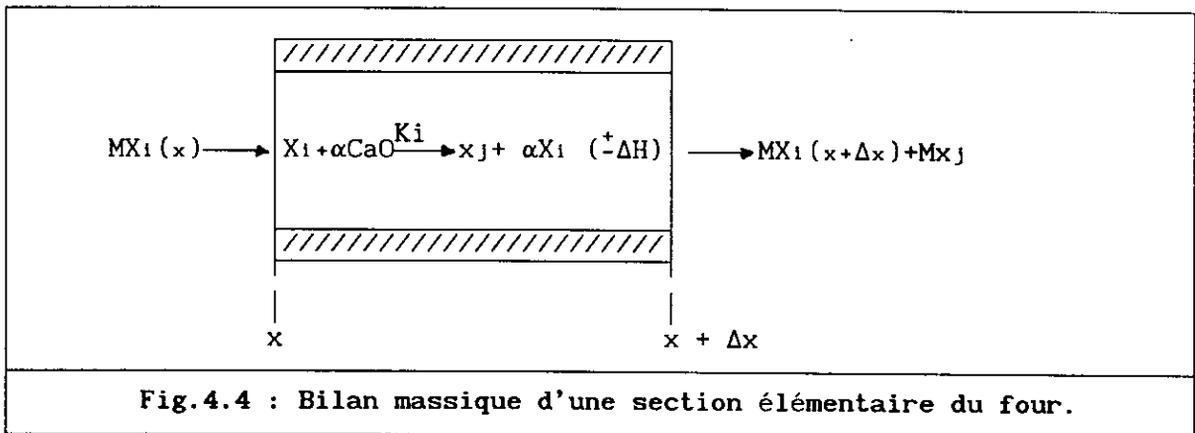
b. Aspect chimique

Le phénomène de transformation chimique de la matière dans le four, est décrit par les équations donnant les variations des éléments constitutifs de la matière le long du four et dans le temps. Nous ne nous intéresserons qu'à l'évolution des éléments essentiels à savoir :

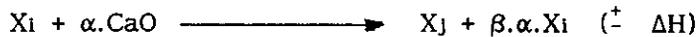
$CaCO_3$, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , C_2S , C_3S et C_4AF . En vue de simplifier la formulation des équations, les différents composants sont normalisés par rapport à la quantité de CaO en zone de cuisson (notée \overline{CaO}). Les notations suivantes ont été également adoptées :

$A = Al_2O_3/\overline{CaO}$, $F = Fe_2O_3/\overline{CaO}$, $S = SiO_2/\overline{CaO}$, $C = CaCO_3/\overline{CaO}$, $X = C_2S/\overline{CaO}$, $Y = C_3S/\overline{CaO}$, $Z = C_3A/\overline{CaO}$, $V = C_4AF/\overline{CaO}$

Pour écrire ces équations, nous poserons pour la section précédente du four (Fig.4.4) le bilan massique, pendant l'instant δt , pour le constituant (X_i) de la matière.



La réaction chimique de transformation partielle de X_i s'écrit :



Avec:

$M_{X_i}(x)$: Masse du constituant X_i entrant dans la section du four pour subir la transformation.

$M_{X_i}(x+\Delta x)$: Masse du constituant X_i sortant de la section du four et non transformée

M_{x_j} : Masse du produit de transformation de X_i

X_i : Quantité normalisée par rapport à CaO du constituant i de la matière subissant une transformation dans la section du four;

βX_i : proportion du constituant i de la matière non transformée

x_j : Quantité du produit j de la transformation chimique de X_i

K_i : Vitesse de la réaction chimique de transformation de X_i

ΔH : Quantité de chaleur absorbée ou dégagée par la la réaction chimique

α : Nombre de molécules de CaO entrant dans la transformation de X_i

A partir du bilan matière de X_i l'équation générale suivante est établie [27] :

$$\frac{\delta X_i}{\delta t} = \sum_j \frac{M_{x_j}}{\alpha M_{c'}} k_j x_j C'^{\alpha} - V_m \frac{\delta X_i}{\delta x} \quad (4.19)$$

Avec :

$$j = [A, C, S, F, \dots, Z]$$

La réaction chimique de transformation de chaque élément (A, F, \dots) et l'équation générale (4.19) nous permettent de déduire les équations aux dérivées partielles donnant le profil chimique du four.

Al_2O_3 :

$$\frac{\delta A}{\delta t} = \frac{M_A}{4 \cdot M_{c'}} K_v \cdot C'^4 \cdot A \cdot F + \frac{M_A}{3 \cdot M_{c'}} K_z \cdot C'^3 \cdot A - V_m \frac{\delta A}{\delta x} \quad (4.20)$$

. Fe₂O₃ :

$$\frac{\delta F}{\delta t} = - \frac{M_F}{4 \cdot M_{C'}} K_V \cdot C'^4 \cdot A \cdot F - V_m \frac{\delta F}{\delta x} \quad (4.21)$$

. SiO₂ :

$$\frac{\delta S}{\delta t} = - \frac{M_S}{2 \cdot M_{C'}} K_X \cdot S \cdot C'^2 - V_m \frac{\delta S}{\delta x} \quad (4.22)$$

. CaCO₃ :

$$\frac{\delta C}{\delta t} = - \frac{M_C}{M_{C'}} K_1 \cdot C - V_m \frac{\delta C}{\delta x} \quad (4.23)$$

. C₂S :

$$\frac{\delta X}{\delta t} = \frac{M_X}{2 \cdot M_{C'}} K_X \cdot C'^2 \cdot S - \frac{M_X}{M_{C'}} K_Y \cdot C' \cdot X - V_m \frac{\delta X}{\delta x} \quad (4.24)$$

. C₃S :

$$\frac{\delta Y}{\delta t} = \frac{M_Y}{M_{C'}} K_Y \cdot C' \cdot X - V_m \frac{\delta Y}{\delta x} \quad (4.25)$$

. C₃A :

$$\frac{\delta Z}{\delta t} = \frac{M_Z}{3 \cdot M_{C'}} K_Z \cdot C'^3 \cdot A - V_m \frac{\delta Z}{\delta x} \quad (4.26)$$

. C₄AF :

$$\frac{\delta V}{\delta t} = \frac{M_V}{4 \cdot M_{C'}} K_V \cdot C'^4 \cdot F - V_m \frac{\delta V}{\delta x} \quad (4.27)$$

. CaO :

$$\begin{aligned} \frac{\delta C'}{\delta t} = & K_1 \cdot C - K_Y \cdot C' \cdot X - K_X \cdot S \cdot C'^2 - K_Z \cdot C'^3 \cdot A \\ & - K_V \cdot C'^4 \cdot A \cdot F - V_m \frac{\delta C'}{\delta x} \end{aligned} \quad (4.28)$$

4.3.4 Simulation et validation du modèle

Une fois construit, le modèle de connaissance doit être simulé et validé.

a. principe de la simulation

La simulation suppose un découpage en tranches du procédé, et la connaissance des conditions aux limites (valeurs des paramètres à l'entrée du four). Elle consiste à adopter au départ des valeurs moyennes très vraisemblables pour les divers paramètres du modèle et à calculer ensuite les profils thermique ($T_g(x), T_m(x), T_p(x)$) et chimique ($A(x), F(x) \dots Z(x)$), à partir des équations différentielles non linéaires établies. Ces calculs ont nécessité l'emploi de la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre [10,11].

b. Principe de la validation

Il s'agit de comparer pour chaque tranche du four la valeur réelle des profils à la valeur calculée. Les valeurs initiales des paramètres du modèle seront modifiées autour de leurs valeurs moyennes, jusqu'à ce que l'écart entre la valeur de la sortie du modèle et la valeur de sortie du procédé devienne inférieure à un seuil préalablement fixé (30°C pour la température matière en zone de cuisson). Les données d'entrée seront classées et groupées de sorte à faire ressortir automatiquement les paramètres à modifier.

c. Simulation statique du modèle de connaissance

Les valeurs mesurées dont nous avons disposées sont des valeurs prises en marche stable du four (régime quasi permanent). Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'aspect statique du procédé. Dans les équations différentielles du modèle nous poserons les termes en $(\frac{\delta}{\delta t})$ égaux à zéro. Ces équations deviennent :

Pour le profil thermique

$$A_m \cdot \rho_m \cdot V_m \cdot C_{pm} \frac{\delta T_m}{\delta x} = \alpha_1 (T_g - T_m) + \alpha_3 (T_p - T_m) + A_m \cdot q_c \quad (4.29)$$

$$A_g \cdot \rho_g \cdot V_g \cdot C_{pg} \frac{\delta T_g}{\delta x} = \alpha_1 (T_m - T_g) + \alpha_2 (T_p - T_g) + q_f \quad (4.30)$$

$$\alpha_2 \cdot (T_g - T_p) + \alpha_3 \cdot (T_m - T_p) + \alpha_4 \cdot (T_a - T_p) = 0 \quad (4.31)$$

Pour le profil chimique

$$V_m \cdot \frac{\delta A}{\delta x} = - \frac{M_A}{4 \cdot M_c'} K_v \cdot C'^4 \cdot A \cdot F - \frac{M_A}{3 \cdot M_c'} K_z \cdot C'^3 \cdot A \quad (4.32)$$

$$V_m \cdot \frac{\delta F}{\delta x} = - \frac{M_F}{4 \cdot M_c'} K_v \cdot C'^4 \cdot A \cdot F \quad (4.33)$$

$$V_m \cdot \frac{\delta S}{\delta x} = - \frac{M_s}{2 \cdot M_c'} K_x \cdot S \cdot C'^2 \quad (4.34)$$

$$V_m \cdot \frac{\delta C}{\delta x} = - \frac{M_c}{M_c'} K_1 \cdot C \quad (4.35)$$

$$V_m \cdot \frac{\delta C'}{\delta x} = K_1 C - K_v \cdot C' \cdot X - K_x \cdot S \cdot C'^2 - K_z \cdot C'^3 \cdot A - K_v \cdot C'^4 \cdot A \cdot F \quad (4.36)$$

$$V_m \cdot \frac{\delta X}{\delta x} = \frac{M_x}{2 \cdot M_c'} K_x \cdot C'^2 \cdot S - \frac{M_x}{M_c'} K_v \cdot C' \cdot X \quad (4.37)$$

$$V_m. \frac{\delta Y}{\delta x} = \frac{M_Y}{M_C'} K_V.C'.X \quad (4.38)$$

$$V_m. \frac{\delta Z}{\delta x} = \frac{M_Z}{3.M_C'} K_Z.C'^3.A \quad (4.39)$$

$$V_m. \frac{\delta V}{\delta x} = \frac{M_V}{4.M_C'} K_V.C'^4.A.F \quad (4.40)$$

Les équations (4.29) à (4.40) représentent le modèle statique thermo-chimique du four à ciment. Dans ces équations trois termes restent encore à définir, q_c , q_f et K_i .

a. Vitesse de la réaction chimique K_i

$$K_i = A_i.e^{-E_i/R.T_m} \quad i = (A, F, S, \dots, V) \quad (4.41)$$

b. Chaleur délivrée par les réactions chimiques exothermiques [27]

$$q_c = \frac{\rho_m}{1 + A_1 + F_1 + S_1} \left[-\Delta H_c.K_1.C - \Delta H_x.K_x.S.C'^2 - \Delta H_y.K_y.X.C' \right] \quad (4.42)$$

c. Chaleur délivrée par la flamme

En négligeant les dissociations dans les réactions de combustion, nous pouvons calculer le débit de la chaleur délivrée par la flamme [22,23,30] Cette approximation est valable dans le cas du four à ciment. Car à l'exclusion des dissociations thermiques, dues au niveau élevé des températures, l'atmosphère oxydante du four (excès d'air de 15%) ne permet pas le développement des réactions de dissociation. Le calcul de q_f est donné par les expressions suivantes [30] :

$$Q_f = Q_c + Q_a \quad (4.43)$$

$$Q_c = FC \cdot PCI \quad (4.44)$$

$$Q_a = F_{as} \cdot C_{pa}(T_{as}) \quad (4.45)$$

où:

$$C_{pa}(T_{as}) = \sum C_{p_{aj}}(T_{as})$$

$j = O_2, N_2$ pour l'air de combustion

$$C_{p_{aj}}(T_{as}) = a_{0j} + \sum_{i=1}^5 a_{ij} (T_{as}/1000)^i \quad (4.46)$$

$$PCI = \sum_{i=1}^N X_i \cdot h_i \quad (4.47)$$

où N est le nombre d'espèces composant le combustible

$$h_i = h_{oi} + \int_{T_0}^T C_{p_i} \cdot dt \quad (4.48)$$

$$F_{as} = \eta \cdot \psi \cdot FC \quad (4.49)$$

avec :

$$\eta = \frac{1}{1 - 3.7 \cdot \frac{O_2 - 0.5 CO_2}{N_2}}$$

où : O₂, CO₂, et N₂ sont données par l'analyse des fumées

La combustion d'un hydrocarbure C_nH_m avec de l'air (O₂, βN₂), requiert pour bruler complètement un minimum d'air :

$$\psi = (n + m/4).(O_2 + \beta N_2) \quad (4.50)$$

A partir des équations (4.43 à 4.50), nous pouvons tirer l'expression de la quantité de chaleur délivrée par la flamme :

$$q_f = \frac{Q_f}{FC} = PCI + \eta.\psi. Cp_a (Tas) \quad (4.51)$$

d. Mesures des températures T_p, T_m, T_g

Sur le procédé étudié, nous disposons de la mesure en continue (SEMScanner) de la température virole du four T_v(x). A partir de cette mesure, nous pouvons déduire les températures T_p(x), T_g(x) et T_m(x) [31] :

$$\alpha_c.(T_v(x)-T_a).Dz = \frac{T_p(x) - T_v(x)}{\frac{S_1(x)}{\lambda_1(x).dm_1} + \frac{S_2(x)}{\lambda_2(x).dm_2} + \frac{S_3(x)}{\lambda_3(x).dm_3}} \quad (4.52)$$

avec :

$$dm_1 = De - S_1(x) - S_2(x) - S_3(x)$$

$$dm_2 = dm_1 + S_1(x)$$

$$dm_3 = dm_2 + S_2(x)$$

$$dz = dm_3 + S_3(x) = De$$

Nous posons :

$$S = \frac{S_1(x)}{\lambda_1(x)dm_1} + \frac{S_2(x)}{\lambda_2(x)dm_2} + \frac{S_3(x)}{\lambda_3(x)dm_3}$$

Alors :

$$T_p(x) = T_v(x) \cdot (\alpha_c \cdot D_e \cdot S + 1) - T_a \cdot D_e \quad (4.53)$$

$$\alpha_c = 3.5 + 0.062 \cdot T_v(x) \quad (4.54)$$

$$T_m(x) = T_p(x) + \Delta T_1(x) \quad (4.55)$$

$$T_g(x) = T_p(x) - \Delta T_2(x) \quad (4.56)$$

Avec :

$S_1(x)$: Epaisseur du croutage

$S_2(x)$: Epaisseur du revêtement

$S_3(x)$: Epaisseur de la virole

α_c : Facteur global de transmission de la chaleur à travers la paroi

$\lambda_1(x)$: Conductivité thermique du croutage

$\lambda_2(x)$: Conductivité thermique du revêtement

$\lambda_3(x)$: Conductivité thermique de la virole

$\Delta T_1(x)$ = écart moyen entre T_p et T_m donné par zone du four

$\Delta T_2(x)$ = écart moyen entre T_g et T_p donné par zone du four

D_e : Diamètre extérieur du four

4.3.5 Analyse des résultats

L'algorithme de simulation adopté (Fig.4.5) simplifie la résolution des équations différentielles non linéaires du modèle. Ces simplifications et les approximations utilisées notamment dans la modélisation de la flamme diminuent la précision du modèle.

Cependant, les résultats obtenus (Fig.4.6, 4.7, 4.8) pour le profil thermo-chimique du four respectent l'allure des courbes d'évolution des températures T_g , T_m , et T_p (Fig.3.6) ainsi que des principaux constituants des matières .

Ces résultats sont suffisamment précis pour caractériser les différentes zones du four (décarbonatation, clinkérisation et refroidissement). Cette simulation permet une connaissance plus fine des phénomènes de combinaison qui ont lieu dans le four : Décarbonatation pour T_m avoisinant 1000°C , formation de C_2S 1100°C , vers 1250°C formation de C_3S et diminution de C_2S qui se recombine à CaO .

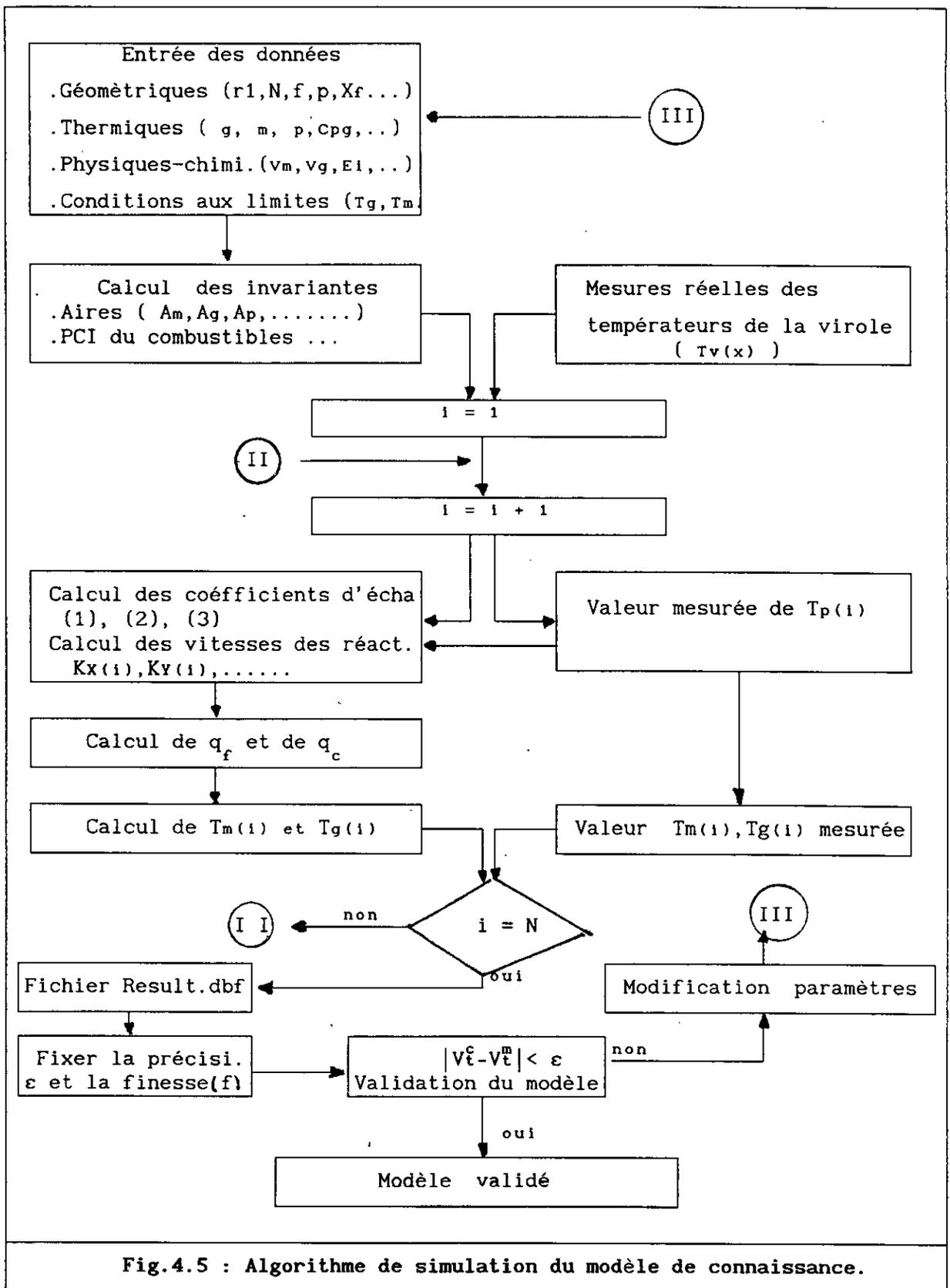


Fig.4.5 : Algorithme de simulation du modèle de connaissance.

L'écart important (>200) entre les courbes des températures T_m et T_g et le niveau faible du CaO ($\ll 1.5\%$) après la zone de cuisson sont significatifs d'une surconsommation d'énergie au cours de la cuisson

4.3.6 Influence des paramètres de conduite et de dimensionnement

Les simulations qu'autorise le modèle de connaissance sont utiles pour le choix des équipements, leur dimensionnement et le choix des consignes de marche. Nous avons cherché à connaître l'influence d'un paramètre de conduite (FA) et d'un paramètre de dimensionnement (r_1). Les résultats obtenus (Fig4.9) nous permettent de formuler les remarques suivantes :

Le rayon interne du four (2.31 m, pour une longueur effective de 63.15 m), est suffisant pour atteindre des débits de 1800 t/j. Par contre pour un tel débit, le volume de gaz requis est plus conséquent, ce qui nécessitera un ventilateur de tirage de vitesse supérieure à celle du ventilateur existant.

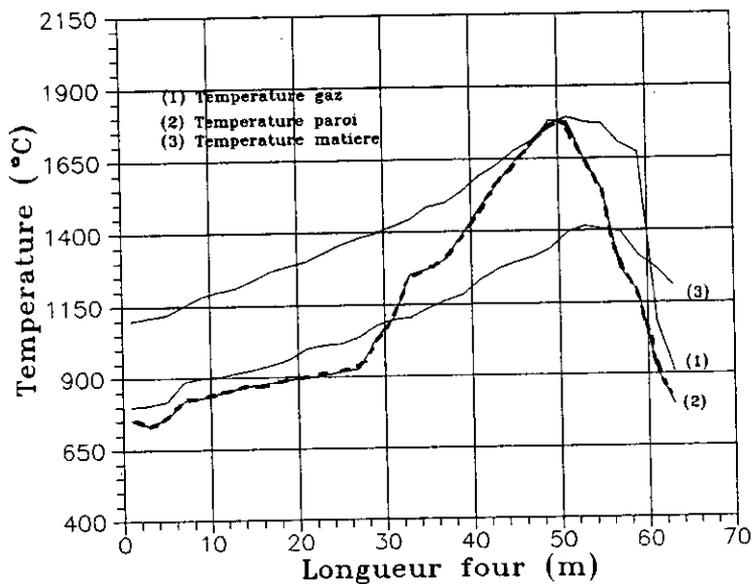


Fig 4.6 : Profil thermique calculé du four.

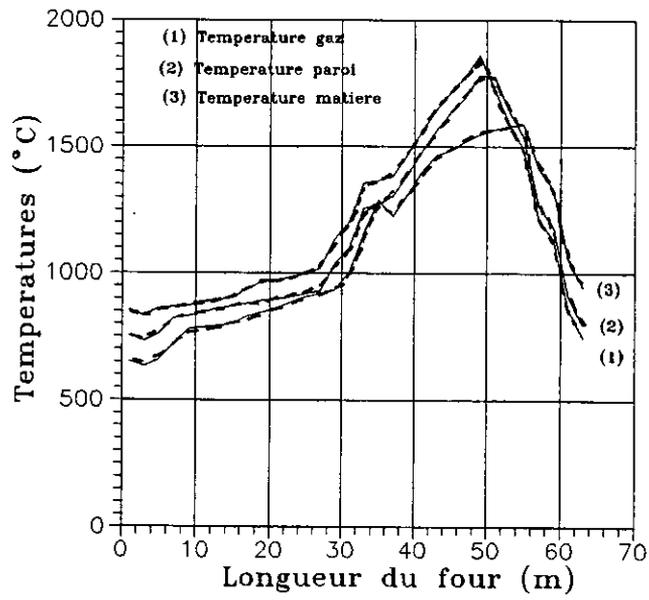


Fig.4.7: Profil thermique réel du four

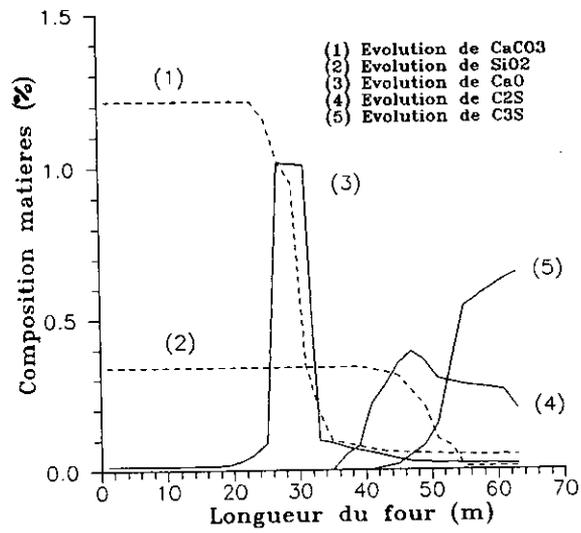


Fig 4.8 : Profil chimique calculé du four

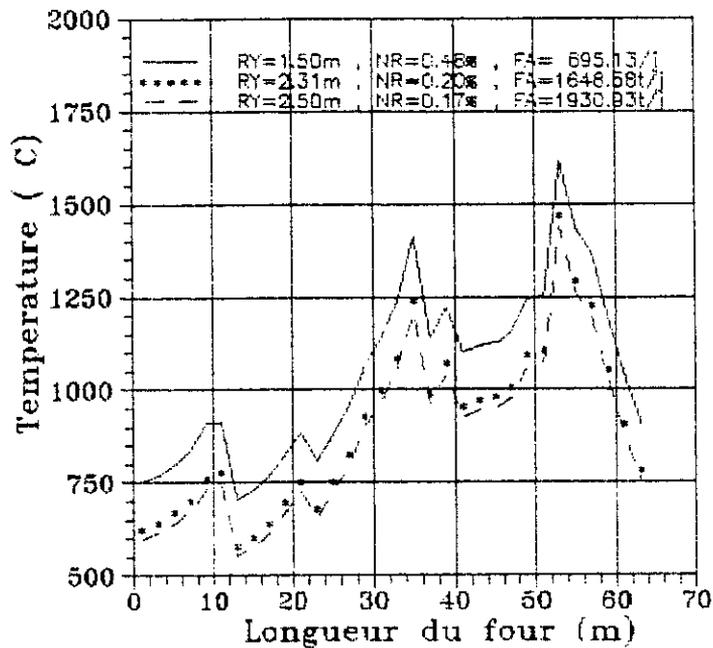


Fig.4.9: Influence du rayon interne du four et du débit.

4.4 Etude expérimentale

4.4.1 Horizon d'observation

L'horizon d'observation très limité (1 mois) ne nous a pas permis de disposer de chroniques pouvant renseigner sur tous les modes de fonctionnement du procédé. Les mesures collectées ne correspondent qu'à des états stables de marche. Ceci affectera sans doute négativement la qualité de l'étude expérimentale.

Pour compenser quelque peu cette insuffisance nous avons intégré toutes les informations recueillies sur le procédé durant la phase des essais et de mise en service (6 mois).

4.4.2 Collecte de l'information

Les données recueillies correspondent aux états de marche sur trois journées consécutives (acquisition des valeurs de 37 variables toutes les 03 minutes). Ces données ont servi à l'analyse statistique . La collecte de l'information a porté également, sur les valeurs extrêmes des paramètres (86) intervenant dans les équations du modèle de connaissance et sur la valeur des retards (tab.4.1) de chaque variable de marche par rapport à CL prise comme référence. Cette collecte a concerné enfin, le recueil des mesures (tous les mètres) de la température virole et de ses caractéristiques (épaisseurs, conductivités thermiques). La désignation et les symboles des différents variables et paramètres figurent en annexe D.

4.4.3 Codages des données

Toutes les variables et tous les paramètres seront codés avant d'être organisés en base de données et ce, conformément au code adopté.

4.4.4. Filtrage des données

Pour l'organisation de la base de données deux saisies des valeurs de paramètres sont possibles la saisie manuelle et la saisie " automatique " Dans la saisie manuelle, un verrouillage systématique est prévu au cas où la valeur acquise ne satisfait pas au test de vraisemblance. les données recueillies sous forme de graphe (à digitaliser) ou sur des supports magnétiques (disquettes) sont saisie " automatiquement ". Le test est activé systématiquement. Un état des valeurs aberrantes est édité sur demande en fin d'opération.

Le test de vraisemblance consiste à comparer la valeur du paramètre à saisir à des seuils préalablement fixés :

$$\text{Seuil minim.} \leq \text{Val.saisie} \leq \text{Seuil maxim.}$$

4.4.5 Synchronisation

Elle consiste à déterminer les retards purs entre chaque variable et la

variable connue la plus en retard sur le four (Cl). Des méthodes automatiques offrant la possibilité d'utiliser la fonction de corrélation et / ou les régressions linéaires existent [30,32]. Leur principe consiste à trouver l'extrémum de la fonction de corrélation et / ou du coefficient de corrélation (Annexe B).

Le retard recherché correspond à cet extrémum c.a.d. à un minimum si les variables sont antagonistes et à un maximum si les variables sont protagonistes. Sur les journées de fonctionnement considérées où les variables n'ont que de très faibles variations (quasi-stabilité de fonctionnement), il est très difficile de déterminer ces retards. Les valeurs des coefficients de corrélation sont très faibles (Tab.4.2).

Nous avons adopté pour la suite de l'étude la valeur moyenne calculée à partir de la plage de vraisemblance de ces retards (Tab.4.1). Cette plage est définie sur la base de l'expérience des opérateurs et de leurs connaissances du procédé. Elle est dans tous les cas nécessaire car elle facilite le calcul des fonctions de corrélation et diminue le temps des régressions à effectuer.

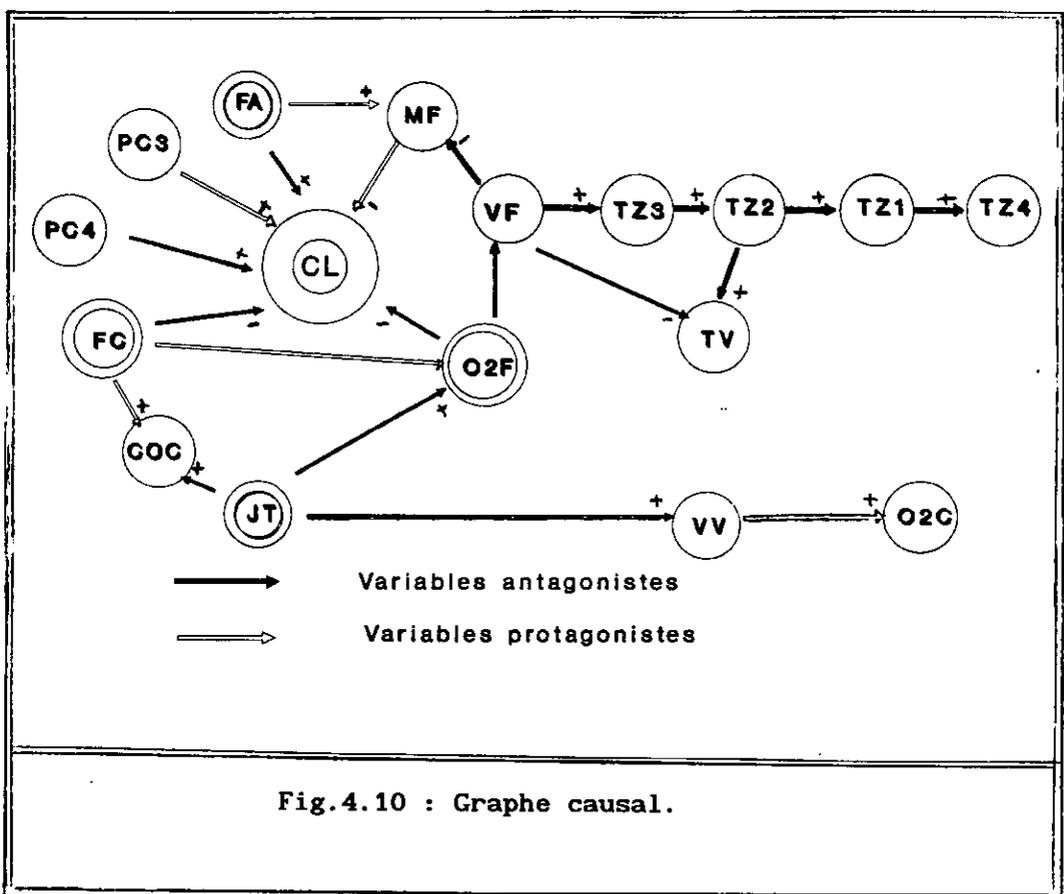
4.4.6 Analyse primaire

Sur la base de calculs des régressions linéaires (annexe B) un graphe causal est établi (Fig.4.10). Il représente un véritable modèle expérimental du procédé. Il donne les relations physiques (ie au sens du procédé) existant entre les variables prises deux à deux. La causalité entre les variables est donnée par le sens de la flèche, le sens de variation est donnée par le signe (+) pour les variables concomitantes et par le signe (-) pour les variables antithémiques.

Les résultats de cette analyse nous permettent de sélectionner 18 variables, sur les 37 initiales, suffisantes pour la caractérisation du fonctionnement du procédé (FA, FC, VF, TAS, VV, MF, CL, EXA,.....).

Paramètre	Valeur mini	Valeur maxi	Valeur moyen.
FA	40	60	50
FC	30	60	45
VF	30	50	40
VV	30	60	45
O2F	25	45	35
O2C	25	45	35
COC	25	45	35
MF	30	50	40
JT	30	60	45
TV	30	60	45
TZ1	30	60	45
COF	25	45	35
CCS	40	60	50
CG	30	60	45
TZC	30	60	45
TK	25	45	35
PC3	30	60	45
TM53	30	60	45
TG53	30	60	45

Tableau 4.1 : Retards de synchronisation des variables / à CaO.



4.4.7. Analyse quantitative

Cette étape de l'analyse consiste à mesurer les couplages existants entre les variables, sélectionner les variables les plus actives (variables de décision) au sens d'un critère fixé et caractériser les modes (ou classes) de fonctionnement du procédé.

a. Mesure des couplage entre variables

Pour la mesure des couplages nous avons utilisé les résultats de l'analyse de correspondance (coefficients de corrélation Tab.4.2). Toutefois, cette mesure peut être améliorée en utilisant la méthode d'analyse structurale [15] qui calcule le coefficient de transinformation.

CL	100																			
FA	-18	100																		
FC	41	-12	100																	
VF	-63	-32	14	100																
VV	23	02	-17	40	100															
PL	98	-14	40	-07	-23	100														
O2F	51	-06	-53	58	57	51	100													
O2C	28	24	-13	-63	-38	-28	-27	100												
COC	04	-21	-10	63	38	03	47	-57	100											
MF	-20	-41	14	77	24	19	39	-75	55	100										
JT	-29	-08	-21	69	64	-30	72	-53	63	43	100									
TV	-13	-01	34	06	-.1	-12	-.1	06	-09	01	-02	100								
TZ1	-15	-21	23	34	04	13	05	-32	25	40	15	-04	100							
TZ2	-55	-09	-06	70	34	-56	70	-11	33	36	58	22	14	100						
TZ3	-47	-14	-19	77	47	-49	84	-28	51	49	73	11	22	90	100					
TZ4	-55	25	-.7	.2	09	-55	22	57	-16	-42	15	17	-19	56	39	100				
PC3	-12	02	-21	15	12	-13	10	-07	19	09	20	-19	04	17	19	05	100			
PC4	20	-10	16	19	08	-20	18	-02	02	04	15	52	-10	28	24	12	24	100		
CL	FA	FC	VF	VV	PL	O2F	O2C	COC	MF	JT	TV	TZ1	TZ2	TZ3	TZ4	PC3	PC4			

* La valeur des coefficients est à divisée par 100.

Tableau 4.2: Matrice des coefficients de corrélation sur une journée de marche

b. Sélection des variables actives

Nous avons retenu comme critère la qualité du produit, le niveau de la production et la consommation minimale de l'énergie. Le réglage de la variable CI autour de sa valeur maximum admissible (3%) permet de satisfaire ce critère [29]. Il s'agit de sélectionner les variables qui ont le plus d'influence sur CI.

Dans une première phase nous allons éliminer toutes les variables faiblement corrélées à CI et ne retenir que celles dont le coefficient de corrélation est au moins égal à 0.18. Cette sélection sera ensuite affinée en utilisant la méthode de ségmentation [16] (Annexe B).

Cette méthode consiste à expliquer une variable Y (CI) par un ensemble de variables X_i ($i = FA, FC, VV, \dots$), Y et X_i peuvent être des variables qualitatives ou quantitatives. A la différence de la régression multiple, qui donne une formulation mathématique (de la relation entre Y et X_i), la ségmentation elle, est basée sur le principe des dichotomies successives d'une population (E) en sous populations son intérêt réside dans l'absence de toute hypothèse de linéarité. Les valeurs de la variable à expliquer et des variables explicatives seront " codées " (Tab.4.3) selon leur niveau.

Les résultats obtenus par la ségmentation dans ce cas de codage font apparaître (Fig.4.13):

a. Au niveau 1, la variable VF qui discrimine le mieux l'ensemble initial de points en deux sous ensembles caractérisés par des distributions de la variable CI sensiblement différentes. Les vitesses comprises entre 1.96 et 2.08 correspondent à des valeurs de CI comprises dans les limites acceptables, alors que des vitesses inférieures à 1.96 ou plus grandes que 2.08 conduisent à des valeurs de CI hors limites.

b. Au niveau 2, les variables FC et FA. Dans le groupe 2.1 les valeurs de FA comprises entre 98 ET 117 T/H correspondent à des valeurs de CI de 1 à 2%, en dehors les valeurs de FA conduisent à des valeurs de CL de 0.5 à 2% . Dans

le groupe 2.2 les valeurs de FC situées dans l'intervalle (610 à 625) sont liées aux valeurs de Cl comprises entre 0.5 et 1%, lorsque FC est en dehors de cet intervalle Cl est alors comprise entre 1 et 2%. Nous remarquerons que la variable PC4 n'apparaît à aucun niveau de l'arbre dichotomique. De plus la variable VV, séparant le groupe 3.2 en deux groupes de 15 points, n'est pas suffisamment explicative de Cl.

Ne seront donc considérées comme variables actives sur Cl que les variables suivantes : VF, FA, FC, MF, O2F. Pour rechercher les modes (classes) de fonctionnement nous ne retiendrons que les variables précédemment sélectionnées.

Variable	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
CL (%)	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3
FA (T/h)	105-110	110-115	115-120	120-125	125 - 130
FC (Nm ³ /h)	610 -625	625 -630	630 -645	645 -660	660 -675
VF (t/mn)	1.94-1.96	1.98- 2	2.02-2.04	2.06-2.08	2.10-2.12
MF (%)	25 - 40	40 - 55	55 - 70	70 - 85	85 - 100
O2F (%)	3.5 - 3.9	3.9 - 4.3	4.3 - 4.7	4.7 - 5.1	5.1 - 5.5

Tableau 4.3 : Codage en classes des variables.

c. Caractérisation des modes de fonctionnement

Les variables actives sélectionnées seront utilisées pour représenter chaque point de fonctionnement du procédé. La représentation graphique des variations de Cl en fonction des autres grandeurs montrent à chaque fois un nuage de points épars (Fig.4.11) et rend difficile l'établissement d'une relation directe. Il faudra donc, avant de paramétrer le nuage à l'aide des différentes variables, regrouper les points en classes. Les points à rassembler dans une même classe doivent avoir des caractéristiques proches ou identiques valeurs voisines). Pour réaliser cette classification nous avons choisi la méthode des nuées dynamiques [16].

Les résultats obtenus montrent que l'inertie inter-classe est pratique-

ment identique pour les différentes partitions. Ce ci s'explique par la faible variation des valeurs des variables de marche. La partition qui présente l'inertie la plus grande (65%) est retenue. Nous reprendrons le nuage de points précédent et nous indiquerons, en projetant, chaque point sur le plan (Fa-Cl) sa classe d'appartenance. Pour se rendre compte de la séparabilité des classes il faut représenter le nuage de points dans R^6 (Fig.4.12)..

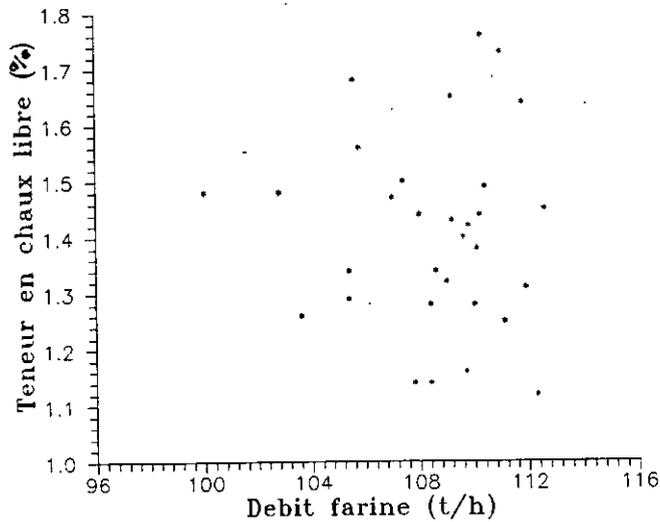


Fig.4.11 : Variation des teneurs chaux libre en fonction du débit.

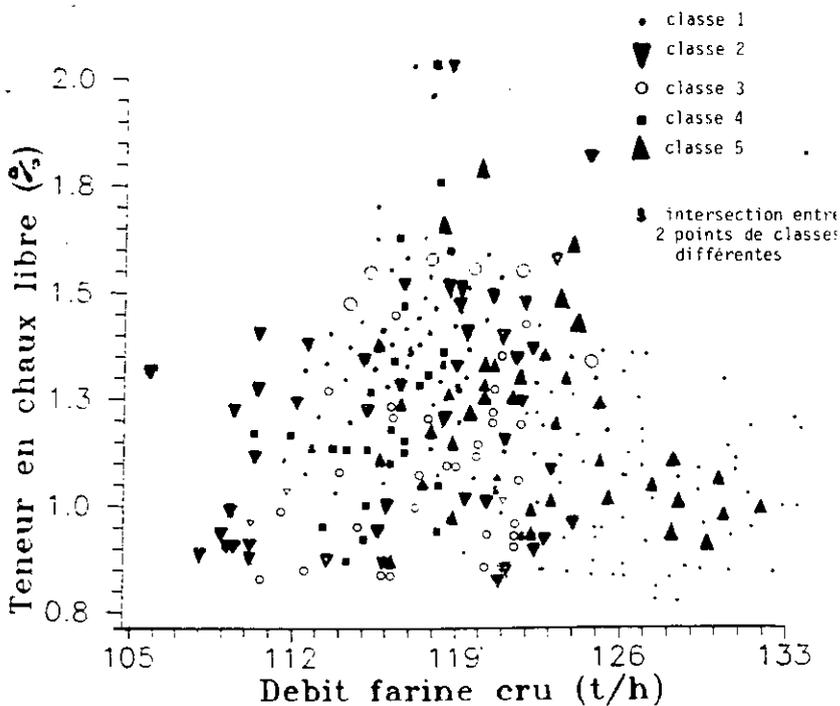


Fig 4.12 :Principales classes de fonctionnement du procédé.

Le nombre de points obtenus par classe est donné par (Tab.4.4). Sur le tableau (Tab.4.5), nous indiquerons les valeurs moyennes calculées pour chaque classe .

Classe	1	2	3	4	5
Nombre de points	115	43	94	77	122

Tableau 4.4 : Nombre de points par classe.

Classe Variable	1	2	3	4	5
CL	1.77	1.78	1.70	1.01	1.31
FA	117.16	116.17	116.88	117.06	118.26
FC	654.42	664.18	655.15	653.33	655.34
VF	2.03	2.015	1.016	2.02	1.001
MF	45.44	50.68	26.77	44.74	48.56
O2F	4.10	3.54	3.72	4.09	4.12

Tableau 4.5 : Valeurs moyennes des variables par classe.

La caractérisation statique des modes de marche ne portera que sur les classes qui contiennent un nombre de points important (c.a.d les classes 1, 3, 5). En considérant que la bonne qualité de clinker correspond à une teneur en Cl de 1 à 2.5%, que la consommation calorifique est minimum pour CL voisine de 3% et que la production est proportionnelle au débit FA (Débit clinker produit = $\alpha \cdot FA$; α facteur de perte au feu). Nous constatons que les écarts entre les valeurs moyennes par classe sont très faibles à cause du régime de marche stable auquel coorespondent les variables analysées. Les caractéristiques qualitatives de chaque classe sont de ce fait très proches..

Classe	1	3	5
Consommation calorifique	élevée	élevée	très élevée
Niveau de production	a.s impor.	moyenne	important
Qualité du produit (clinker)	bonne	bonne	très bonne

Tableau 4.6 : Caractéristiques qualitatives des classes.

Le tableau (Tab.4.6) indique que le régime statique optimal du four n'est pas atteint. Parmi les classes obtenues, celle qui est la plus intéressante du point de vue fonctionnement statique est la classe N°1. Elle présente le meilleur compromis entre la production, la qualité et la consommation de l'énergie

CONCLUSION

CONCLUSION

A travers l'exemple de l'installation de cuisson d'une cimenterie, nous avons relevé les difficultés que posent l'analyse des processus industriels complexes. La diversité des disciplines qu'il faut maîtriser et les contraintes d'environnement dont il faut tenir compte excluent leur analyse par les méthodes classiques existantes et justifient le recours à des méthodologies nouvelles.

La méthodologie adoptée, repose sur le principe de non perturbation de la marche du procédé. Elle se base essentiellement sur ses connaissances théoriques, son observation à travers des données réelles et l'expérience des opérateurs qui le conduisent. Cette façon d'aborder le procédé permet de l'appréhender sous tous ses aspects.

La structure modulaire de cette méthodologie, les outils et les méthodes utilisés, offrent des possibilités réelles pour son adaptation et sa généralisation à d'autres procédés. Ces possibilités lui confèrent un large champ d'investigations lui permettant de répondre à diverses préoccupations (conception, choix d'équipements et conduite des procédés).

L'illustration de cette démarche sur le four de la cimenterie de AIN-TOUTA, nous a permis de construire son modèle de connaissance et d'étudier les couplages existants entre ses variables. L'étape franchie constitue une base permettant d'entreprendre les ultimes phases conduisant à l'implantation d'une commande optimale.

Les résultats des simulations et des traitements statistiques réalisés sur des paramètres et une variable choisis a priori, montrent qu'il est envisageable d'utiliser l'outil proposé à l'examen de problèmes spécifiques aux fours de la cimenterie de AIN-TOUTA. Dans cette optique, il est possible d'entreprendre l'étude des phénomènes perturbants de ces fours (concrétions et formation d'anneaux), de tester les capacités réelles des équipements et d'implanter une commande (régulation) se basant sur un paramètre (NOx) plus fiable, directement accessible et plus représentatif des niveaux de température en zone de cuisson que les paramètres actuellement utilisés.

Le logiciel développé (adapté au procédé de cuisson en cimenterie) offre des possibilités intéressantes à l'analyse des processus industriels complexes dont dépend l'amélioration de leur conduite. Les enrichissements qu'il faudra nécessairement lui apporter ainsi que ses limites d'utilisation ne se révéleront qu'à sa mise en oeuvre sur d'autres procédés.

S'il est vrai qu'aucune méthode ne peut prétendre résoudre les problèmes que pose l'analyse des systèmes complexes, nous sommes persuadés que c'est par la diversité de ces méthodes et leurs applications à des cas réels que cette analyse s'enrichit. Nous espérons y avoir modestement contribué.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES

- [1] A.TITLI :
Commande hiérarchisée et optimisation des processus complexes
Edition DUNOT (1973)
- [2] A.TITLI :
Analyse et commande des systemes complexes
CEAPADUS -Toulouse- (1979)
- [3] A.FOUSSARD :
Commande des systemes multidimensionnels
page VI à IX et pages 99 à 121 (1972)
- [4] C.FOULARD, S.BENTIL et J.P SANDRAS
Commande et régulation par ordinateur numérique
pages 17, 32 et 106 à 190 (1982)
- [5] CIMENTS, BETONS, PLATRES et CHAUX :
Conduite automatique par la technique du fuzzy logic
n°3/80 724 (1980)
- [6] J.P.BARBIER :
Quelques réflexions concernant l'automatisation de processus en cimenterie (1982)
Ciments,betons,plâtres et chaux n°736/3/82 pages 149 à 153
- [7] J.MELESE :
L'analyse modulaire des systèmes
Ed. Hommes et Technique Paris (1977)
- [8] M.G.SINGH et A.TITLI :
Systems decomposition, optimization and control
PERGANON PRESS pages 5 à 35 (1978)
- [9] D.A WISMER , M. AOKI
Optimization methods for large scale systems
- [10] HANSRUEDI BUHLER :
Conception des systemes automatiques
Presses polytechniques romandes (1988)

- [11] A.REVERCHON, M.DUCAMP
Mathématiques par micro-ordinateur T1 Analyse
Eyrolles 2^{ème} Edition Paris (1986)
- [12] J.P. NOUGIER
Méthodes itératives de calcul de minimum
Edition Masson (1980)
- [13] J.P.BENZECRI :
L'analyse de données tome 2
L'analyse des correspondances (1973)
- [14] P.BERTIER et J.M BOUROUCHE :
Statistique et informatique appliquées (1975)
- [15] J.DUFOUR, G.GILLES et C.FOULLARD :
Analyse structurale et partition des systèmes dynam-
iques complexes à l'aide de la théorie de l'information
Etude des nombres de classes (1976)
C.R. Academie des sciences Paris pages 543 à 546
- [16] P.BERTIER, J.M.BOURACHE :
Analyse des données multidimensionnelles
P.U.F. Paris (1978)
- [17] SEIDEL, H.CLEAUF et STARK :
Technologie des ciments, plâtres et chaux
Processus et installation de cuisson
Edition SEPTIMA Paris (1980)
- [18] WALTER H.DUDA
Cement Data Book

International process engineering in the cement industry
Bauverlag G.M.B.H. 2nd Edition (1977)
- [19] M.A. GLINKOV
Fondement de la théorie générale du fonctionnement des fours
Edition Masson et Cie (1974)
- [20] A.FOLLIOT :
La transmission de chaleur dans le four rotatif
a ciment. Publication Technique CERILH n°65 (1955)

- [21] C.VIVIERS et J.NAUMEM :
 Les flammes de cimenterie
 Dpt Procédés et systemes Lafarge conseil Etudes (France) (1981)
- [22] G.MONNOT :
 La combustion dans les fours et les chaudières
 Publications de l'institut francais de pétrole (1983)
- [23] H.PERTUIS :
 La combustion industrielle
- [24] R.H.BOGUE :
 La chimie du ciment Portland (1952)
- [25] Paper prepared for I.E.E.E. conference
 SAn FRANCISCO (1987)
 Dpt Pocédé Lafarge Conseils Etudes
- [26] K.HAMOUCHE (Dérigé par F.CHIGARA, A.ADJTOUTAH)
 Commande optimale du préchauffeur à ciment
 projet de fin d'étude (Juin 1987)
- [27] H.A.SPANG :
 A dynamic model of a ciment kiln
 Automatica vol 8 pages 309 à 323 (1972)
- [28] P.D.SUNAVALA :
 Mathematical analysis of temperature
 Distribution of a gaz and charge in dry process
 rotary cement kilns (1977)
 Journal of the institute of fuel (1977) pages 23 à 32
- [29] F.RUNG, STALILAW TARASIEWICZ :
 A computer model for the cement kiln
 I.E.E.E. trans on industry applications (1982)
 vol IA 18 n°4 (1982) pages 425 à 429
- [30] G.JAGER, LAPERS AACHEN, PUTLER et WIESBADEN :
 Application d'un modèle de régulation pour agir sur la
 qualité du produit, en particulier du clinker en cimen-
 -terie VDI Berichite n°276/1977 (RFA) (1977)
- [31] S.ZURAKOWSKI et S.HOJARCZYK :
 Transfert de chaleur par paroi cylindrique multicouches
 WNT-Varsovie pages 111 à 115

- [32] A.EN.NAAMI :
Analyse phénoménologique et modèle experimental d'un four
rotatif à ciment (thèse de docteur ingénieur) Lyon (1980)
- [33] B.WALLIZER :
Systèmes et modèles
Edition Seuil Paris (1977)
- [34] J.WILSON et H.C.ITEN :
Optimization in cement plant operation
I.EEE. trans on industry applications
vol 12 n°5 pages 529 à 935 (1980)
- [35] M.C.ADAMS :
Transmission de la chaleur
Edition Dunot (1964)
- [36] L.V.BERTALANFFY :
Théorie générale des systèmes
Edition Dunod (1964)
- [37] V.POLOUKHINE :
Simulation mathématique et calcul sur ordinateur des
laminoires à tôles
Technique Soviétique Edition MIR (1975)
- [38] P.SALISSY et J.BILLY :
Intérêt économique d'une commande optimale hiérarchisée
de processus industriels
Automatisme n°3/4 (1977)
- [39] A.ABDALLAH et TRINQUET :
Outil informatique d'identification des grands systèmes
multivariables
Automatisme n°8/9 (1977)
- [40] HEILLGENTAEDT :
Thermique appliquée aux fours industriels tome 1 et 2
Edition DUNOT (1984)
- [41] P.BOUDAREL, J.DELMAS et P.GUICHET :
Commande optimale des processus
tome 2 Ed Dunod

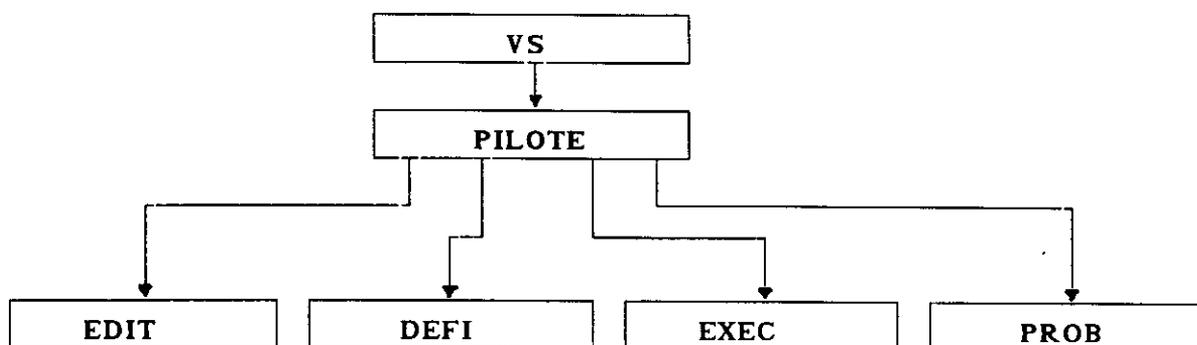
- [42] LOUIS MARET :
Régulation automatique
Presses polytechniques romandes (1987)
- [43] F.KREITH :
Transmission de la chaleur et thermodynamique
Edition Masson (1967)
- [44] J.BARON :
La recherche dans l'industrie cimentière
Ciments, bétons, plâtres et chaux (1986)
- [45] D.W.HASPEL :
Practical problems with the use and interprétation of
NOx for kiln control (World cement) (1988)
- [46] KRUPP Polysius A.G. :
Systeme KCS de régulation du four
Ciments, betons, plâtres et chaux n°773/4 (1988)
- [47] F.OSSELIN et T.DEPUYPER :
Procédé FCB de conduite de four de cimenterie sur
micro-ordinateur (1985)
Ciments,betons,plâtres et chaux n°7783/2 pages 105 à 106
- [48] J.KOENIG :
A modern process control system for cement works
Zement, kalk, gyps n°8/1990 pages 282- 287 (1990)

ANNEXES

ANNEXE A1

Présentation générale du logiciel CHADOC.

1-Structure du logiciel.



Le module **VS** sert de lancement du logiciel. Il fixe les tailles des différentes zones de travail (zone de code, zone de données, mémoire dynamique).

Le module **PILOTE** gère les appels, par change, des modules suivants.

Le module **EDIT** est un éditeur plein écran sur tableaux de données. En particulier il permet une saisie des tableaux de données à partir du clavier ou à partir d'un fichier texte. Il permet aussi leur mise en forme et toute une série de manipulations (ajouts, copies et mouvements blocs, suppressions, recalcul de variables...).

Le module **DEFI** permet de définir les traitements à réaliser dans une analyse de données en constituant un fichier de paramètres. Pour chaque traitement demandé, il fait appel à un questionnaire qui aide l'utilisateur dans le choix des paramètres nécessaires à l'exécution du traitement. Une vérification syntaxique des paramètres saisis est réalisée. Ce module permet aussi de reprendre des fichiers de paramètres déjà définis et de les modifier.

Le module **EXEC** a pour but de réaliser effectivement les traitements définis précédemment. Il opère sur les tableaux de données créés par **EDIT** dans d'exécution d'une précédente analyse et il est piloté par un fichier de paramètres. Pour chaque traitement demandé ce module réalise d'abord une analyse sémantique des paramètres fournis, et produit éventuellement des messages d'erreur. Ensuite, si les paramètres sont corrects, le traitement demandé se réa-

lise. Ses résultats peuvent être obtenus sur écran, sur imprimante ou sur fichier texte destiné à être imprimé.

Le module **PROB** est indépendant des autres. Il réalise des calculs de probabilités directs ou inverses pour les lois suivantes : Bernouilli, Poisson, Exponentielle, Normale, Student, Gamma, Logistique, Binomiale, Géométrique, Uniforme, Fisher-Snedecor...

2-Traitements de Chadoc.

2.1 : Préparation des tableaux de données

- IDON** : Impression de tableau de données
- CONC** : Concaténation de tableau de données ;
- SELE** : Sélection d'individus et de variables ;
- NUMI** : Numérotation des individus ;
- SUPP** : Suppression de variables et de modalités ;
- AJOU** : Ajout de variables et de modalités ;
- OPER** : Opérations sur les variables ;
- TRIE** : Tri des individus selon une variable ;
- REMP** : Remplacement des composantes non valides ;
- TRAN** : Transposition d'un tableau de données ;
- QLMU** : Traitement de variables qualitatives à choix multiples ;
- CDES** : Correction de descriptifs ;
- COMP** : Compactage de variables de même type.

2.2 : Utilitaires de conversion.

- TDFT** : Conversion d'un tableau de données en fichier texte ;
- FTTD** : Conversion d'un fichier texte en tableau de données ;
- TDFD** : Conversion d'un tableau de données en fichier DBASE ;
- FDTD** : Conversion d'un fichier DBASE en tableau de données ;
- TDFB** : Conversion d'un tableau de données en fichier BASIC ;
- FBTD** : Conversion d'un fichier BASIC en tableau de données.

2.3 : Graphiques

- GRVV** : Graphiques variables X variables ;
- GRIV** : Graphiques individus X variables.

2.4 : Traitements monovariés.

- FREQ** : Calcul de fréquences (tris à plat) ;

MOYE : Calcul de moyennes avec centrage et/ou réduction éventuels ;
HIST : Histogrammes avec codage éventuel.

2.5 : Traitements bivariés.

PROF : Calcul de profils croisés (tris croisés) ;
REG1 : Régressions à une variable explicative ;
VAR1 : Analyse de variances à un facteur explicatif ;
CRQT : Croisement de variables quantitatives ;
CRQL : Croisement de variables qualitatives .

2.6 : Traitements multivariés.

VAR2 : Analyse de la variance à deux facteurs explicatifs ;
VAR3 : Analyse de la variance à trois facteurs explicatifs ;
VARM : Analyse multivariée de la variance ;

REGM : Régression linéaire multiple pas à pas ;
DISC : Analyse discriminante linéaire pas à pas ;
SFQT : Segmentation d'une variable quantitative ;
SFQL : Segmentation d'une variable qualitative ;

FACP : Analyse factorielle en composantes principales ;
FACO : Analyse factorielle des correspondances ;
FACM : Analyse factorielle des correspondances multiples ;
FDIS : Analyse factorielle d'un tableau de dissimilarités ;

CNUD : Classification par la méthode des nuées dynamiques ;
CLOG : Classification logique (formes fortes) ;
CAHI : Classification ascendante hiérarachique ;
CGRA : Classification par affectation à des centres de gravité.

ANNEXE A2

Programmes développés.

Phase	Nom du programme	Traitement réalisé	Observations
Organisation de la base de données	SAISPTX.PRG	Saisie des paramètres et variables du procédé.	algorithme Fig.2-1
	SAISVAL.PRG	Saisie des valeurs des paramètres et variables	algorithme Fig.2-2
	MODPTX.PRG	Modification des paramètres et variables	algorithme semblable à celui de la saisie
	MODVAL.PRG	Modification des valeurs des paramètres.	
	CONSPTX.PRG	Consultation des paramètres et variables	
Analyse statistique par les données	Logiciel CHADOC et fichiers.bat de transfert de Dbase3 plus vers CHADOC (synchro, carval, senslia, selecval, et modfonc)	L'utilisateur de AMSPI n'a pas besoin de connaître la procédure requise pour exécuter un traitement sur CHADOC. Aussi nous avons préparé pour chaque traitement prévu le fichier procédure requis.	algorithme Fig.2-3
Traitements A.M.S.P.I	SIMUTPX.PRG	Simulation du modèle Méthode d'intégration numérique de Runge-Kutta d'ordre 4.	voir algorithmes Fig.4-3 chapIV
	VALIDMOD.PRG	validation du modèle	Fig.2- chapII
	FILTVAL.PRG	Test de vraisemblance des valeurs	
Editions	Tous les résultats de tous les traitements peuvent être édités sous forme de tableaux ou de graphes. 10 programmes ont été développés dans ce but dont certains en BASIC.		

ANNEXE A3

I- Utilisation de A.M.S.P.I

AMSPI ne nécessite pas de configuration particulière. Vérifier cependant que dans config.sys le nombre de fichiers pouvant être ouverts simultanément est au moins égal à 10.

La mise en oeuvre de AMSPI présuppose que les conditions suivantes sont réunies:

- a- Equations du modèle de connaissances établies ,
- b- Toutes les informations (type, localisation, nomenclature et codification des paramètres, valeurs extrêmes des paramètres, état des variables de marche) sur le procédé ont été collectées ,
- c- Nomenclature et codification des processus et installations objets de l'analyse
- d- Nomenclature et codification des paramètres.

II- Améliorations possibles sur A.M.S.P.I

Sa mise en oeuvre sur le four nx2 de AIN-TOUTA a révélé déjà quelques retouches à apporter:

- a- Verrouillage entre les traitements (certains nécessitent un ordre chronologique pour leur exécution);
- b- Contrôle des codes à tous les niveaux d'accès;
- c- Intégration de l'analyse qualitative des données (possible par CHADOC);
- d- Programmation partielle de la phase élaboration du modèle de connaissance (équations générales des bilans partiels).

ANNEXE B1

Principales méthodes d'analyse statistique.

Méthodes	Apports	Limites	Critères d'utilis
Analyse en composantes principales	<ul style="list-style-type: none"> .Analyse des liaisons intervariable . .Possibilité de détection de mesures aberrantes .Mise en évidence des couplages linéaires .Représentation synthétique du système .Appréhension de l'information contenue dans de grands tableau 	fait l'hypothèse de linéarité	Part de données brutes et ne suppose aucun codage Suppose qu'un nombre limité de variables sont indépendantes et que les autres peuvent en être déduites.
Analyse des correspondances	<ul style="list-style-type: none"> .Analyse des dépendances entre variables ou groupe de variables. .Synthese visuelle du système. .Appréhension de l'information contenue dans de grands tabl. .Mise en évidence de zones de fonctionnement stables. .Possibilité d'analyse de variables qualitati. .Caracterisation de la trajectoire de fonct. du procédé. 	Fait l'hypothèse de linéarité l'analyse se fait sur des tableaux de contingence.	Nécessite un codage des variables équipondérales.
Analyse structurale	<ul style="list-style-type: none"> .Excellente représentat. (sous forme de graphes ou d'abres dichotomiq .Possibilité de partit .Détection de couplage secondaires. 	Nécessite ue bonne connaissance du système	Besoin de coder les variables (dans le cas discret) en classes équiprobables.
Méthode des nuées dynamiques	<ul style="list-style-type: none"> .Partition d'un nombre de points en sous-ens .Caractèrisation des classes de fonctionnement. 	Le nombre de classes est fixé à l'avance	Ne fait aucune hypothèse.
Ségmentation	<ul style="list-style-type: none"> .Utilisation de variables qualitatives. .Détection des non-linéa .Explication de variable ou de phénomènes. .Possibilité de prédict. .Mise en évidence de variables non signifi. .Application possible pour les variables qualitatives 	<p>Choix de la fonction de séparation pour différencier les groupes obtenus</p> <p>Une variable à expliquer à la fois</p>	Nécessité de coder les variables.

ANNEXE B2

La regression linéaire multiple

Il s'agit d'expliquer une variable Y à l'aide d'une combinaison linéaire de variables indépendantes $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(p)}$ toutes quantitative, sous forme:

$$Y = \sum_1^p \alpha_1 \cdot X^{(1)} + \beta + \varepsilon \tag{1}$$

ε désigne l'erreur résiduelle et β l'ordonnée à l'origine de (1).

Si l'on dispose de N observations pour chacun des variables Y et $X^{(1)}$, la relation devient :

$$\begin{bmatrix} Y \\ Y \\ \vdots \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & \dots & X_1 \\ X_2^{(2)} & & X_2^{(p)} \\ \vdots & & \vdots \\ X_N^{(1)} & & X_N^{(p)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \tag{2}$$

$a_1, a_2 \dots a_p$ et b sont des estimateurs de $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_p$ et dépendent des observations. Raisonnons sur les variables centrées, l'espérance mathématique étant estimée par la moyenne arithmétique des observations et posons:

$$\hat{Y} = Y - \bar{Y} \quad \text{et} \quad \hat{X}^{(1)} = X^{(1)} - \bar{X} \tag{3} \text{ et } (4)$$

La relation (2) précédente s'écrit sous la forme simplifiée :

$$\hat{Y} = (X) \cdot A + E \text{ qui permet d'éliminer la constante b qui sera évaluée par la relation (6) une fois les } a_i \text{ déterminés}$$

$$Y = \sum_{i=1}^p a_i \cdot \bar{X}^{(1)} + b \tag{6}$$

Calcul des coefficients a_i :

R^N est un espace vectoriel muni de la norme euclidienne, les points $X^{(1)}, X^{(2)} \dots X^{(p)}$ engendrent un espace vectoriel $Ev \subset R^N$ de dimension (P) si les $X^{(1)}$ sont indépendants. Il s'agit de rechercher le point Ev le plus proche de $Y \in R^N$. C'est la projection de Y sur Ev , ce qui revient à minimiser la distance:

$$Y - X.A = E = tEE \tag{7}$$

ANNEXE B3

L'analyse des correspondances

Supposons que nous disposant de N observations des (P) variables distinctes (V_j^i désignera la i -ième observation relative à la variable V_j). Ces observations se représentent par un tableau rectangulaire numérique de dimension $P \times N$ appelé tableau de contingence. Il s'agit d'assimiler l'information contenue dans ce tableau.

En tenant compte du caractère probabilistique des données nous poserons:

$$V = \sum_{i,j} V_j^i, \quad P_{1j} = \frac{V_j^1}{V}, \quad P_{i.} = \sum_{j=1}^P P_{1j} \quad \text{et} \quad P_{.j} = \sum_{i=1}^N P_{1j}$$

et donnant désormais, dans R^P , aux N observations, les coordonnées: $P_{1j} / P_{i.}$ en les affectant d'une masse $P_{i.}$. Afin d'étudier les éventuelles proximités entre les lignes (si nous nous intéressons qu'aux variables) du tableau précédent, nous sommes conduits à pondérer les distances et à substituer à la distance euclidienne entre deux variables, une distance définie par :

$$d^2(i,k) = \sum_{j=1}^P \frac{1}{P_{.j}} \left[\begin{array}{cc} P_{1j} & P_{kj} \\ P_{i.} & P_{k.} \end{array} \right]^2$$

Cette distance atténue les disparités entre les ordres de grandeurs des variables. Il suffit maintenant de représenter le point définissant la i -ième observation par les coordonnées $\frac{P_{1j}}{P_{i.} P_{.j}}$ pour transformer la distance précédente en distance de type euclidienne :

$$d^2(i,k) = \sum_{j=1}^P \frac{P_{1j}}{P_{i.} P_{.j}} \left[\begin{array}{cc} P_{kj} & \\ P_{k.} & P_{.j} \end{array} \right]^2$$

ANNEXE B4

La ségmentation

On considère un ensemble d'individus (variables) :

$E = \{ 1, \dots, 1, \dots, n \}$ sur lequel on mesure q caractéristiques quantitatives ou qualitatives $X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_q$. Soit χ_k l'ensemble des modalités prises par la variables X_k . On mesure sur E une variable Y qu'il s'agira d'expliquer à l'aide des X_i ($i=1, \dots, q$). Désignons par θ l'espace dans lequel Y prend ses valeurs.

1. Définition

Considérons l'espace R^P d'un produit scalaire associé à la matrice Q définie positive, et définissons par Y^* une application de E dans R^P , qui fait correspondre à tout $i \in E$ un vecteur $y_i \in R^P$.

Soit N le nuage des vecteurs $y_i \in R^P$ munis d'un poids P_i ($P_i \geq 0$ et $\sum_i P_i = 1$). Dans R^P , on va définir les inerties intra et inter classes. Elles vont mesurer respectivement l'homogénéité d'une classe et la différence entre deux classes.

2. Algorithme de la méthode

Il s'agit de décomposer l'ensemble E , à partir des modalités des X_k , en deux sous ensembles E_0 et E_1 à l'aide d'une dichotomie sur l'un des ensembles χ_k . A l'étape suivante, on réalise une dichotomie de E_0 et E_1 à leur tour, ainsi de suite, on obtient un arbre dichotomique.

La ségmentation utilise une procédure séquentielle. Le choix de la dichotomie va être fait de façon à minimiser la distance inter-groupes entre E_0 et E_1 , donc l'inertie inter-classe. Pour chaque variable X_k , on obtient la dichotomie optimale. On cherche ensuite la variable qui correspond à plus grande inertie inter-classe. Les règles d'arrêt de la méthode vont être fonction:

- .De la taille des classes découpées ou à découper;
- .Du rapport entre l'inertie intra-classe d'une partie et l'inertie totale calculée sur E ;
- .Des différents tests statistiques ,...

ANNEXE B5

Méthode des nuées dynamiques

Partant d'un ensemble d'individus caractérisés par un ensemble fini de paramètres (qualitatifs ou quantitatifs), on cherche à définir une partition, de telle façon que les classes obtenues soient les plus homogènes possibles à savoir :

- .La distance entre classes doit être maximimale;
- .Les individus d'une même classe doivent se ressembler le plus possible.

Le principe de la méthode est que les individus de chaque classe sont définis de façon itérative, par agrégation de points. Cette méthode exige de fixer à l'avance le nombre de classes.

Algorithme de la méthode

Son principe repose sur la constitution des classes d'individus à partir d'un certain nombre de points de E_p (espace des individus engendré par les P caractères) choisis au hasard ou prédéterminés. On définit une distance entre deux éléments i et i' de E_p (distance euclidienne, distance de X^2 ...). Chaque classe C_k est caractérisée par un " noyau ", c.a.d un groupe d'individus considérés comme les plus représentatifs de la classe. Ce noyau comprend j individus (j_1 fixé au départ) et est noté E_1^n pour l'itération n et la classe $C_1^{(n)}$ avec :

$C_1^{(n)}, C_1^{(n)}, C_2^{(n)}, \dots, C_k^{(n)}$; partition de E_p à la n -ième itération. Au départ

choisit l'ensemble $L^{(0)}$ de noyaux origine (itération 0)

$$L^{(0)} = E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, \dots, E_k^{(0)}$$

A l'itération n , il s'agit de construire, à partir de l'ensemble des noyaux de l'itération $(n-1)$, les classes $C_1^{(n)}$, ($i= 1, \dots, k$). on calcul pour cela les distances des individus i aux centres des noyaux :

$$D \left[i, E_1^{(n)} \right] \quad \forall i \in E_p \quad \text{et} \quad \forall i \in (1, \dots, k)$$

$C_1^{(n)}$ est alors l'ensemble des éléments $i \in E_p$ plus proches de $E_1^{(n-1)}$ tout autre noyau $E_{j_1}^{(n-1)} \quad \forall j_1 \in (1, \dots, i-1, \dots, i+1, \dots, k)$. On détermine ensuite l'ensemble $L^{(n)}$ des nouveaux noyaux. Les éléments de ces noyaux sont les individus qui, pour le noyau i de l'ensemble $L^{(n)}$, minimisent une fonction

d'agrégation écartement $A \left[i, i, L^{(n)} \right]$ qui peut avoir pour expression :

$$a- A \left[i, i, E^{(n)} \right] = D \left[i, C_1^{(n)} \right] \quad \text{elle permet de former le noyau } E_1^{(n)}$$

de $C_1^{(n)}$ avec les j_1 individus les plus proches du centre de gravité de $C_1^{(n)}$.

$$b- A \left[i, i, E_1^{(n)} \right] = \frac{D \left[i, E_1^{(n-1)} \right] \quad D \left[i, C_1^{(n)} \right]}{\sum_{j=1}^p D \left[i, E_j^{(n-1)} \right]^2}$$

Le minimum de cette distance donnera un individu proche de l'ancien noyau (grâce au terme $D \left[i, E_1^{(n-1)} \right]$), proche du centre de gravité de $C_1^{(n)}$ (grâce au terme $D \left[i, C_1^{(n)} \right]$) et loin des autres noyaux (grâce au terme du dénominateur).

La convergence de l'algorithme peut nécessiter un grand nombre d'itérations, aussi il est prudent de fixer le nombre maximum d'itérations.

ANNEXE C

TERMINOLOGIE CIMENTIERE

- Air primaire : Air à température ambiante servant à pulvériser le combustible dans le four (combustible solide ou liquide). Dans le cas du gaz naturel il sert à refroidir la tuyère et comme comburant au pilote.
- Air secondaire : Air chaud (jusqu'à 1000 C) récupéré du refroidisseur sert de comburant principal à la combustion.
- Anneau : Dysfonctionnement connu et gênant des fours à ciment il est défini comme étant; "la prise en masse d'une matière, en un domaine du four ayant pour effet d'obstruer plus rapidement sa section"
- Broyage : Opération visant à réduire la granulométrie d'un produit.
- Carrière : Site naturel dont on connaît la composition minéralogique et chimique .
- Chaux libre :Chaux non combinée aux composants SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 après la sortie du four.
- Clinker :Produit résultant de la combinaison de la chaux avec les constituants SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 .
- Concrétion :Couche de cendre (ou matière volatile) dans la partie amont du four.
- Crôutage : Incrustation de la matière sur la paroi du four.
- Cru : Qualicatif de la matière avant son entrée dans le préchauffeur.
- Cuisson: Terme désignant généralement les réactions qui se déroulent dans la zone de clinkerisation.
- Cyclones : Echangeurs verticaux de chaleur .
- Dépoussiérage : Opération visant à ôter aux gaz les poussières qu'ils contiennent (très grande importance en cimenterie).
- Farine : Désigne la matière à la sortie du broyeur.
- Homogénéisation : Opération visant à réduire les écarts de composition de la farine
- Préhomogénéisation : Opération visant à obtenir une carrière artificielle homogène
- Tâche : Désigne une détérioration du croutage en zone de cuisson.

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
 INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 2
 DATE : 01/01/80
 PAGE : 1

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
V01S	DEBIT D'ALIMENTATION DU FOUR	98.000	136.000	0	T/H	FA
V03S	VITESSE DU FOUR	1.000	3.000	0	Tr/Mn	VF
V04S	VITESSE VENTILATEUR DE TIRAGE	200.000	700.000	0	Tr/Mn	VV
V05S	TENEUR EN CHAUX LIBRE	0.500	3.000	0	%	CL
V06T	POIDS AU LITRE CLINKER	800.000	1800.000	0	g/l	PL
V07S	TENEUR EN O2 SORTIE FOUR	3.000	8.000	0	%	O2F
V08T	TENEUR EN O2 SORTIE CYCL A50	3.000	8.000	0	%	O2C
V20S	TENEUR EN CO SORTIE FOUR	0.000	1.000	0	%	COF
V09T	TENEUR EN CO SORTIE CYCL A50	0.000	1.000	0	%	COC
V10T	MOMENT DU FOUR	0.000	100.000	0	%	MF
V21T	CONSOMMATION CALORIFIQUE SPECI	600.000	850.000	0	Kcal/Kg	CCS
V22T	CONSOMMATION EN GAZ	0.000	20.000	4	NM3	CG
V23T	TEMPERATURE ZONE DE CUISSON	1350.000	1550.000	0	°C	TZC
V19S	TEMPERATURE AIR SECONDAIRE	500.000	900.000	0	°C	TAS
V12S	TEMPERATURE VIROLE DU FOUR	0.000	1800.000	0	°C	TV
V24S	TEMPERATURE GAZ SORTIE FOUR	1000.000	1200.000	0	°C	TGI
V25T	TEMPERATURE FUMEE CYCL A54(ST)	300.000	400.000	0	°C	TGC
V13T	TEMPERATURE ZONE I	200.000	400.000	0	°C	TZ1
V14T	TEMPERATURE ZONE II	200.000	500.000	0	°C	TZ2
V15T	TEMPERATURE ZONE III	200.000	500.000	0	°C	TZ3
V16T	TEMPERATURE ZONE IV	100.000	600.000	0	°C	TZ4
V26T	TEMPERATURE ZONE V	1400.000	1550.000	0	°C	TZ5
V27T	TEMPERATURE ZONE VI	1100.000	1200.000	0	°C	TZ6
V28T	TEMPERATURE CLINKER	80.000	150.000	0	°C	TK
V29T	TEMPERATURE GAZ CYCL A52	0.000	1000.000	0	°C	T52
V30T	TEMPERATURE GAZ CYCL A53	0.000	800.000	0	°C	TG53
V31T	TEMPERATURE MATIERE CYCL A53	0.000	200.000	0	°C	TM53
V32T	TEMPERATURE MATIERE CYCL A54	0.000	100.000	0	°C	TM54
V33T	PRESSION AIR SECONDAIRE	0.000	35.000	0	MBar	PAS
V34T	PRESSION CYCL A52	0.000	15.000	0	MBar	PC2

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
 INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 2
 DATE : 01/01/80
 PAGE : 2

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
V17T	PRESSION CYCL A53	0.000	35.000	0	Mbar	PC3
V18T	PRESSION CYCL A54	0.000	15.000	0	MBar	PC4
V11T	INTENSITE VENTILATEUR TIRAGE	300.000	1400.000	0	A	JT
V35T	MODE DE CONDUITE MANUEL	1.000	1.000	0		MCM
V36T	MODE DE CONDUITE AUTOMATIQUE	2.000	2.000	0		MCA
V37S	EXCES D'AIR	0.100	0.200	0	%	EXA
V02S	DEBIT DU COMBUSTIBLE	0.000	800.000	0		FC

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
 INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 1
 DATE : 01/01/80
 PAGE : 1

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
P01S	LONGUEUR EFFECTIVE DU FOUR	68.000	68.000	0	M	XE
P02S	LONGUEUR UTILE DU FOUR	63.150	63.150	0	M	X
P03S	DIAMETRE INTERIEUR DU FOUR	4.150	4.150	0	M	DI
P04S	DIAMETRE EXTERIEUR HORS ZONE	4.610	4.610	0	M	DE1
P05S	DIAMETRE EXTERIEUR ZONE	4.620	4.620	0	M	DE2
P06S	INCLINAISON DU FOUR	3.500	3.500	0	%	P
P07S	FACTEUR D'OBSTRUCTION FOUR	1.000	1.000	0		F
P08S	ANGLE MATIERE	35.000	50.000	0	DEGRE	AGL
P10S	TENEUR MATIERE EN FE2O3/CAO	0.046	0.046	0	%	FEI
P11S	TENEUR MATIERE EN SIO2/CAO	0.339	0.339	0	%	SI
P12S	TENEUR MATIERE EN CACO3/CAO	0.200	0.200	0		CAI
P13S	TENEUR MATIERE EN CAO	0.620	0.620	0	%	CI
P14S	COMPOSITION COMBUSTIBLE CH4	83.000	84.000	0	%	CH4
P15S	COMPOSITION COMBUSTIBLE C2H6	6.650	7.150	0	%	C2H
P16S	COMPOSITION COMBUSTIBLE C3H8	1.950	2.250	0	%	C3H
P17S	COMPOSITION COMBUSTIBLE C4H10	0.300	0.400	0	%	C4H
P18S	COMPOSITION COMBUSTIBLE C5H12	0.080	0.140	0	%	C5H
P19S	COMPOSITION COMBUSTIBLE C6H14	0.100	0.180	0	%	C6H
P20S	COMPOSITION COMBUSTIBLE N2	5.700	6.000	0	%	N2
P21S	COMPOSITION COMBUSTIBLE S	0.000	0.000	0	%	S
P22S	COMPOSITION COMBUSTIBLE O2	0.000	0.000	0	%	O2
P23S	COMPOSITION COMBUSTIBLE HE	0.170	0.210	0	%	HE
P24S	COMPOSITION COMBUSTIBLE CO2	0.180	0.240	0	%	CO2
P25S	POUVOIR CALORIFIQUE INF(PCI)	9450.000	9450.000	0	MTH/M3	PCI
P26S	COEF DE RADIATION MATIERE	0.600	0.800	0		FRM
P27S	COEF DE RADIATION GAZ	0.273	0.273	0		FRG
P28S	COEF DE RADIATION PAROIE	0.650	0.850	0		FRP
P29S	COEF DE CONDUCTION GAZ-PAROIE	19.530	19.530	0		F1
P30S	COEF DE CONDUCTION GAZ-MATIERE	19.530	19.530	0		F2
P31S	COEF CONDUCTION PAROI-MATIERE	19.530	19.530	0		F3

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
 INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 1
 DATE : 01/01/80
 PAGE : 2

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
P32S	COEF CONDUCTION PAROI-ATMOSPH.	0.056	0.066	0		F4
P33S	DENSITE MATIERE	897.000	897.000	0	KG/M3	DM
P34S	DENSITE GAZ	0.800	0.800	0	KG/M3	DG
P35S	DENSITE PAROI	2600.000	2700.000	0	KG/M3	DP
P36S	DENSITE COMBUSTIBLE	0.600	0.800	0	KG/M3	DC
P37S	FATEUR FREQUENCE CAOCO3	1.640	1.640	0	1/H	AF
P38S	FACTEUR FREQUENCE C2S	1.480	1.480	0	1/H	AX
P39S	FACTEUR FREQUENCE C3S	4.800	4.800	0	1/H	AY
P40S	FACTEUR FREQUENCE C3A	3.000	3.000	0	1/H	AA
P41S	FACTEUR FREQUENCE C4AF	3.000	3.000	0	1/H	AB
P42S	FACTEUR FREQUENCE COMBUSTIBLE	5.600	5.600	0	1/H	AC
P43S	ENERGIE ACTIVATION CACO3	38.500	38.500	0	Kcal/KgM	EF
P44S	ENERGIE ACTIVATION C2S	419.000	419.000	0	KJ/M	EX
P45S	ENERGIE ACTIVATION C3S	55.550	55.550	0	KJ/M	EY
P46S	ENERGIE ACTIVATION C3A	420.780	420.780	0	KJ/M	EA
P47S	ENERGIE ACTIVATION C4AF	401.660	401.660	0	KJ/M	EB
P48S	ENERGIE ACTIVATION COMBUSTIBLE	123.860	123.860	0	KJ/M	EC
P49S	CHALEUR SPECIFIQUE GAZ	0.270	0.270	0	Kcal/Kg°C	CPG
P50S	CHALEUR SPECIFIQUE MATIERE	0.260	0.280	0	Kcal/Kg°C	CPM
P51S	CHALEUR SPECIFIQUE PAROI	0.260	0.280	0	Kcal/Kg°C	CPP
P52S	CHALEUR DE REACTION CACO3	425.000	708.320	0	KCal/g	HF
P53S	CHALEUR DE REACTION C2S	-175.000	-175.000	0	KCal/g	HX
P54S	CHALEUR DE REACTION C3S	-118.000	-118.000	0	KCal/g	HY
P55S	CHALEUR DE REACTION C3A	16.000	18.000	0	KCal/g	HA
P56S	CHALEUR DE REACTION C4AF	-16.000	-14.000	0	KCal/g	HB
P57S	CHALEUR DE REACTION COMBUSTIB.	8540.000	8440.000	0	Cal/g	HC
P58S	CONDUCTIVITE THERMIQUE PAROI	0.000	0.000	0	Kcal/M2°H	K
P59S	COMPOSITION DES GAZ O2	4.000	5.000	0	%	O2G
P60S	COMPOSITION DES GAZ CO	0.000	1.000	0	%	COG
P61S	COMPOSITION DES GAZ CO2	0.000	0.000	0	%	CO2G

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
 INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 1
 DATE : 01/01/80
 PAGE : 3

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
P62S	COMPOSITION DES GAZ NO	0.000	0.000	0	%	NOG
P63S	COMPOSITION DES GAZ NO2	0.000	0.000	0	%	NO2G
P64S	COMPOSITION CLINKER CAO	2.500	2.500	0	%	CAK
P65S	COMPOSITION CLINKER C2S/CAO	2.500	2.500	0	%	C2K
P66S	COMPOSITION CLINKER C3S/CAO	1.200	1.200	0	%	C3K
P67S	COMPOSITION CLINKER C3A/CAO	0.000	0.000	0	%	C3AK
P68S	COMPOSITION CLINKER C4AF/CAO	0.000	0.000	0	%	C4AK
P69S	FRACTION DE RADIATION NON ABS.	75.800	75.800	-3		H0
P70S	VITESSE DES GAZ	2200.000	2200.000	0	M/H	VG
P71S	VITESSE DE LA MATIERE	52.800	52.800	0	M/H	VM
P72S	TEMPERATURE ATMOSPHERIQUE	35.000	60.000	0	°C	TA
P73S	CONDIT AUX LIMITES TEMPE-GAZ	1000.000	1200.000	0	°C	TGI
P74S	CONDIT AUX LIMITES TEMPE-PAROI	900.000	1000.000	0	°C	TPI
P75S	CONDIT AUX LIMITES TEMPE-MATI.	700.000	900.000	0	°C	TMI
P76S	POIDS MOLECULAIRE CAOCO3	100.090	100.090	0	g	MC
P77S	POIDS MOLECULAIRE CAO	56.080	56.080	0	g	MC'
P78S	POIDS MOLECULAIRE SIO2	60.090	60.090	0	g	MS
P79S	POIDS MOLECULAIRE DU FE2O3	159.690	159.690	0	g	MF
P80S	POIDS MOLECULAIRE AL2O3	101.960	101.960	0	g	MA
P81S	POIDS MOLECULAIRE C2S	172.300	172.300	0	g	MX
P82S	POIDS MOLECULAIRE C3S	228.330	228.330	0	g	MY
P83S	POIDS MOLECULAIRE C3A	270.200	270.200	0	g	MZ
P84S	POIDS MOLECULAIRE C4A'	485.980	485.980	0	g	MV
P85S	CONSTANTE DES GAZ	1.980	1.980	0	Kcal/Hm2°	R
P09S	TENEUR EN SIO2/CAO	0.046	0.046	0		SI

PROCESSUS : CIMENTERIE DE AIN TOUTA
INSTALLATION : FOUR N°2

TYPE : 3
DATE : 01/01/80
PAGE : 1

CODE	DESIGNATION	MINIMUM	MAXIMUM	EXPO	UNITE	CODE-A
X01S	EPAISSEUR VIROLE	0.020	0.075	0	M	EPV
X02S	EPAISSEUR REVETEMENT	0.200	0.200	0	M	EPR
X03S	EPAISSEUR CROUTAGE	0.000	0.200	0	M	EPC
X04S	CONDUCT THERMIQUE VIROLE	39.000	39.000	0	Kcal/M°C	CTV
X05S	CONDUCT THERMIQUE REVETEMENT	1.500	3.500	0		CTR
X06S	CONDUCT THERMIQUE CROUTAGE	1.570	1.570	0		CTC
X07S	TEMPERATURE VIROLE	180.000	500.000	0	°C	TV
X08S	TEMPERATURE PAROI	0.000	2000.000	0	°C	TP
X09S	TEMPERATURE DES GAZ	0.000	2000.000	0	°C	TG
X10S	TEMPERATURE DE LA MATIERE	0.000	2000.000	0	°C	TM