

tesc

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

21/90

وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

COMMANDE OPTIMALE
DE LA COMBUSTION DANS
UN FOUR DE CIMENTERIE

Proposé par :

Mr. CHIGARA

Etudié par :

Mr. MEDDAHI - A.

Dirigé par :

r. CHIGARA
Mr. ADJTOUTA

PROMOTION :

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

Je tiens à remercier mon promoteur, Monsieur CHIGARA, pour son aide précieuse et ses conseils avisés tout au long de mon projet.

Je remercie mon co-promoteur, Monsieur ADJTOUTA pour son aimable sympathie et pour l'aide et les orientations éclairées qu'il ma fournit.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé à l'élaboration de ce travail.

DEDICACES

§ Je dédie ce travail,

- A ma Mère et à mon Père,
pour tout ce qu'ils m'ont donné
- A ma très chère famille
- A mes chers amis

Nounou, Sofiane, Merzak, Djamel, Halim, Kamel, Sid
Mustapha et Ahmed.

- A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de
près

SOMMAIRE

INTRODUCTION :	1
<u>CHAPITRE 1</u> : LE FOUR ROTATIF A CIMENT .,	3
1- Description sommaire et phénomènes physiques ...	3
2- Principaux phénomènes thermiques régissant son fonctionnement	4
3- Importance du controle de la combustion	5
<u>CHAPITRE 2</u> : ANALYSE DES PHENOMENES DE LA COMBUSTION.....	7
1- Aspects physico-chimique de la combustion.....	7
2- Aspects thermiques de la combustion.....	10
3- Conclusion.....	22
<u>CHAPITRE 3</u> : CHOIX D'UN MODELE DE FLAMME.....	23
1- Introduction.....	23
2- Modélisation.....	23
3- Modèle mathématique de la flamme de cimenterie..	25
4- Simulation.....	28
<u>CHAPITRE 4</u> : COMMANDE OPTIMALE DE LA COMBUSTION.....	32
1- Introduction.....	32
2- Optimisation des processus avec emploi de modèle mathématique.....	32
3- Méthode analytique d'optimisation.....	33
4- Recherche d'un extrémum en présence de contraint es inégalités.....	34

5- Optimisation des processus statiques.....35
6- Commande optimale de la combustion.....37
CONCLUSION.....43

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

L'automatique est une discipline qui comprend, après l'assimilation d'un certain bagage mathématique, une phase théorique fondée sur la connaissance des lois de la physique, de la chimie, etc. sur l'analyse de l'évolution du processus.

Selon le point de vue de l'automaticien, les systèmes qu'ils soient électriques, mécaniques, chimiques etc. sont considérés tout comme des systèmes de communications chargés d'établir des relations bien définies entre un groupe de grandeurs appelées grandeurs d'entrée et un autre groupe appelées grandeurs de sortie.

Maintenant, on cherche non seulement à obliger un système à suivre une consigne prédéterminée, mais aussi à déterminer des commandes optimales au sens d'un critère choisi par l'utilisateur.

Pour le calcul de ces commandes, on a besoin de modèles mathématiques permettant de prédire quel sera le comportement du système lorsque on le soumet à des excitations.

Bien que l'élaboration des modèles dits modèles de connaissance, en faisant appel à des modèles plus généraux (lois de la physico-chimie), ne soit pas une chose aisée, ils sont beaucoup plus riches de significations que les modèles de représentation et contiennent toutes les informations utiles sur le processus. de travail que nous développons comporte 2 parties essentielles.

La première partie sera consacré à l'étude des principaux phénomènes entrant dans la fabrication du ciment. Le premier chapitre donne un aperçu sur le four rotatif et son fonctionnement.

Le deuxième chapitre permettra de voir les caractéristiques des flammes en cimenterie, ainsi que l'analyse de la combustion du point de vue phénomènes physicochimiques.

La seconde partie sera consacrée à l'élaboration du modèle mathématique de la flamme et la commande optimale de la combustion.

.../...

Le chapitre 3 traite des modèles mathématiques et des équations décrivant le modèle choisi.

Le chapitre 4 sera consacré à la commande optimale de la combustion en prenant en compte les contraintes industrielles telles que la pollution, la qualité et la consommation.

CHAPITRE 1

LE FOUR ROTATIF A CIMENT

1) Description sommaire et phénomènes physiques :

Le four rotatif est constitué d'un cylindre d'acier garni intérieurement par un matériau réfractaire assurant sa protection vis-à-vis des hautes températures régnant à l'intérieur du four.

Le four est une des parties les plus importantes d'une cimenterie, c'est à l'intérieur de son foyer qu'a lieu la combustion du gaz naturel, produisant la chaleur nécessaire à la cuisson du ciment. Le four tourne avec une vitesse comprise entre 0,4 et 1,5 tours/minutes, il est mû par deux moteurs électriques. Il présente une inclinaison de 3 à 5 % favorisant la circulation de la matière, et repose sur des trains de galets.

Les fours sont protégés intérieurement par un revêtement en briques réfractaires de magnésie dans la zone de clinkérisation.

Le four a une longueur variant entre 60 et 75 mètres et le diamètre variant entre 4 et 5 mètres, ce genre de four est utilisé pour le procédé par voie sèche, ces fours courts fonctionnent avec le préchauffeur à cyclones, la matière première sous forme de poudre broyée finement subit d'abord le préchauffage dans le préchauffeur à cyclones.

Au cours de la traversée du préchauffeur, la transformation chimique et thermique de la matière est telle qu'elle permet pour la cuisson la mise en oeuvre d'un four rotatif de longueur moins que celle des fours longs. En effet le séchage et la décarbonatation partielle, qui se font dans les zones de séchage et de préchauffage des fours longs s'effectuent à l'intérieur du préchauffeur (à l'extérieur du four).

La matière crue est introduite à la partie supérieure du four, tandis que le combustible est injecté par le brûleur à l'autre extrémité en même temps que l'air de combustion, matières et gaz de combustion se déplacent donc en sens inverse.

.../...

Au fur et à mesure de son avancement dans le four, sous les effets combinés de la pesanteur et de la rotation du four, la matière se chauffe progressivement et passe par plusieurs stades de transformation.

La matière rencontre des gaz de plus en plus chauds qui provoquent les effets suivants :

- Dissociation du calcaire (vers 900° C)
 $\text{Ca CO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Clinkerisation dans la zone terminale (zone de cuisson) vers 1200° C et 1300° C, puis la formation de silicates (2 CaO.SiO_2 ; 3 $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$; 4 $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$; 3 CaO.SiO_2).

Avec la disparition progressive de CaO (vers 1450° C)

Il en résulte que le gaz carbonique (CO₂) commence à s'échapper à partir de 400° C et cesse à 1000° C. A l'apparition du premier liquide dans la zone de cuisson, la matière commence à s'agglomérer pour former des grains arrondis (du fait du mouvement de rotation du four).

Le mélange cuit appelé "clinker" quitte le four à la température comprise entre 1100° C et 1200° C, passe ensuite dans un refroidisseur.

II) Principaux phénomènes thermiques régissant son fonctionnement

Le fonctionnement du four fait intervenir les trois modes de transmissions de chaleur : rayonnement, conduction et convection.

- Par rayonnement entre les gaz de combustion et la matière à cuire.
- Par convection entre les gaz de combustion et la matière;
- Par rayonnement entre les parois et la matière.
- Par conduction pendant la rotation, la paroi chauffée par rayonnement et convection vient au contact avec la matière.

.../...
Au dessus de la température du gaz de 900° C (dans la zone de cuisson), on peut admettre que la plus grande partie des échanges s'effectuent par rayonnement.

Les rayonnements de CO₂ et de la vapeur d'eau sont si intenses que la transmission de la chaleur dans les fours est issue pour la plus grande partie du rayonnement de ces gaz.

L'air et aussi évidemment, l'oxygène et l'azote n'ont aucune émissivité et ne peuvent donc transmettre de la chaleur que par contact.

En conclusion on peut admettre, que dans le cas des fours courts, la transmission de chaleur se fait principalement par rayonnement.

1.3.1 IMPORTANCE DU CONTROLE DE LA COMBUSTION

La combustion dans le four rotatif de cimenterie joue un rôle très important dans la cuisson du clinker, la zone du four où s'effectue la cuisson est la plus intéressante, le contrôle de la combustion entraîne celui de la cuisson; et ceci a pour conséquence de jouer sur la qualité du ciment.

Un contrôle optimal de la combustion, permet d'avoir, dans la zone de cuisson, une température élevée, entraînant une quantité de chaleur transmise maximale, donc une bonne cuisson du clinker.

Le second facteur en relation avec le contrôle de la combustion est la consommation calorifique.

Un contrôle optimal de la combustion, donne un débit combustible correspondant et permet de connaître la quantité de combustible qu'on doit injecter au niveau du brûleur.

La combustion doit être contrôlée de telle sorte à minimiser la consommation de combustible, est en constante augmentation.

Le 3ème facteur et qui est très important, est la pollution du milieu environnant par les fumées qui s'échappent par les cheminées.

Nous savons que l'énergie calorifique contenue dans un combustible se dégage au cours de l'oxydation vive des éléments C et H qui produit une flamme à haute température.

Dans une unité thermique de production de chaleur, le dégagement maximale d'énergie s'obtient au cours d'une combustion oxydante complète conduisant à la formation exclusive de CO₂, H₂O, SO₂ avec le minimum d'excès d'air possible.

Malheureusement, dans la pratique, la combustion s'éloigne plus ou moins de cet aspect idéal ceci est dû tant à la structure complexe des combustibles industriels qu'aux imperfections des équipements de chauffe (essentiellement les défauts de mélange air/combustible au niveau des brûleurs). Ceci conduit à la formation

d'imbrûlés ~~quide~~, plus souvent se présente sous forme d'imbrûlés solides riches en carbone accompagnée dans le cas le plus défavorable d'imbrûlés gazeux (CO, essentiellement, produit gazeux très toxique).

Il ya aussi les oxydes d'azote produit au cours de la combustion, se présentant sous forme d'oxyde azotique (NO) et du dioxyde d'azote (NO₂).

Le composant le plus dangereux pour la sante est NO₂. Il représente au plus 5 % de l'ensemble NO + NO₂ éjecté par la cheminée mais une partie du NO émise se reconvertit en NO₂ dans l'atmosphère, ces oxydes d'azote se forment au cours de la combustion, dès que l'azote et l'oxygène sont en présence à haute température.

On peut limiter leur formation par abaissement de l'excès d'air (augmentation de la richesse).

Dans le contrôle énergétique actuel, et compte tenue des contraintes imposées par la protection de l'environnement, le souci constant du thermicien est d'économiser l'énergie en brûlant le plus efficacement possible le combustible dont il dispose, tout en limitant l'émission des agents polluants dans l'atmosphère.

C'est la recherche de ce compromis qui conditionne maintenant le réglage des fours et qui conduit à sélectionner des équipements de grande qualité tant au point de vue brûleurs proprement dits qu'au point de vue système de régulation.

CHAPITRE 33ANALYSE DES PHENOMENES DE LA COMBUSTION31) ASPECTS PHYSICO-CHIMIQUE DE LA COMBUSTION

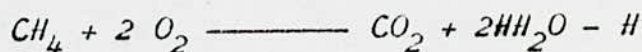
La combustion dans le four rotatif résulte de la combustion du gaz naturel et de l'oxygène de l'air

331) ASPECTS THERMODYNAMIQUES

La combustion du méthane, principal constituant du gaz naturel n'est possible qu'en présence d'un catalyseur.

Si la température d'une portion du mélange est portée à un niveau suffisamment élevé, et pour des proportions convenables des deux constituants, une réaction s'amorce et se propage avec disparition des espèces initiales et formation de corps nouveaux (CO_2 , H_2O).

On appelle énergie de combustion la différence entre la somme des énergies de formation des produits et des produits initiaux :



L'énergie de combustion apparaît sous la forme d'une variation d'enthalpie H .

32) ASPECTS CINETIQUES DE LA COMBUSTIONa) Vitesse Réactionnelles

La vitesse réactionnelle V_r peut être exprimée par la variation dans le temps de la concentration de l'un des réactifs initiaux ou au contraire, de la variation dans le temps de la concentration d'un des produits de la réaction.

b) AUTO-INFLAMMATION

Si le comburant et le combustible sont simplement mis en contact sans être intimement mélangés, la combustion, en admettant la réaction amorcée, sera contrôlée par la vitesse de diffusion.

.../...

Donc le mélange ne s'enflammera que pour des conditions de température, de pression et de concentration déterminées.

Les concentrations sont repérées par la richesse définie par le rapport suivant :

(combustible/comburant) réel

(combustible/comburant) stochiométrique

Pour un mélange riche ($r < 1$) il existe une température d'auto-inflammation (pour une pression donnée), température limite au dessous de laquelle le mélange ne réagit pas.

De même il existe une pression limite d'auto-inflammation (pour une température donnée).

Par ailleurs, lorsque le mélange est porté à une pression donnée à la température d'autoinflammation, celle-ci intervient dans tout le volume. Toute fois l'autoinflammation n'a lieu qu'après l'instant où la température limite est atteinte.

Les proportions combustible/comburant doivent se situer dans certaines plages qu'on appelle limites d'inflammabilité.

c) Propagation

L'inflammation est due au chauffage localement du mélange à partir de ce point d'allumage la combustion peut se propager dans le mélange froid, traversant progressivement tout le volume, que le gaz occupe et transformant les produits initiaux en gaz brûlés.

1.3) CARACTERISATION DES FLAMMES EN CIMENTERIE

La flamme est une flamme à prémélange, l'air de combustion entrant dans le four parallèlement au jet de gaz et diffusant lentement dans celui-ci donnent une flamme longue et lumineuse.

La flamme du four rotatif est une flamme de diffusion en régime me turbulent c'est-à-dire un régime d'écoulement pour lequel les

propriétés en chaque point varient d'une manière ératique dans le temps.

La flamme en cimenterie est caractérisée par sa stabilité, cette stabilisation consiste à accrocher un front de flamme au nez du brûleur. Pour y parvenir on fait appel aux conditions suivantes qui doivent être remplies simultanément :

- La concentration en combustible est comprise entre les limites d'inflammabilités.
- L'énergie disponible est suffisante pour déclencher le mécanisme d'allumage.
- La vitesse de déflagration est égale et opposée à la vitesse du mélange frais.

1.4) PARAMETRES DE CONTROLE DE LA COMBUSTION

Les paramètres influençant la qualité de la combustion :

a/ - L'excès d'air

Il est d'une importance capitale en ce qui concerne la qualité de la combustion, on constate que lorsque l'excès d'air (e) croit :

- Le rendement thermique utile décroît.
- L'indice pondéral (IP), qui traduit la quantité de particules solides recueillies dans les fumées évacuées, présente un minimum situé vers $e = 53\%$, au dessous de ce réglage la combustion manque d'air et au delà, la flamme est perturbée.
- La teneur en oxyde d'azote (NO_x) des fumées présente un maximum situé vers $e = 35\%$ à 40% . Au dessous de ce réglage le rendement de conversion de N_2 en NO_x est contrarié par un manque d'oxygène, au le refroidissement important de la flamme retentit le processus de conversion :



b/ - L'augmentation de la viscosité des gaz diminue la turbulence de la flamme.

c/ - A partir du réglage donné du brûleur, il est possible de prévoir la composition des fumées évacuées.

d/ - On peut prévoir, à partir de la connaissance de la teneur en un ou plusieurs constituants, l'excès d'air.

e/ - La température de l'air de combustion

le préchauffage de l'air a pour effet d'augmenter la température des gaz brûlés, ce qui favorise le transfert de chaleur

33) Aspects thermiques de la combustion

La transmission de puissance calorifique par une flamme se développant dans le four résulte des propriétés thermiques des gaz en cours de combustion que l'aérodynamique des écoulements dans le foyer du four.

Le processus de mélange entre les réactifs intervient directement sur les propriétés thermiques des flammes.

D'une manière générale, dans une flamme de diffusion aux combustibles gazeux, un mélange rapide favorise les hautes intensités de combustion et l'apparition de températures maximales élevées.

La figure 1 donne un exemple caractéristique des distributions de températures maximales et axiales le long d'un four.

Sous l'aspect purement thermique, la recherche du rendement optimal dans le foyer passe par celle d'une température de combustion élevée.

33.1) Température théorique de combustion dite température adiabatique de flamme :

La température théorique de combustion est la température maximale permise par la thermodynamique, que peuvent atteindre les gaz brûlés résultant de la combustion.

Cette température est dite adiabatique car la flamme est supposée ne pas échanger de flux calorifique par rayonnement ou convection avec la charge. C'est une grandeur calculable.

33.1.1) Paramètres influençant la température adiabatique

Pour un combustible donné, les principaux paramètres d'exploitation ayant une influence sur la température de combustion sont :

- La richesse du milieu réactionnel (l'excès d'air au niveau du brûleur pour un générateur de chaleur).

.../...

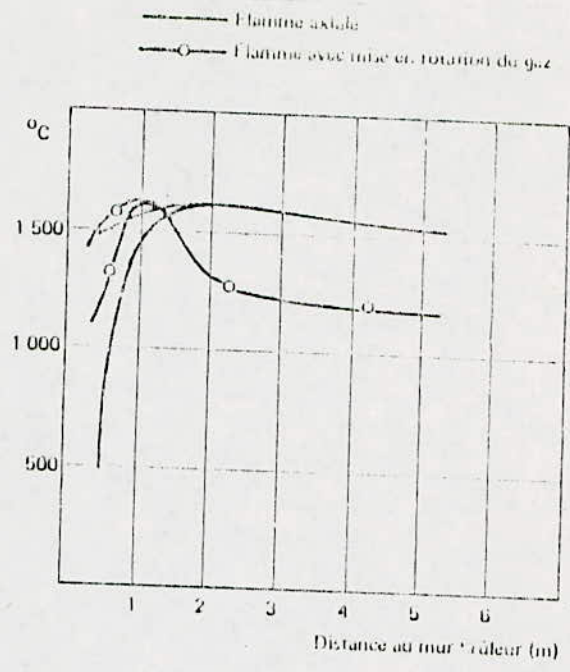


FIG 333.1 - Températures maximales et axiales dans une flamme de gaz naturel

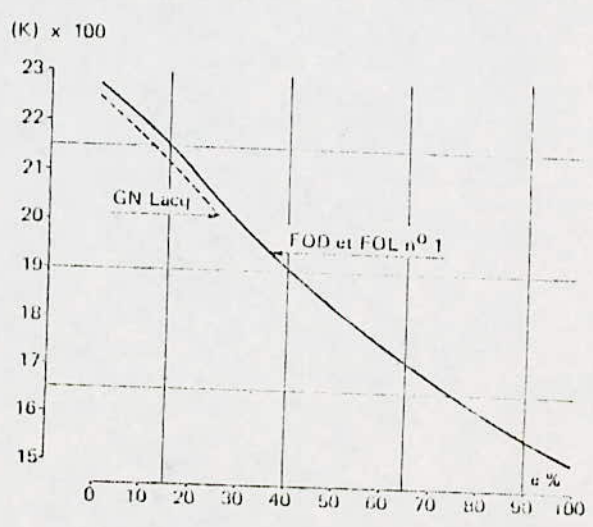


FIG 333.2 - Températures adiabatiques de flamme en fonction de l'excès d'air

- le préchauffage de l'air de combustion

Même si la température adiabatique revêt un caractère théorique, il n'en demeure pas moins que l'étude de son évolution en fonction de ces paramètres présente un grand intérêt pratique, du fait que les températures réelles de combustion suivent les mêmes sens de variation, ce qui permettra ainsi de présager les répercussions sur le comportement du four.

a) Influence de la richesse :

La figure III.2 rend compte de l'évolution de t_{ad} avec l'excès d'air pour deux combustibles industriels.

La décroissance continue de la température de combustion que l'on constate quand augmente l'excès d'air provient du volume continuellement croissant des produits de combustion qu'il faut "chauffer", la figure III.3 rend compte des calculs effectués par GDF à partir du gaz naturel, pour une large gamme de taux d'aération ($n = 0,4$ à $2,5$ c'est à dire $\lambda = 2,5$ à $0,4$). On remarque que la courbe présente un maximum au voisinage du mélange stoechiométrique.

Ce maximum au voisinage du mélange stoechiométrique justifie, sur le plan des transferts, le fonctionnement à faible excès d'air des fours.

b) Influence du Préchauffage de l'air :

Dans les fours, on utilise au maximum l'enthalpie des gaz sortant du foyer pour rechauffer l'air de combustion jusqu'à des températures de 800 à 900°C sur le plan thermodynamique, le préchauffage du comburant a pour conséquence d'accroître l'enthalpie initiale DH_i (combustible + comburant), tout au moins jusqu'à une certaine limite.

La figure III.4 montre l'évolution de la valeur maximale de t_{ad} en fonction de la température de préchauffage de l'air.

En se limitant au domaine pratique $t_{air} = 0^\circ\text{C}$ à 1000°C on retiendra qu'un préchauffage de D tair a pour résultat d'accroître t_{ad} d'une quantité comprise entre $\frac{D}{5}$ tair et $\frac{D}{3}$ tair.

5

3

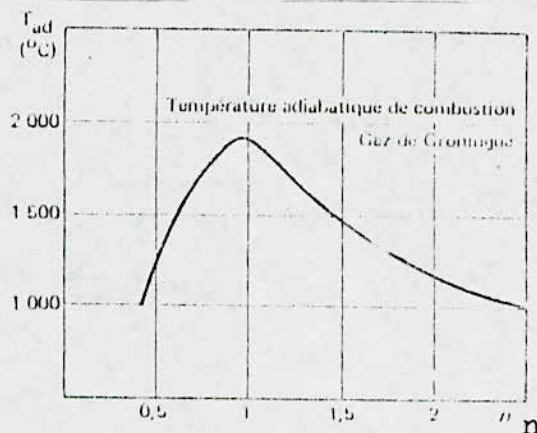


FIG III.3 - Température de combustion en fonction du taux d'aération

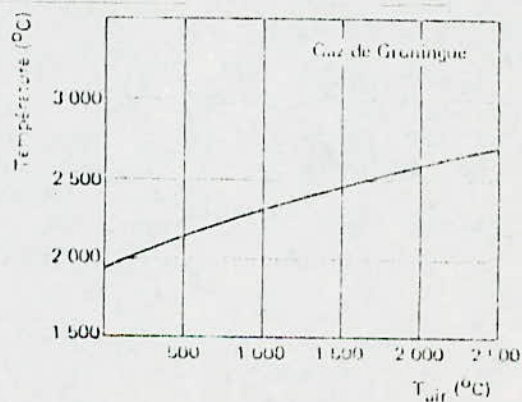


FIG III.4 - Valeur maximale de la température adiabatique en fonction de la température de préchauffage de l'air.

33.2) Transfert de chaleur et température adiabatique

Dans le foyer d'un four, la température adiabatique t_{ad} n'est jamais atteinte, puisque le but recherché est précisément que la flamme cède de l'énergie calorifique à la charge.

Néanmoins pour un combustible donné, les variations du transfert de chaleur Q_f dépendent de celles de t_{ad} .

33.3) Température réelle de combustion :

Sous sa forme la plus simple, la simulation mathématique des transferts de chaleur dans le four nécessite d'affecter aux gaz de combustion et à la flamme une température unique, c'est-à-dire une température "moyenne" représentative des transferts thermiques à la charge, notée T_g , et appelée température de foyer. C'est en quelque sorte une "température résultante de combustion", traduisant l'équilibre existant entre le dégagement de chaleur dû à la réaction d'oxydation et l'échange d'énergie avec la charge.

33.4) Chaleur transmise à la charge :

L'objectif de l'étude faite précédemment est d'exprimer la quantité de chaleur transmise à la charge, en fonction des paramètres de contrôle de la combustion et de la température de foyer T_g , connaissant que celle-ci est fonction de la température adiabatique.

Pour le calcul de la quantité de chaleur transmise on démarre à partir de la relation donnant le bilan énergétique;

$$\left[\begin{array}{l} \text{Chaleur de combustion - chaleur de dissociation} \\ + \text{Chaleur sensible} \end{array} \right] =$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{A accroissement d'enthalpie des produits de} \\ \text{combustion} \end{array} \right]_{T_0}^{T_g}$$

.../...

Avec $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Lorsque la température atteinte lors de la combustion oxydante manipulée avec de l'air, sous des richesses relativement faibles, est inférieure à 2000°C , on pourrait négliger la chaleur de dissociation dans le bilan énergétique.

$$\left[\text{PCI} + \text{chaleur sensible des réactifs} \right] = \text{DHi} \quad (1)$$

DHi: enthalpie totale des réactifs :

PCI: pouvoir calorifique du combustible

le bilan énergétique global du foyer du four donne :

$$\text{DHi} = \text{Qf} + \left[\text{DHg} \right]_{T_0}^{Tg} \quad (2)$$

DHg : Accroissement d'enthalpie des produits de combustion

De l'équation (2), on tire Qf en remplaçant DHi par son expression en utilisant l'équation (1) on a :

$$\text{Qf} = \text{DHi} - \left[\text{DHg} \right]_{T_0}^{Tg} = \text{PCI} + \text{chaleur sensible} - \left[\text{DHg} \right]_{T_0}^{Tg}$$

Calcul de DHg

Soit un système constitué de a espèces différentes d'atomes, a_i étant le nombre d'atomes de chaque espèce,

n_j le nombres de molécules

l'enthalpie du système est :

$$= \sum_{i=1}^a a_i \cdot H_i - \sum_{j=1}^m m_j \cdot \frac{Q_j^T}{p_j}$$

La variation d'enthalpie d'un système entre deux états extrêmes, est égale à la variation d'enthalpie de tous les atomes constituant le système, supposés libres, diminuée de la variation du potentiel thermochimique du système.

La variation du potentiel thermochimique d'une môle à

partir de ses éléments atomiques est égale à la somme des variations diminuée de la variation d'enthalpie.

$$\frac{DQ}{DT} = \sum_{i=1}^a a_{ij} \cdot \frac{DH_i}{DT} - \sum_{j=1}^m m_j \cdot \frac{DH_j}{DT}$$

La variation d'enthalpie des produits de combustion devient :

$$\Delta H_s = \sum_{i=1}^a a_i \cdot DH_i - \sum_{j=1}^m m_j \cdot \left[\sum_{i=1}^a a_{ij} \cdot \frac{DH_{ij}}{DT} - \frac{DH_j}{DT} \right]$$

Par définition, l'enthalpie d'un constituant i à la température T est définie par :

$$DH_i = C_{pm} \cdot T$$

C_{pm} : chaleur spécifique moyenne.

L'expression de DH_g devient définitivement :

$$\left[DH_g \right]_{T_0=0}^{T_g} = \sum_{i=1}^a a_i \cdot C_{pm,i} \cdot T_g - \sum_{j=1}^m m_j \left[\sum_{i=1}^a a_{ij} \cdot C_{pm,ij} \cdot T_g - C_{pm,j} \cdot T_g \right]$$

Calcul des chaleurs sensibles des réactifs

Pour améliorer la combustion, c'est-à-dire élever la température maximale théorique, donc augmenter le transfert de chaleur, on procède à un préchauffage de l'air de combustion, qui permet à l'air d'atteindre une température comprise entre 800 et 900°C.

Par contre le combustible ne subissant pas de préchauffage n'a aucun effet sur la chaleur sensible.

L'expression de la chaleur sensible des réactifs est :

chaleur sensible = chaleur sensible de O_2 + chaleur sensible de N_2

$$= C_{pm, O_2} \cdot T_a + 3,76 C_{pm, N_2} \cdot T_a$$

Connaissant que la composition de l'air est : $O_2 + 3,76 N_2$ L'expression de la chaleur spécifique en fonction de la température est :

$$C_p = a_0 + c_1 \frac{T}{1000} + \dots$$

Pour trouver C_{pm} , il suffit d'intégrer l'expression de C_p .

$$C_{pm} = \frac{1}{T} \int_{T_0=0}^T C_p \cdot dT = \frac{1}{T} \left[a_0 T + \frac{1}{2} a_1 \frac{T^2}{1000} \right] = a_0 + \frac{1}{2} a_1 \frac{T}{1000}$$

Les coefficients a_0 et a_1 sont :

Azote $a_0 = 6,62$; $a_1 = 7 \cdot 10^{-4}$

Oxygène $a_0 = 6,94$; $a_1 = 8 \cdot 10^{-4}$

$$C_{pm} = 6,94 + \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \frac{T_a}{1000}$$

N₂

$$C_{pm} = 6,92 + \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \frac{T_a}{1000}$$

N₂

Calcul du P C I

Le pouvoir calorifique du combustible est donné par :

$$C P I = H_i \cdot D$$

Avec H_i : pouvoir calorifique par unité de volume

$$H_i = 9777 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ pour le gaz naturel de}$$

Hassi R'mel

D : débit du combustible.

Pour la composition du gaz naturel de Hassi R'mel voir Annexe J.

En conclusion, l'expression de la quantité de chaleur transmise à la charge devient :

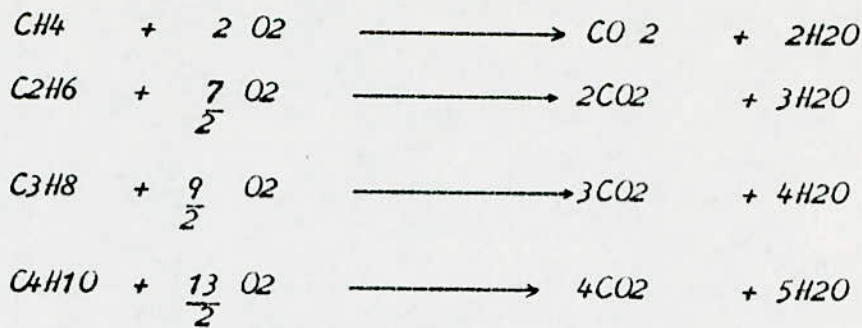
$$Q_L = P C I + \text{chaleur sensible} - \left[D H_i g \right] \frac{T_g}{T_0}$$

$$= P C I + C_{pm} \cdot T_a + C_{pm} \cdot T_a - \sum_i a_i \cdot C_{pm} \cdot T_g$$

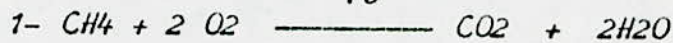
$$+ \sum_{j=1}^m m_j \cdot \left[\sum a_{ij} \cdot C_{pm j} \cdot T_g - C_{pm j} \cdot T_g \right]$$

Pour le cas de la cimenterie, la combustion du gaz de l'air fait intervenir les réactions suivantes :

.../...



Calcul de la $[DH_g]_{T_0}^{T_g}$ pour ce système :



$$\sum_{T=1}^a a_i \cdot C_{pmi} \cdot T_g = \left(C_{pm}^C + 4 C_{pm}^{\text{O}_2} + 4 C_{pm}^{\text{H}_2} \right) \cdot T_g$$

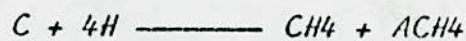
$$\text{Calcul de : } \sum m_j \cdot \left[a_{ij} C_{pmij} T_g - C_{pmj} T_g \right]$$



$$A_{\text{CO}_2} = \left[C_{pm}^C + 2 C_{pm}^{\text{O}_2} - C_{pm}^{\text{CO}_2} \right] \cdot T_g$$



$$A_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \left[2 C_{pm}^{\text{H}_2} + C_{pm}^{\text{O}_2} - C_{pm}^{\text{H}_2\text{O}} \right] \cdot T_g$$



$$A_{\text{CH}_4} = \left[C_{pm}^C + 4 C_{pm}^{\text{H}_2} - C_{pm}^{\text{CH}_4} \right] T_g$$

L'expression de DH_g , en tenant compte de la concentration de CH_4 dans le gaz, devient :

$$DH_g = \alpha 1 \left[C_{pm}^C + 4 C_{pm}^{\text{O}_2} + 4 C_{pm}^{\text{H}_2} \right] \cdot T_g$$

$$+ \alpha 1 \left[2 C_{pm}^{\text{H}_2} + 4 C_{pm}^{\text{O}_2} - C_{pm}^{\text{H}_2\text{O}} \right] T_g$$

$$- \alpha 1 \cdot \left[C_{pm}^C + 2 C_{pm}^{\text{O}_2} - C_{pm}^{\text{CO}_2} \right] \cdot T_g$$

$$- \alpha 1 \cdot \left[C_{pm}^C + 4 C_{pm}^{\text{H}_2} - C_{pm}^{\text{CH}_4} \right] T_g$$

$\alpha 1$: concentration de CH_4 dans le gaz (en %)

.../...

La même démarche est suivie les trois autres constituants. En définitif l'expression de Q_f devient :

$$Q_f = H_i \cdot D + (C_{pm} + C_{pm}) \cdot T_a - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \cdot T_g \\ + 14 \cdot y \cdot T_g + 10 \cdot z \cdot T_g + (w_1 + w_2 + w_3 + w_4) \cdot T_g$$

Les expressions des x_i , y , z et w_i sont données en Annexe J.

Le but de ce chapitre est d'exprimer la quantité de chaleur transmise à la charge en fonction des paramètres de commande qui sont la richesse, la température de l'air, et le débit du combustible pour ce la on exprime T_g en fonction de la température adiabatique et fumée, celle-ci est donnée par la relation semi-empirique de HOTTEL :

$$T_g = T_f + \frac{1}{7} (T_{ad} - T_f) \quad (2)$$

Avec T_f : température des gaz évacués du foyer la température adiabatique est donné par :

$$T_{ad} = 2 \frac{h_o - h_a}{(1 + r F_s) M^2 \xi \cdot R_1} \quad (3)$$

F_s : rapport stoechiométrique égal à 0,0659

$$\xi = 1,3$$

$$R_1 = 287 \text{ j/kg}$$

r : richesse du milieu réactionnel

M : nombre de Mach

h_o : enthalpie globale du gaz naturel : $h_o = 12,6804$

h_a = enthalpie globale de l'air : $h_a = -2,07174$

Le nombre de mach peut être calculé par la donnée des pressions statiques et totale; P et P_t , suivant la relation suivante :

$$P = \frac{P_t \left(1 + \frac{\xi - 1}{2} M^2\right)^\xi}{1 + \frac{\xi - 1}{2} M^2} \quad (4)$$

La température de la fumée est donnée par :

$$T_f = \frac{PCJ}{VF \cdot C_{pf}} \quad (5)$$

$$= \frac{H_i \cdot D}{VF \cdot C_{pf}}$$

VF : volume de la fumée

C_{pf} : chaleur spécifique de la fumée

$$C_{pf} = C_{p_{O_2}} \cdot V_{O_2} + C_{p_{CO_2}} \cdot V_{CO_2} + C_{p_{CO}} \cdot V_{CO} + C_{p_{H_2}} \cdot V_{H_2} + C_{p_{N_2}} \cdot V_{N_2} \quad (6)$$

Le volume de la fumée est donné par :

$$V_f = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{\alpha + \beta} \quad (7)$$

α, β concentrations respectives de CO₂ et CO dans la fumée.

L'expression de la richesse en fonction des concentrations des gaz résultant de la combustion est :

$$r = 1 + 3,78 \frac{\beta + h - 2w}{2(100 - \alpha - \beta - h - w)} \quad (8)$$

Avec α, β, h et w les concentrations respectives (en %) de CO₂, CO, H₂ et O₂

La connaissance de α et β permet de déterminer à partir des diagrammes de combustion, les expressions de h et w

$$h = \frac{V_{H_2O}}{C_{CO_2}} \frac{(1 + \frac{\beta}{\alpha})}{\frac{B/\alpha}{B+K}} \cdot \alpha \quad (9)$$

K : constante d'équilibre K = 2,56

$$w = \frac{100 - A\alpha}{4,78} \quad (10)$$

Avec

$$A = \frac{100}{\alpha_0} \frac{(1 + \frac{\beta}{\alpha})}{\alpha} - 1,89 \frac{\beta}{\alpha} - 0,89 \frac{h}{\alpha} \quad (11)$$

$$\alpha_0 = 11,9$$

En définitif, l'expression de la chaleur transmise à la charge devient :

$$Q_f = H_i \cdot D + (a_0 + b_0) \cdot T_a + \frac{1}{2} (a_1 + b_1) \cdot T_a^2 + \frac{k \cdot T_g}{1000}$$

Avec $k = \sum_{i=1}^4 x_i + 14 y + 10 z + \sum_{i=1}^4 w_i$

La valeur de k est calculée en Annexe J.

III) Conclusion :

D'après l'étude faite précédemment et l'objectif fixé, à savoir un transfert maximum de chaleur à la charge, que les paramètres de contrôle de la combustion apparaissant dans l'expression de la quantité de chaleur transmise sont :

Le débit du combustible : D

La richesse du milieu : r (ou l'excès d'air : e)

La température de préchauffage de l'air : T_a

En définitif, contrôler la combustion revient à agir sur ces trois paramètres de commande.

Chapitre III

Choix d'un modèle de flamme

1 Introduction :

La modélisation est une démarche ambitieuse et le modéliste est amené à prendre des risques car, contrairement à l'automaticien qui, lui travaille dans un espace homogène, sa matière première (des données expérimentales issues du monde extérieur) est hétérogène avec son produit fini (une formulation mathématique abstraite).

La modélisation présente d'emblée des difficultés assez dérangeantes car elle contraint à faire généralement un retour en arrière sur les objectifs, sur l'intérêt et l'utilité du modèle.

Ce modèle ne pouvant être universel, devra être spécifique de la fonction particulière recherchée.

1.1) Modélisation :

On dit que l'on a modélisé un processus physique, s'il on est capable de prédire quel sera son comportement (sortie) lorsqu'on le soumettra à des excitations (entrées) connues, pour des raisons de commodité pratique, le modèle sera mathématique afin d'être simulé sur un ordinateur numérique. On recherche donc une relation mathématique liant les variables mesurées d'entrée et sortie.

Il existe 2 types de modèles : les modèles de connaissance et les modèles de représentation, qui correspondent à des objectifs différents.

a) Modèle de connaissance :

Un modèle de connaissance est un modèle dont la structure a été établie en faisant appel à des modèles plus généraux (lois de la physico-chimie). Les paramètres des modèles de connaissance ont alors un sens physique :

longueur, résistance électrique, etc.

...!...

Ces modèles sont beaucoup plus riches de signification que les modèles de représentation et contiennent toutes les informations utiles sur le processus, ils sont par contre plus onéreux et difficiles à obtenir.

b) Modèle de représentation :

Ces modèles n'ont aucun pouvoir explicatif de la structure physique du processus, leur structure n'est qu'une relation mathématique qui va relier localement les mesures des différentes variables du processus.

Dans la construction d'un modèle mathématique, le phénomène réel est simplifié, celui-ci doit tenir compte de tous les facteurs qui exercent une influence primordiale sur le processus, tout en évitant de s'encombrer d'une masse de facteurs peu importants secondaires, dont la prise en compte ne ferait que compliquer la discussion mathématique et gêner une vue d'ensemble des recherches effectuées.

Suivant le processus considéré, la description mathématique qui compose la structure du modèle se présente sous la forme d'un système d'équations finies ou d'équations différentielles traduisant l'influence mutuelle des divers paramètres.

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

Ainsi, le modèle par lequel est interprété un processus physico chimique se présente sous la forme d'une certaine écriture mathématique, qui fait la jonction entre les paramètres du processus.

Le but final de l'élaboration des modèles mathématiques consiste en la prévision des résultats relatifs à la conduite du processus et on la formulation des recommandations concernant les possibilités d'influer sur le cours du processus.

Le problème fondamental de la cybernétique (science qui étudie les systèmes) consiste en la commande du système ou du processus considéré. Il en résulte qu'un modèle mathématique

comprend la description des liaisons entre les variables fondamentales du processus dans les régimes stationnaires (modèle statique) et aussi dans le temps lorsqu'on passe d'un régime à un autre (modèle dynamique).

- Modèle statique :

Un modèle statique ne prend pas en considération les variations dans le temps des paramètres du processus. L'élaboration d'un modèle statique du processus est précédé de l'analyse de sa nature physico-chimique, du but auquel il est destiné et des équations fondamentales qui décrivent la classe à laquelle il appartient et ses particularités en tant que processus type.

On met ensuite en évidence les paramètres d'entrée et de sortie du processus.

- Modèle dynamique.

L'élaboration d'un modèle dynamique se ramène à obtenir ce que l'on appelle les caractéristiques dynamiques du processus, c'est à dire à établir quelle sont les liaisons qui unissent ses variables fondamentales lorsque celles-ci varient dans le temps. Les caractéristiques dynamiques peuvent être obtenues soit par la théorie, soit par l'expérience, soit par combinaison des deux méthodes.

En conclusion, le modèle mathématique complet d'un processus comprend : les variables fondamentales du processus, les liaisons entre variables fondamentales dans les régimes stationnaires, les contraintes sur le processus, le critère d'optimalité, les liaisons entre variables fondamentales en régimes non stationnaires.

III) Modèle mathématique de la flamme de cimenterie :

D'après l'étude faite au chapitre 2 et l'analyse des phénomènes physico-chimiques et thermiques de la combustion, on peut déduire les relations mathématiques décrivant un modèle de flamme répondant à l'objectif fixé au début de cette étude, à savoir, un transfert maximum de chaleur à la charge dans la zone de cuisson du four.

Ces équations sont données à la partie (9.4) du Chapitre 2.

En définitif le modèle mathématique de la flamme est décrit par les équations suivantes :

1 - Quantité de chaleur transmise : Q_f

$$Q_f = H_i \cdot D + (a_0 + b_0) t_a + \frac{1}{2} (a_1 + b_1) \frac{t_a^2}{1000} + k \cdot t_g \quad (1)$$

2 - Température de foyer : t_g

$$t_g = t_{ad} + \frac{1}{4} (t_{ad} - t_f) \quad (2)$$

3 - Température adiabatique :

$$t_{ad} = \frac{2 h_0 - h_a}{(1 + r \cdot F_3) \cdot R_1 \cdot M} \quad (3)$$

4 - Nombre de mach :

$$M = 2 \left(\frac{P}{\rho} \cdot \frac{\rho}{\rho_1} - 1 - 1 \right) \quad (4)$$

5 - Température de la fumée : t_f

$$t_f = \frac{H_i \cdot D}{VF \cdot C_{pf}} \quad (5)$$

6 - Chaleur spécifique de la fumée : C_{pf}

$$C_{pf} = C_{p_{O_2}} \cdot V_{O_2} + C_{p_{CO_2}} \cdot V_{CO_2} + C_{p_{CO}} \cdot V_{CO} + C_{p_{N_2}} \cdot V_{N_2} + C_{p_{H_2}} \cdot V_{H_2} \quad (6)$$

7 - Volume de la fumée : VF

$$VF = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{\alpha + \beta} \quad (7)$$

8 - Richesse : r

$$r = 1 + 3,78 \frac{\beta + h - 2 w}{2(100 - h - w - \alpha - \beta)} \quad (8)$$

9 - Concentration de H_2 et O_2 dans la fumée : h et w

$$h = \frac{V_{H_2O}}{V_{CO_2}} \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) \frac{B/\alpha}{\frac{\beta}{\alpha} + K} \cdot \alpha \quad (9)$$

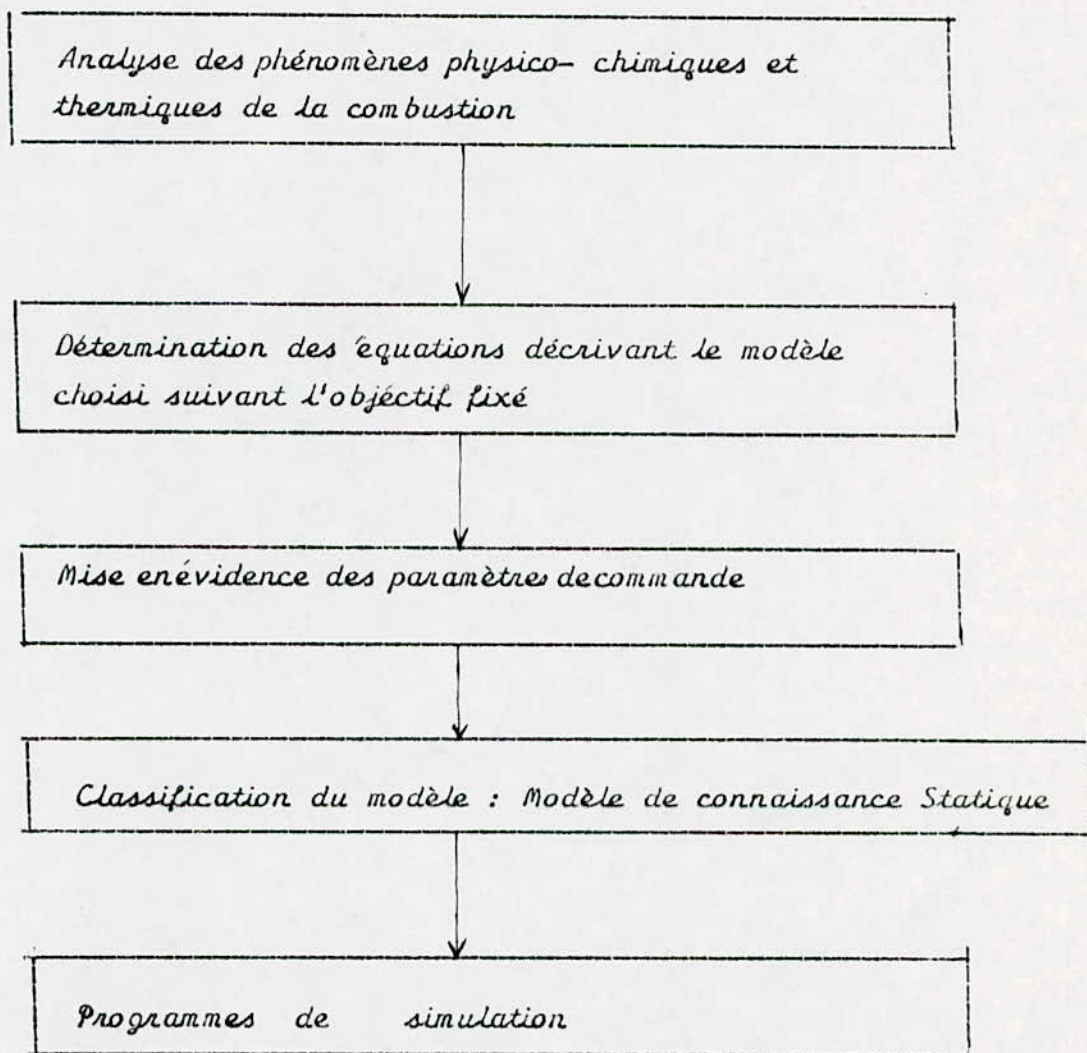
$$w = \frac{100 - A\alpha}{4,78} \quad (10)$$

$$A = \frac{100}{\alpha_0} \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) - 1,89 \frac{\beta}{\alpha} - 0,89 \frac{h}{\alpha} \quad (11)$$

Le modèle choisi décrit par le système d'équations ci-dessous est un modèle de connaissance, établi en faisant appel à des modèles plus généraux (lois de la thermodynamique et de la thermique).

Ce modèle est statique, ne prenant pas en considération les variations dans le temps des paramètres le définissant car la combustion est un phénomène qui a lieu indépendamment du temps.

La démarche suivie pour obtenir au modèle mathématique est illustrée par l'organigramme ci-dessous :

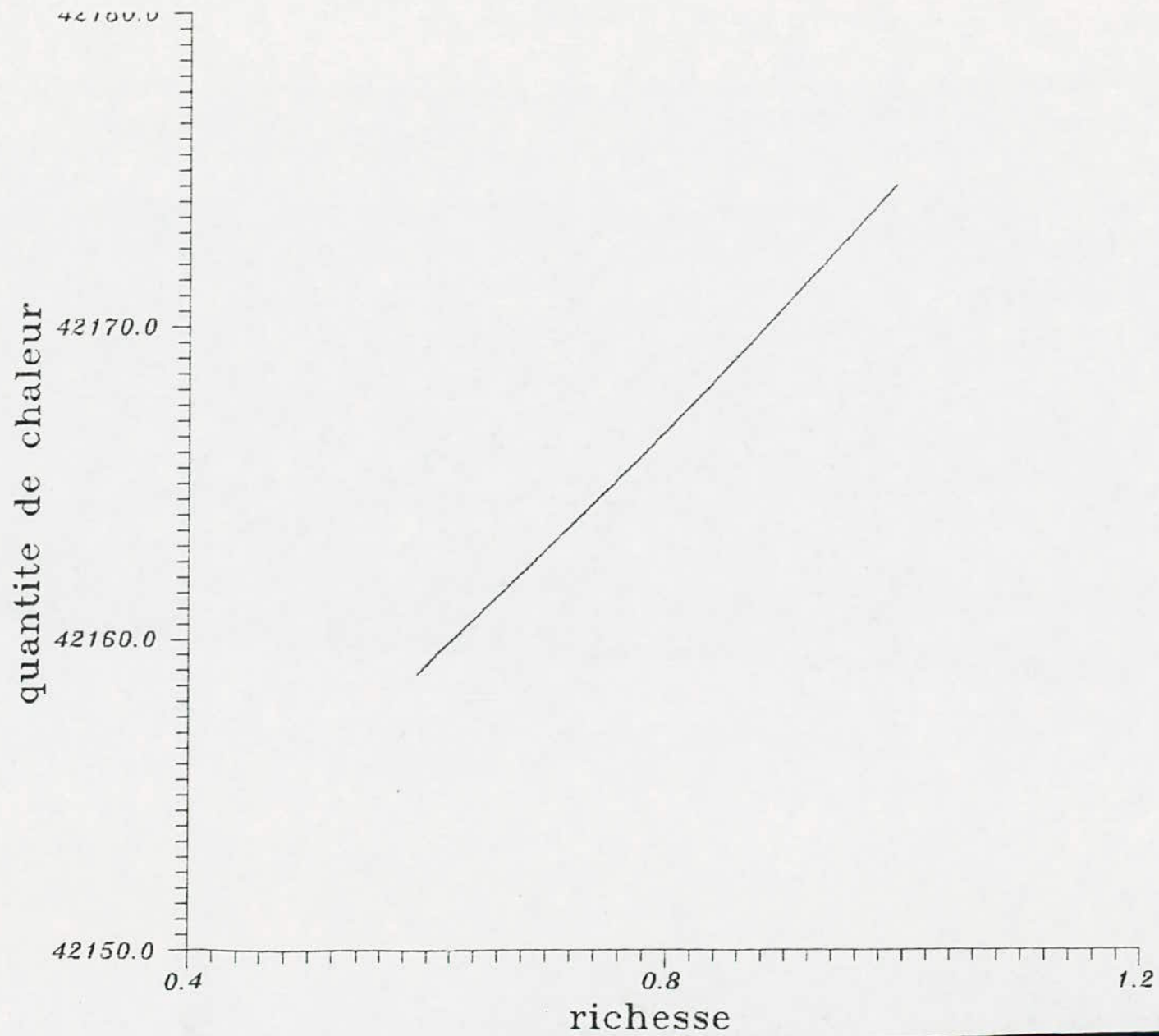


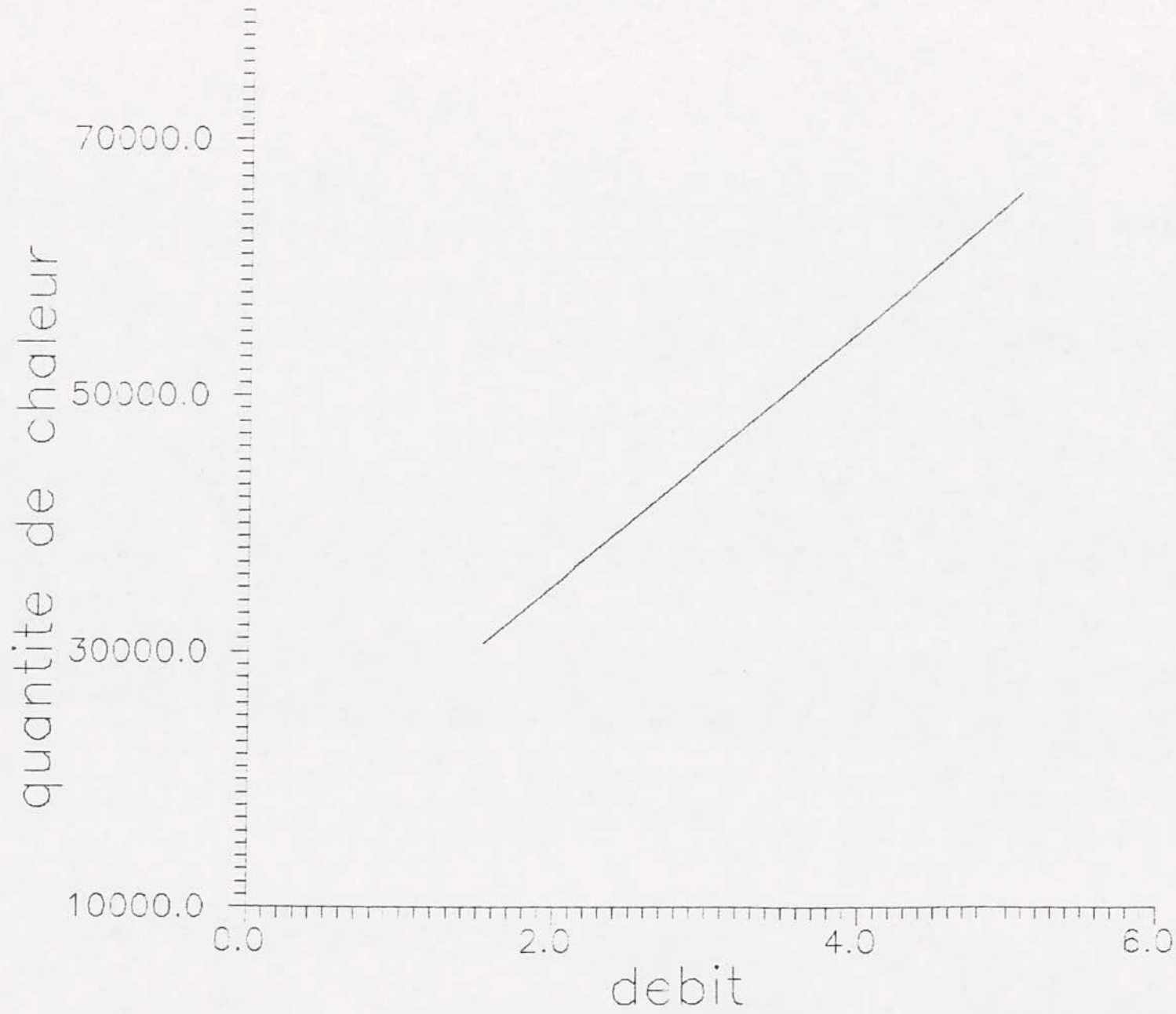
IV) Programme de simulation

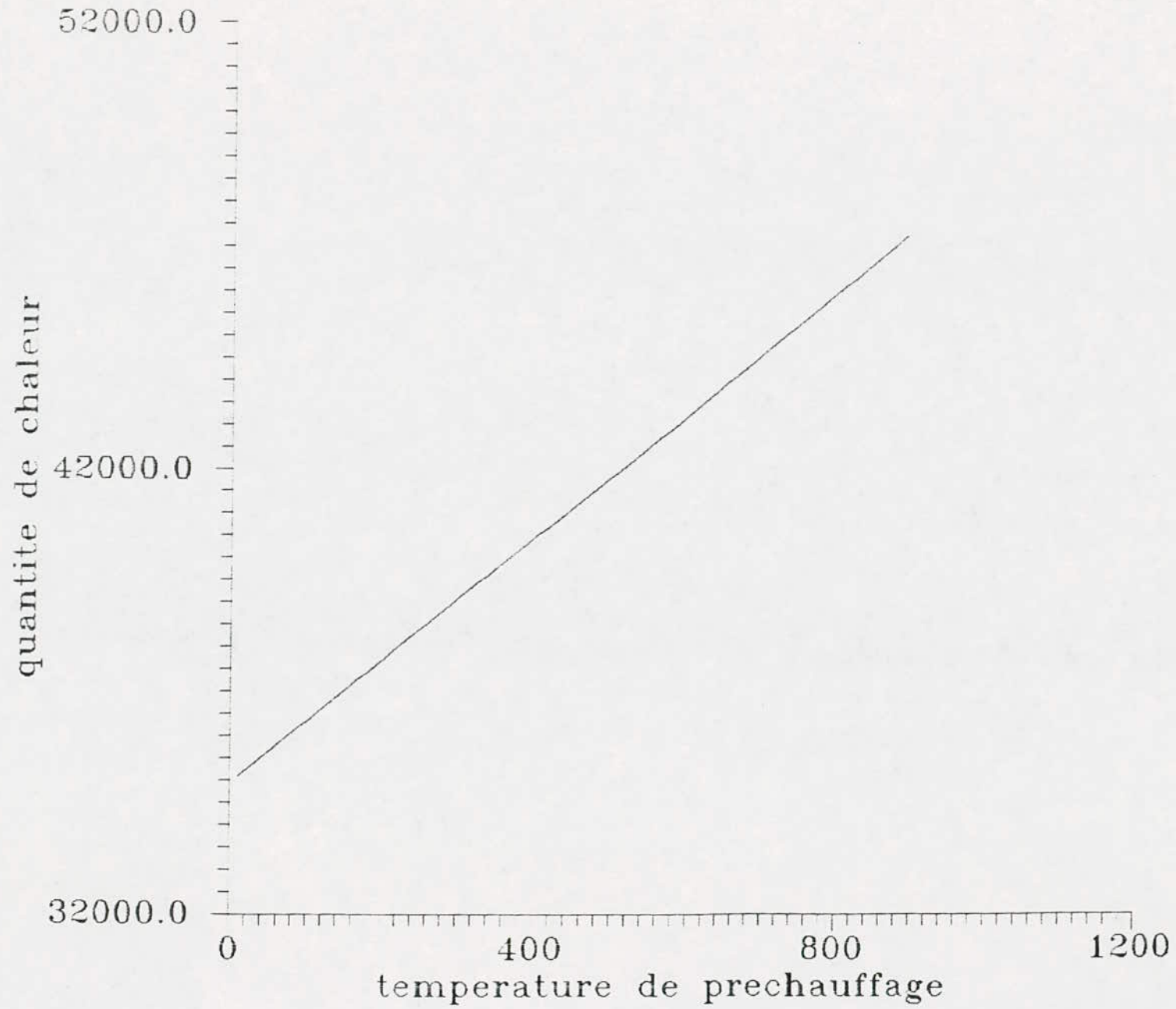
A partir de l'étude faite précédemment et l'élaboration du modèle de la flamme, nous avons développé des programmes permettant de voir l'influence des paramètres de commande (r, D, T_a) sur la quantité de chaleur transmise à la charge la zone de cuisson du four

Les figures 5, 6 et 7 illustrent cette influence.

Les programmes de simulation sont donnés à l'annexe III







CHAPITRE IV

COMMANDE OPTIMALE DE LA COMBUSTION

I/- INTRODUCTION

Il est bon de noter que la question de l'optimisation se pose dans le cas où étant donnée deux ou plusieurs caractéristiques qualitatives qui influent de façon différente sur des processus variables, il faut résoudre par un compromis le problème de la caractéristique à améliorer de préférence, en équilibrant l'influence de l'une par celle de l'autre.

II/- Optimisation des processus avec emploi de modèles mathématiques:

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

Pour évaluer l'optimum; il faut avant toute chose choisir le critère d'optimisation.

Suivant les conditions concrètes, on peut prendre pour critère d'optimisation, un critère technologique ou un critère économique ou d'autres critères encore.

Sur la base du critère d'optimisation choisi, on forme ce

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

Pour les processus ou les systèmes à commande automatique, on distingue deux stades d'optimisation: l'optimisation statique et l'optimisation dynamique.

L'optimisation statique résout les questions de création et de réalisation du modèle optimal d'un processus et l'optimisation dynamique les questions de création et de réalisation du système de commande optimal de ce processus.

Suivant le caractère des modèles mathématiques considérés on adopte différentes méthodes mathématiques d'optimisation. Beaucoup d'entre elles se réduisent à trouver le maximum ou le minimum de la fonction économique.

La fonction économique peut être donnée soit sans contraintes soit avec des contraintes sur les valeurs de certains paramètres.

En procédant au choix de la méthode d'optimisation, on doit prendre en considération les difficultés de calcul, complexité de la méthode elle-même, dimensions du problème, etc.

II/- Méthodes analytiques d'optimisation:

Les méthodes analytiques sont des méthodes classiques permettant de déterminer la valeur extrême d'une fonction (maximum ou minimum). On les emploie lorsque les fonctions à optimiser sont données analytiquement

et lorsque le nombre de variables indépendantes est peu élevé. Quand le nombre de variables est grand, il apparaît ce que l'on appelle la barrière du nombre de dimension et l'application des méthodes analytiques devient alors difficile.

Principe de la méthode analytique:

Notons $f(x)$ la fonction économique, fonction scalaire dépendant de plusieurs variables x_1, x_2, \dots, x_m .

La variable x est assujétie à appartenir à un domaine donné $D \subset \mathbb{R}$, D est un domaine définie par des relations de contraintes du type:

$$\text{- Egalité : } \quad g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\text{- Inégalité : } \quad h_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m$$

On constate que les algorithmes de recherche de l'extrémum deviennent compliqués par l'introduction de contraintes.

Pour se ramener au cas sans contraintes, on peut alors songer à faire figurer dans le critère un terme caractérisant la non satisfaction des contraintes. Pour cela on définit la fonction de pénalisation $P(x)$.

Fonction de pénalisation:

La fonction de pénalisation est définie comme suite :

$$P(x) = 0 \quad \text{si } x \in D$$

$$P(x) > 0 \quad \text{si } x \notin D$$

$P(x)$ est continue

Cette fonction sera de la forme :

$$P(x) = \sum_i \|g_i(x)\|^2$$

ou

$$\sum_j \|h_j(x)\|^2$$

On considère alors le critère suivant :

$$C(x) = f(x) + K.P(x)$$

Il lui correspond un extrémum \hat{x} qui ne satisfait pas exactement les contraintes ($P(\hat{x}) \neq 0$).

Cependant il est intuitif que lorsque K tend vers l'infini l'extrémum obtenu tend vers celui de $f(x)$ pour x appartenant à D .

IV/- Recherche d'un extrémum en présence de contraintes:

On cherche un extrémum de $f(x)$ pour x appartenant au domaine D défini par q contraintes inégalités du type:

$$h^i(x) \leq 0 \quad 1 \leq i \leq q \quad x \in \mathbb{R}^m$$

On suppose que $f(x)$ et $h^i(x)$ sont continues et dérivables en faisant introduire les fonctions de pénalisation $P^i(x)$ continues et dérivables telles que :

$$P^i(x) = 0 \quad \text{si } h^i(x) \leq 0$$

$$P^i(x) > 0 \quad \text{si } h^i(x) > 0$$

On utilise donc un problème sans contraintes dont la solution tend vers \hat{x} lorsque K tend vers l'infini.

V/- Optimisation des processus statiques:

Le problème de l'optimisation statique peut être caractérisé de façon générale par:

- a/- les relations instantanées entre les commandes et les sorties.
- b/- les contraintes sur les sorties et les commandes.
- c/- le critère à optimiser.

Le principe de recherche de la solution consiste à partir d'une commande initiale et à la modifier jusqu'à ce qu'on atteigne l'extrémum cherché.

La méthode choisie est la méthode de HOOKE et JEEVES qui est proche de la méthode du gradient.

Principe de la méthode:

On se place ici dans le cas d'une recherche de minimum de la fonction $f(x)$. Quand on cherche un maximum, on cherche le minimum de $(-f(x))$.

Pour progresser de x_k à x_{k+1} , l'algorithme procède en deux étapes que l'on répète alternativement :
une étape de recherche locale permettant de passer de x_k à x_k^* , puis une étape d'accélération conduisant à une

valeur x_{k+1} aussi proche que possible du minimum recherché.

a/- Recherche locale:

On recherche, au voisinage de x_k , une valeur x_k^* telle que $f(x_k^*)$ soit inférieure à $f(x_k)$.

Pour cela on dispose d'un ensemble de variation (δx_i $i = 1$ à n) applicables à chacune des composantes x_k .

On commence par appliquer la variation δx_1 sur la première composante, ce qui produit le vecteur $x_k + u_1 \cdot \delta x_1$, puis on calcule la valeur correspondante de f , $f(x_k + u_1 \cdot \delta x_1)$.

Si la valeur correspondante de f décroît, on passe à la composante suivante en partant de $x_k + u_1 \cdot \delta x_1$, sinon on répète l'opération avec la variation $-\delta x_1$.

On passe ensuite à la deuxième composante en partant de $x_k - u_1 \cdot \delta x_1$ ou x_k , suivant que l'on a rencontré un succès ou un échec avec la variation $-\delta x_1$.

Ce même processus est appliqué à toutes les composantes de x , lorsqu'elles seront toutes passées en revue, on se retrouve en x_k^* , cette valeur est différente de x_k si l'une au moins des recherches ci-dessus a produit une diminution de f ; elle est identique à x_k dans le cas contraire.

Accélération de la recherche:

Dans cette étape, on calcule la valeur de f en x_{k+1}^0 qui est déterminée à l'aide de la formule suivante:

$$x_{k+1}^0 = x_{k-1}^* + w(x_k^* - x_{k-1}^*)$$

Le coefficient w est le facteur d'accélération de la recherche, on le choisit généralement plus grand ou égal à 2. Si on constate une diminution de f en x_{k+1}^0 , le premier cycle de recherche est terminé, on entame alors le cycle suivant de la recherche en commençant par une étape de recherche locale autour de $x_{k+1} = x_{k+1}^0$.

Si l'on n'obtient pas de diminution de la valeur de f l'étape d'accélération a échoué.

En commençant par une étape de recherche locale autour de la meilleure valeur obtenue jusque là; on repart donc de $x_{k+1} = x_k^*$.

Arrêt de la recherche:

La recherche est bloquée quand deux étapes successives de recherche locale et d'accélération échouent, on obtient alors $x_k = x_k^* = x_{k+1}$ et la recherche ne progresse plus.

VI/- Commande optimale de la combustion:

L'étude faite au chapitre 3 nous a permis de faire sortir un modèle mathématique, représenté par un système d'équations finies.

La fonction objective correspond à la quantité de chaleur transmise Q_f , celle-ci dépendant des paramètres de commande r (richesse), D (débit) et T_a (température de préchauffage).

donc :

$$\begin{aligned} f(x) &= f(r, D, T_a) = Q_f \\ &= H_1 \cdot D + (a_0 + b_0) \cdot T_a + \frac{1}{2}(a + b) \cdot \frac{T_a}{1000} + k \cdot T_a \end{aligned}$$

Le critère modifié sera alors:

$$C(r, D, T_a) = f(r, D, T_a) + \sum_i K_i \cdot P_i(r, D, T_a)$$

Contraintes sur r, D, T_a:

Dans la pratique industrielle, les réglages de combustion s'effectuent dans une gamme d'excès d'air allant de quelque 10 à 40% (richesse allant de 0.7 à 0.9).

Le besoin d'économiser l'énergie amène à abaisser les excès d'air, cet abaissement réduit la quantité de gaz à évacuer et relève la température de combustion.

Mais ce type de réglage doit s'opérer sans dégrader la qualité de la combustion. Il existe un excès d'air au dessous duquel, on risque de provoquer la formation d'imbrulés solides en quantités suffisamment importantes pour occasionner une pollution de l'atmosphère.

Sur le plan thermodynamique, le préchauffage de l'air accroît l'enthalpie tout au moins jusqu'à une certaine limite, en effet il peut arriver un moment où les chaleurs de dissociation l'emportent sur la chaleur de combustion d'où une diminution de l'énergie lors de la combustion.

Les contraintes sur les trois paramètres de commande peuvent être résumées comme suite:

contrainte sur la richesse:

$$0.7 \ll r \ll 0.9$$

contrainte sur le débit:

$$1,5 \text{ m}^3/\text{s} \ll D \ll 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

contrainte sur la température de préchauffage:

$$800^{\circ}\text{C} \leq Ta \leq 900^{\circ}\text{C}$$

De ces inégalités, on tire les contraintes qui sont au nombre de six:

$$0.7 \leq r \leq 0.9 \Rightarrow r \leq 0.9 \text{ et } r \geq 0.7$$

$$1.5 \leq D \leq 2 \Rightarrow D \leq 2 \text{ et } D \geq 1.5$$

$$800 \leq Ta \leq 900 \Rightarrow Ta \leq 900 \text{ et } Ta \geq 800$$

Les $h^i(x)$ sont donnés par:

$$- h^1(x) = r - 0.9$$

$$- h^2(x) = 0.7 - r$$

$$- h^3(x) = D - 2$$

$$- h^4(x) = 1.5 - D$$

$$- h^5(x) = Ta - 900$$

$$- h^6(x) = 800 - Ta$$

Le critère modifié devient alors:

$$C(r, D, Ta) = Qf(r, D, Ta) + K_1 \cdot P^i(r, D, Ta)$$

On introduit des coefficients d_i tels que:

$$d_i = 0 \text{ si } h^i(x) \leq 0 \qquad P^i(x) = 0 \text{ si } h^i(x) \leq 0$$

$$d_i = 1 \text{ si } h^i(x) > 0 \qquad P^i(x) > 0 \text{ si } h^i(x) > 0$$

Donc le critère modifié devient:

$$\begin{aligned}
 C(r,D,Ta) &= Qf(r,D,Ta) + \sum_{i=1}^6 K_i \cdot P^i(r,D,Ta) \cdot d_i \\
 &= H_i \cdot D + (a_0 + b_0) \cdot Ta + \frac{1}{2}(a + b) \cdot \frac{Ta}{1000} + k \cdot Tg \\
 &\quad + K_4(r - 0.9) \cdot d_4 + K_2(0.7 - r) \cdot d_2 + K_3(D - 2) \cdot d_3 \\
 &\quad + K_4(1.5 - D) \cdot d_4 + K_5(Ta - 900) \cdot d_5 + K_6(800 - Ta) \cdot d_6
 \end{aligned}$$

En conclusion, la commande optimale de la combustion à partir du modèle mathématique choisi revient à chercher le maximum de la fonction $C(x)$ donnée ci-dessus, en utilisant la méthode d'optimisation de Hooke et Jeeves, et de déterminer les valeurs des paramètres de commande r, D et Ta correspondant à ce maximum.

Le programme et l'organigramme permettant l'optimisation par la méthode citée plus haut sont donnés à l'annexe II.

Ce programme d'optimisation nous a permis d'avoir les valeurs des trois paramètres de commande correspondant au maximum de la quantité de chaleur transmise à la charge:

Les valeurs des trois paramètres correspondant à la commande optimale de la combustion sont:

richesse du milieu: $r = 0.87$ d'où un excès d'air $e = 14.9\%$

débit du combustible: $D = 1.69 \text{ m}^3/\text{s}$

température de préchauffage: $Ta = 900^\circ\text{C}$

Les paramètres de commande optimale sont

$$r = 0.87 \quad \text{ou} \quad e = 14.9\%$$

$$D = 1.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_a = 900^\circ\text{C}$$

CONCLUSION

La commande ou la conduite d'un processus industriel nécessite, en plus de la connaissance des notions de modèle, une connaissance plus ou moins approfondie des phénomènes décrivant ce processus.

Suivant l'objectif fixé par l'utilisateur, celui-ci établira le modèle mathématique à l'aide de systèmes d'équations finies ou d'équations différentielles.

Dans l'établissement du modèle mathématique, il ne faut jamais perdre de vue le but auquel est destiné ce dernier, c'est généralement la qualité de la commande du système à partir du modèle établi, qui nous renseigne sur la qualité de ce modèle.

Dans le modèle mathématique, beaucoup d'hypothèses simplificatives ont été prises en considération en tenant compte du but final.

Le travail peut être divisé en deux parties:

La première partie avait pour but, de développer une étude décrivant les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur d'un four de cimenterie et l'étude de la combustion, principal phénomène à l'intérieur du four et l'élaboration des équations la décrivant.

La deuxième partie consistait au choix du modèle suivant l'objectif fixé, à savoir une commande optimale de la combustion, qui se traduit par un transfert maximal de chaleur de la flamme vers la charge et ceci, en agissant

sur les paramètres de commande qui sont:
la richesse, le débit combustible et la température de
l'air.

Toute modification de ces paramètres se répercute sur
la quantité de chaleur transmise à la charge, la commande
optimale nous a permis d'obtenir les valeurs des paramè-
tres de commande qui lui correspondent.

Toute fois, cette commande peut être améliorée avec l'apport
du savoir faire d'opérateurs de cimenterie expérimentés.

ANNEXE I

CARACTERISTIQUE DU GAZ NATUREL
UTILISE

1/- Composition du gaz naturel de hassi-R'mell:

Constituant	Concentration (en %)
CH ₄	81.3
C ₂ H ₆	6.8
C ₃ H ₈	2.3
C ₄ H ₁₀	4.3
N ₂	4.8
CO ₂	0.5

2/- Calcul de la valeur de k:

$$- x_1 = 0.813(C_{pm_C} + 4C_{pm_{O_2}} + 4C_{pm_{H_2}})$$

$$- x_2 = 0.068(2C_{pm_C} + 7C_{pm_{O_2}} + 6C_{pm_{H_2}})$$

$$- x_3 = 0.023(3C_{pm_C} + 10C_{pm_{O_2}} + 8C_{pm_{H_2}})$$

$$- x_4 = 0.043(4C_{pm_C} + 13C_{pm_{O_2}} + 10C_{pm_{H_2}})$$

$$\begin{aligned}
- y &= 2C_{p_{H_2}} + C_{p_{O_2}} - C_{p_{H_2O}} \\
- z &= C_{p_C} + 2C_{p_{O_2}} - C_{p_{CO_2}} \\
- w_1 &= 0.813(C_{p_C} + 4C_{p_{H_2}} - C_{p_{CH_4}}) \\
- w_2 &= 0.068(2C_{p_C} + 6C_{p_{H_2}} - C_{p_{C_2H_6}}) \\
- w_3 &= 0.023(3C_{p_C} + 8C_{p_{H_2}} - C_{p_{C_3H_8}}) \\
- w_4 &= 0.043(4C_{p_C} + 10C_{p_{H_2}} - C_{p_{C_4H_{10}}})
\end{aligned}$$

En définitif la valeur de k est donnée par:

$$k = - \sum_i x_i + 14y + 10z + \sum_i w_i$$

en tenant compte des valeurs des chaleurs spécifiques données aux tableau I, on aura:

$$k = 0.0054$$

Tableau des chaleurs spécifiques moyennes:

Constituant	C _{pm} (cal/m.K)	
	1300°C	1400°C
CH ₄	2.52	2.64
C ₂ H ₆	1.23	1.34
C ₃ H ₈	1.08	1.17
C ₄ H ₁₀	1.08	1.17
C	1.48	1.59
H ₂	1.14	1.19
O ₂	8.14	8.19
H ₂ O	9.61	9.75
CO ₂	12.38	12.51

TABLEAU I

Tableau des chaleurs spécifiques des constituants de la fumée:

Constituant	Cp (en cal/m.°K)
CO ₂	2.264
CO	1.436
O ₂	1.504
H ₂	1.343
N ₂	1.420

TABLEAU II

ANNEXE II

PROGRAMMES


```

1 .....
2 ***** PROGRAMMES DE SIMULATION DU MODELE MATHEMATIQUE DE LA .....
3 ***** FLAMME DE CIMENTERIE ***** .....
4 .....
5 ,
6 ,
7 ,
10 REM .....
    ***** CALCUL DU NOMBRE DE MACH ***** .....
15 ,
20 INPUT "donner la valeur de la pression totale";P
30 INPUT " donner la valeur de pression statique";P1
40 GAMA=1.2
50 B1=(P/P1)*((GAMA-1)/GAMA) 1
60 B2=(2/(GAMA-1))*B1:PRINT "b2=";B2
70 M=SQRT(B2)
80 PRINT " le nombre de mach est";M
81 ,
82 REM .....
    ***** PROGRAMME PRINCIPAL PERMETTANT DE VOIR L'INFLUENCE .....
    ***** DE LA RICHESSE SUR LA QUANTITE DE CHALEUR TRANSMISE .....
83 .....
84 ,
85 CLC
90 DIM R(100):DIM TAD(100):DIM TF(100):DIM TG(100):DIM QF(100):DIM D(100)
91 DIM Y(100)
100 ALPHA=7.5
105 PRINT "R","TAD","TF","TG"
108 OPEN"a:comb1" FOR OUTPUT AS #1
110 FOR I=1 TO 90
120 ALPHA=ALPHA*.04
130 BETA = ALPHA*.4
140 GOCUR 240
145 PRINT #1,R(I),TAD(I),TF(I),TG(I)
150 PRINT R(I),TAD(I),TF(I),TG(I)
160 NEXT I
165 CLOSE
170 TA=1123
175 PRINT"RICHESSE";"          ";" QUANTITE DE CHALEUR TRANSMISE"
177 OPEN"a:comb2" FOR OUTPUT AS #1
180 FOR I=1 TO 90
190 GOCUR 910
195 PRINT #1,R(I),QF(I)
200 PRINT R(I);"          ";"          QF(I)
210 NEXT I
215 CLOSE
220 END
221 ,
230 .....
240 REM ***** SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE LA RICHESSE ***** .....
250 .....
260 REM ***** CALCUL DES CONCENTRATIONS DE H2,O2 ET N2 DANS LA FUMEE ***** .....

```



```

90 DIM R(100):DIM TF(100):DIM TG(100):DIM QF(100)
91 DIM Y(100) :DIM D(100)
920 CLS
970 ,
980 .....
990 REM *** PROGRAMME PRINCIPAL DE CALCUL DE LA CHALEUR TRANSMISE *****
.....
..... EN FONCTION DU DEBIT *****
.....

291 ,
300 ALPHA =14.6: BETA=ALPHA*.4:H=4.27:W=11.9:DELTA=63.37:H=4.27
310 R=.8 : TAB=1706.251 : TA=1123 :D(1)=1.5: VCO2=1.04
315 PRINT "TF","TG"
318 OPEN "a:deb1" FOR OUTPUT AS #1
320 FOR I = 1 TO 90
330 D(I+1)= D(I) + .04
340 GOCUB 810
345 PRINT #1,TF(I+1),TG(I+1)
350 PRINT TF(I+1),TG(I+1)
360 NEXT I
362 CLOSE
365 PRINT "D","QF"
368 OPEN"a:deb2" FOR OUTPUT AS #1
370 FOR I =2 TO 91
380 GOCUB 910
385 PRINT #1,D(I),QF(I)
390 PRINT D(I),QF(I)
400 NEXT I
405 CLOSE
410 END
790 .....
800 REM ***** SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE LA TEMPERATURE DES FUMEEES *****
.....
.....

801 ,
810 VF=(VCO2*100)/(ALPHA+BETA)
820 CP1=1.504 : CP2=1.436 : CP3=2.264 : CP4=1.42 : CP5=1.343
830 V1=VF*(W/100): V2=VF*(BETA/100): V3=VF*(ALPHA/100):
835 V4=VF*(DELTA/100): V5=VF*(H/100)
840 CPF=CP1*V1+CP2*V2+CP3*V3+CP4*V4+CP5*V5
850 HI=9777 : T=1
860 TF(I+1)=(HI*D(I+1)*T)/(VF*CPF)
863 ,
865 .....
870 REM ***** CALCUL DE LA TEMPERATURE DE FOYER *****
.....
.....

871 ,
880 TG(I+1)=TF(I+1)+.25*(TAB-TF(I+1))
890 RETURN
997 .....
900 REM ***** SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE LA QUANTITE DE CHALEUR *****
.....
..... TRANSMISE A LA CHARGE *****
.....

```



```

901      ,
910      A0=6.94 : A01=.0008
920      A1=6.62 : A11=.0007
930      HI=9777 : T=1
940      Y1=HI*D(I)*T
950      Y(I)=(A0+A1)*TA+.5*(A01+A11)*(TA*TA/1000)
960      X1=.813*(.00159+4*8.190001E 03+4*.00119)
970      X2=6.800001E 02*(2*.00159+7*8.190001E 03+6*.00119)
980      X3=.023*(3*.00159+10*8.190001E 03+8*.00119)
990      X4=.043*(4*.00159+13*8.190001E 03+10*.00119)
1000     Y2=2*.00119+4*8.190001E 03 .00975
1010     Z=.00159+2*8.190001E 03 .01251
1020     W1=.00159+4*.00119 .00264
1030     W2=2*.00159+6*.00119 .00134
1040     W3=3*.00159+8*.00119 .00117
1050     W4=4*.00159+10*.00119 .00117
1060     Y3=X1+X2+X3+X4
1070     Y4=W1+W2+W3+W4
1080     QF(I)=Y1+Y(I)-Y3*TG(I)+(14*Y2*TG(I))+(10*Z*TG(I))+Y4*TG(I)
1090     RETURN

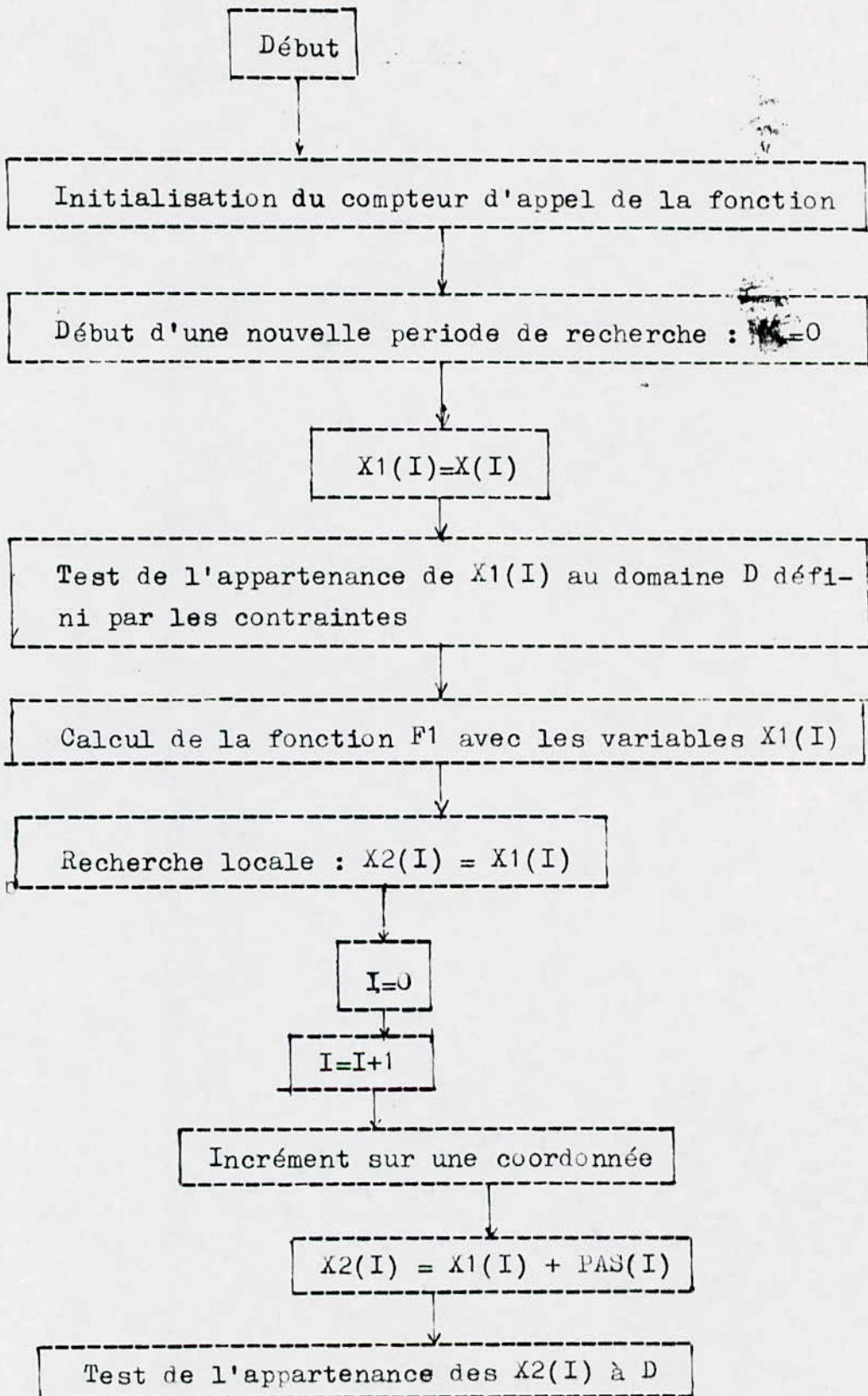
```

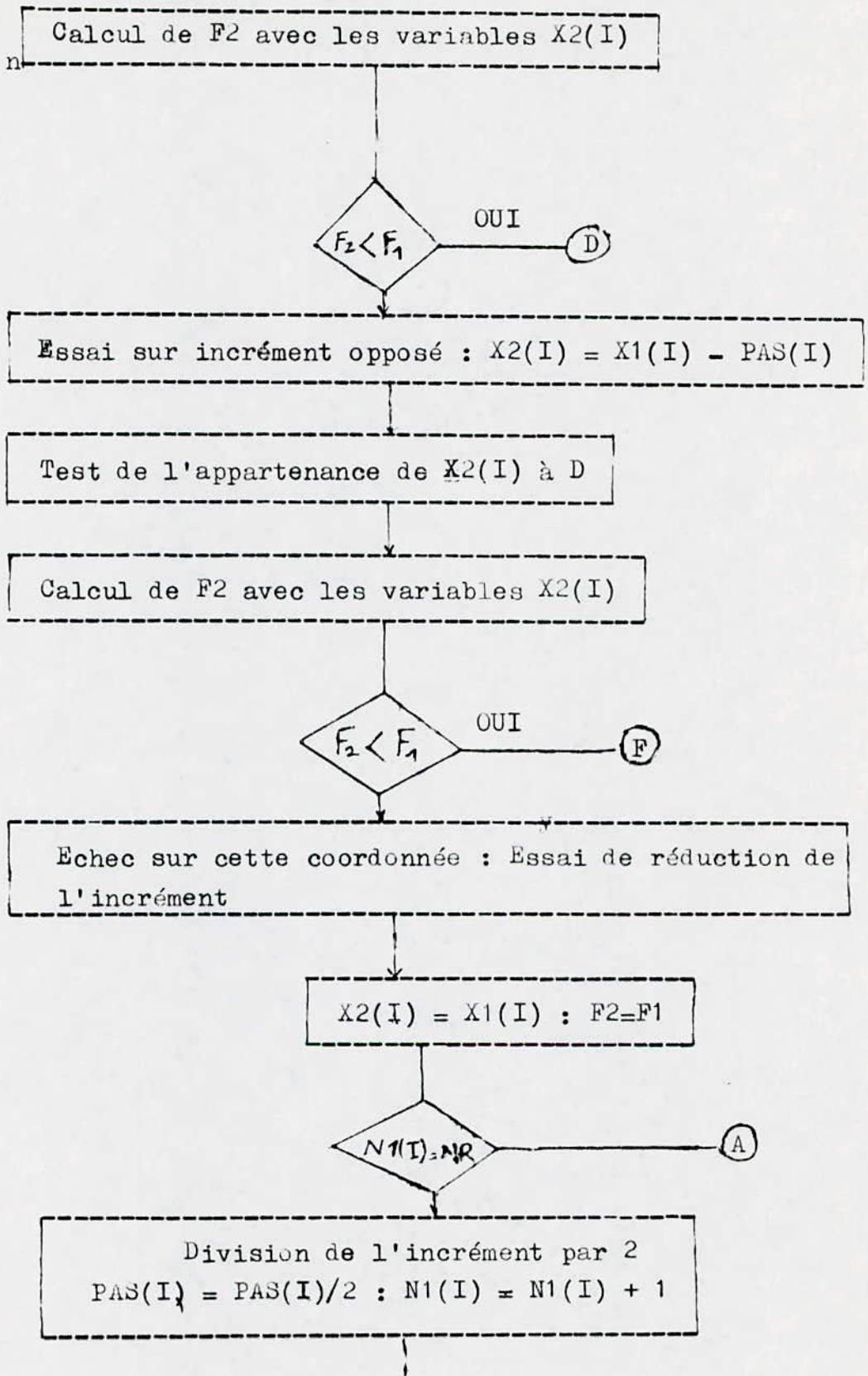
```

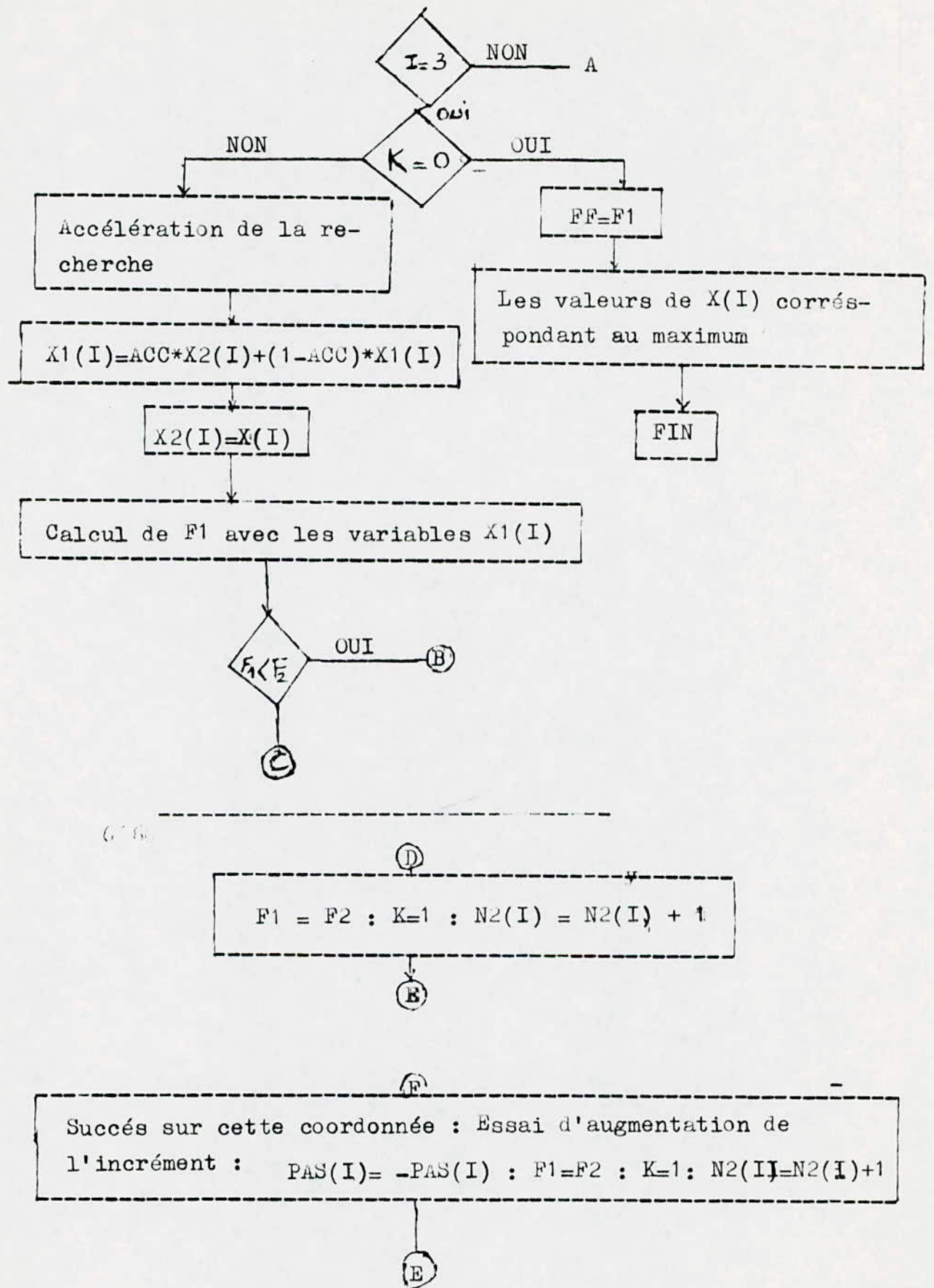
1
90 DIM R(100):DIM TAD(100):DIM TF(100):DIM TG(100):DIM QF(100):DIM D(100)
91 DIM Y(100):DIM TA(100)
100 CLS
101
105 .....
415 REM **** PROGRAMME PRINCIPAL DONNANT LA VARIATION DE LA QUANTITE *****
      **** DE CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE PRECHAUFFAGE *****
416 .....
417
420 ALPHA =14.6: BETA=ALPHA*.4
430 R=.8 : TAD=1706.251
440 TF=1542.569:TG=1583.49
450 TA =( 10)
455 PRINT "TA","QF"
458 OPEN"a:tair1" FOR OUTPUT AS #1
460 FOR I=1 TO 90
470 TA(I+1)= TA(I) + 10
480 GOSUB 910
485 PRINT #1,TA(I+1),QF(I+1)
490 PRINT TA(I+1), QF(I+1)
500 NEXT I
505 CLOSE
510 END
511
513 .....
900 REM **** SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE LA QUANTITE DE CHALEUR *****
      **** TRANSMISE A LA CHARGE *****
      .....
910 A0=6.94 : A01=.0008
920 A1=6.62 : A11=.0007
930 HI=9777 : T=1. : D=3.5
940 Y1=HI*D*T
950 Y(I+1)=(A0+A1)*TA(I+1)+.5*(A01+A11)*(TA(I)-TA(I+1)/1000)
960 X1=.813*(.00159+4*8.190001E 03+4*.00119)
970 X2=6.800001E 02*(2*.00159+7*8.190001E 03+6*.00119)
980 X3=.023*(3*.00159+10*8.190001E 03+8*.00119)
990 X4=.043*(4*.00159+13*8.190001E 03+10*.00119)
1000 Y2=2*.00119+4*8.190001E 03 .00975
1010 Z=.00159+2*8.190001E 03 .01251
1020 W1=.00159+4*.00119 .00264
1030 W2=2*.00159+6*.00119 .00134
1040 W3=3*.00159+8*.00119 .00117
1050 W4=4*.0159+10*.00119 .00117
1060 Y3=X1+X2+X3+X4
1070 Y4=W1+W2+W3+W4
1080 QF(I+1)=Y1+Y(I+1)-Y3*TG+(14*Y2*TG)+(10*Z*TG)+Y4*TG
1090 RETURN

```

Organigramme de la méthode d'optimisation
méthode de HOOKE et JEEVES







```

1  REM *****
2  ***** PROGRAMME D'OPTIMISATION *****
3  *****
4  ,
5  ,
6  ,
10 DIM X(3): DIM PAC(3): DIM X1(10): DIM X2(10)
20 DIM N1(10): DIM N2(10)
30 X(1)=.8 : X(2)= 4 : X(3)=850
40 NK=3 : PAC(1)=X(1)/20:PAC(2)=X(2)/20: PAC(3)=X(3)/20: ACC= 5
50 DEF FNG(A,C)=9777*A+13.56*C+.0075*C*C/1000
60 DEF FNL(A,B)=.159*((9777/17.49)*B+.25*(1799.79/(1+.0659*A) (9777/17.49)*B))
70 DEF FNF(A,B,C)= (FNG(A,C) FNL(A,B))
75 K1=10^30:K2=K1:K3=K1:K4=K1:K5=K1:K6=K1
76 D1=1:D2=1:D3=1:D4=4:D5=1:D6=1
80 DEF FNP(A,B)=(K1*(A .7)^2*D1)+(K2*(A .9)^2*D2)+(K3*(B 1.5)^2*D3)
85 DEF FNQ(B,C)=(K4*(B 7)^2*D4)+(K5*(C 900)^2*D5)+(K6*(C 900)^2*D6)
90 DEF FNF(A,B,C)= (FNG(A,C) FNL(A,B)) FNF(A,B) FNQ(B,C)
95 CLS
100 FOR I=1 TO 3
110 N1(I)=0
120 N2(I)=0
130 NEXT I
140 NAF=0
141 ,
150 REM ***** DEBUT D'UNE NOUVELLE PERIODE DE RECHERCHE *****
151 ,
160 K=0
170 FOR I=1 TO 3
180 X1(I)=X(I)
190 NEXT I
191 IF (.7 X1(1))<0 THEN D1=0
192 IF (X1(1) .9)<0 THEN D2=0
193 IF (1.5 X1(2))<0 THEN D3=0
194 IF (X1(2) 7)<0 THEN D4=0
195 IF (800 X1(3))<0 THEN D5=0
196 IF (X1(3) 900)<0 THEN D6=0
200 F1=FNF(X1(1),X1(2),X1(3))
201 ,
210 REM ***** RECHERCHE LOCALE *****
211 ,
220 FOR I=1 TO 3
230 X2(I)=X1(I)
240 NEXT I
250 FOR I=1 TO 3
251 ,
260 REM ***** INCREMENT SUR UNE COORDONNEE *****
261 ,
270 X2(I)=X1(I)+PAC(I)
271 IF (.7 X2(1))<0 THEN D1=0
272 IF (X2(1) .9)<0 THEN D2=0
273 IF (1.5 X2(2))<0 THEN D3=0
274 IF (X2(2) 7)<0 THEN D4=0
275 IF (800 X2(3))<0 THEN D5=0
276 IF (X2(3) 900)<0 THEN D6=0
280 F2=FNF(X2(1),X2(2),X2(3))
290 IF F2<F1 GOTO 450

```



```

300 REM *** ESSAI INCREMENT OPPOSE ***
301 ,
310 X2(I)=X1(I)-PAS(I)
311 IF (.7 X2(1))<0 THEN D1=0
312 IF (X2(1) .9)<0 THEN D2=0
313 IF (1.5 X2(2))<0 THEN D3=0
314 IF (X2(2) 7)<0 THEN D4=0
315 IF (800 X2(3))<0 THEN D5=0
316 IF (X2(3) 900)<0 THEN D6=0
320 F2=FNF(X2(1),X2(2),X2(3))
330 IF F2<F1 GOTO 440
331 ,
340 REM *** ECHEC SUR CETTE COORDONNEE:ESSAI DE REDUCTION DE L'INCREMENT ****
341 ,
350 X2(I)=X1(I)
360 F2=F1
370 N2(I)=0
380 IF N1(I)=NR GOTO 530
381 ,
390 REM **** DIVISION PAR 2 DE L'INCREMENT ****
391 ,
400 N1(I)=N1(I)+1
410 PAS(I)=PAS(I)/2
420 GOTO 270
421 ,
430 REM ** SUCCES SUR CETTE COORDONNEE: ESSAI D'AUGMENTATION DE L'INCREMENT ***
431 ,
440 PAS(I)= PAS(I)
450 F1=F2
460 K=1
470 N2(I)=N2(I)+1
480 IF N2(I)<=4 GOTO 530
481 ,
490 REM *** MULTIPLICATION DE L'INCREMENT PAR 2 ****
491 ,
500 N2(I)=0
510 PAS(I)=PAS(I)*2
520 N1(I)=N1(I)-1
530 NEXT I
540 IF K=0 GOTO 630
541 ,
550 REM *** ACCELERATION DE LA RECHERCHE ***
551 ,
560 FOR I=1 TO 3
570 X1(I)=ACC*X2(I)+(1-ACC)*X1(I)
580 X(I)=X2(I)
590 NEXT I
591 IF (.7 X1(1))<0 THEN D1=0
592 IF (X1(1) .9)<0 THEN D2=0
593 IF (1.5 X1(2))<0 THEN D3=0
594 IF (X1(2) 7)<0 THEN D4=0
595 IF (800 X1(3))<0 THEN D5=0
596 IF (X1(3) 900)<0 THEN D6=0
600 F1=FNF(X1(1),X1(2),X1(3))
610 IF F1<F2 GOTO 220
620 GOTO 160
630 PF=F1 : PRINT "LE MAXIMUM DE LA FONCTION EST:";PF
640 PRINT"LES VALEURS DES TROIS PARAMETRES DE COMMANDE CORRESPONDANT SONT:"
645 X2(1),X2(2),X2(3)
650 END

```

BIBLIOGRAPHIE

- 1/- E. PERTUIS " Combustion industrielle"
- 2/- G. MONNOT "Combustion dans les fours et les chaudières"
- 3/- FILKOV "Calcul thermique du four"
Projet de cours (Université de Annaba)
- 4/- KRITH "Transmission de chaleur"
- 5/- HEILIGENSTAEDT "Thermique appliquée aux fours industriels"
Tome I et II
- 6/- P.MAGOT-CUVRU "Chaleur et température de combustion"
Technique de l'ingénieur : A540-1, A540-6, A542-1, A542-7
- 7/- M.A.CLINKOV " Fondement de la théorie générale du
fonctionnement des fours"
- 8/- J-RICHALED "Modélisation et identification"
Technique de l'ingénieur R7140

9/- P. BOUDAREL

" Commande optimale des processus"