

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



FACULTE DES HYDROCARBURES

ET DE LA CHIMIE

Département Automatisation des
Procédés Industriels et Electrification



Laboratoire d'Automatique Appliquée

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du titre de Magister

OPTION : Automatique Appliquée

THEME

Contribution à la Modélisation et à la Commande par Correcteur
Flou. Application à la Conduite d'un Procédé Thermique de la
Céramique Lourde

Par : Mr Amar Hamdaoui

Devant les membres du Jury :

PRESIDENT :

Mr E.M. BERKOUK, Professeur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,

EXAMINATEURS :

Mme D. ACHELI, Maître de Conférences, FHC Université de Boumerdes,

Mr V. TOURTCHINE, Maître de Conférences, FS Université de Boumerdes,

Mr M.EL H. KHELIL, Maître de Conférences, FSI Université de Boumerdes,

RAPPORTEUR :

Mr M.S. BOUMEDINE, PhD, Chargé de cours, FHC Université de Boumerdes.

Année Universitaire 2006 / 2007

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Automatique Appliquée de la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, sous la responsabilité de Monsieur le Professeur M. Zelmat ; qu'il soit remercié ici pour ses conseils précieux.

Que mon promoteur Monsieur le Dr. M.S. Boumedine du Département Automatisation des Procédés Industriels et Electrification de la même faculté, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour ses directives son soutien, son aide et d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche.

** Je remercie tout particulièrement Monsieur F. Laouad, Maître de Conférence pour son soutien très fort et les encouragements qu'il m'a prodigués, ainsi que les membres du Conseil Scientifique du Département Automatisation et Electrification pour leur compréhension.*

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Le Professeur E.M. Berkouk d'avoir accepté de présider le Jury de soutenance ainsi qu'à Madame D. Acheli, Monsieur M. EL H. Khelil, et Monsieur V. Tourchine, Maîtres de Conférence, qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir accepté de faire partie des membres du Jury.

Je remercie également Messieurs Le Directeur Général et les techniciens de la société Eprc pour leur aide précieuse et dont la contribution a été décisive pour réaliser la partie collecte de données expérimentales.

Enfin, il m'est agréable de remercier ici toutes les personnes, qui par leur aide matérielle leur amitié, ou leurs conseils m'ont permis de mener à bien ce très modeste travail.

Abstract

I. ملخص :

أن إنتاج وصناعة مواد البناء و بصفة عامة نلاحظ أن مسالة تحسين عملية المعالجة منها و خاصة التي تتعلق بالتجفيف فهي مجيرة على أن تقوم بالسعي ورأ هدفين اثنان و هما:
I- استهلاك محدود للطاقة الألام،

II- صيانة الخصائص الحراروميكانيكية للمنتوج المجفف.
إن تقدم عمليات التجفيف نحو دوريات قصيرة المدى أكثر فأكثر و محصول أحسن يجبرنا أن نتعرف بأكثر دقة على جميع الظواهر الفيزيوكيميائية المختلفة التي تجرى في هذه الانشآت الصناعية إن هذه الاعتبارات قد أعطت للبحوث دفعا كبيرا على جميع مستويات عملية التجفيف ، المجفف ، المنتوج و التكلفة الاقتصادية.
يهدف عملنا هذا أساسا إلى محاولة تحسين عمل و سعة المجفف للمواد الخزفية الثقيلة و هذا يتمثل أصلى دقيق لعملية التجفيف، الهدف من ذلك هو تعيين منظر للحرارة و الرطوبة لكي نسهل بذلك تظاهر اشتغال نظام التجفيف بفرضية ثبوت الشروط،

يخضع هذا التمثيل إلى إثبات، وذلك بمقارنة النتائج المتحصل عليها بعملية التظاهر مع تلك التي هي نتيجة التجربة (منضى التحكم للشركة المنجزة للمجفف).

المرحلة الأخيرة تتضمن إعداد تمثيل رمزي مكون من كشوفات اخدت من المكان وعلى أساسها قمنا بتشكيل مراقب على أساس المنطق الغير جلي ألدى برمج و في النهاية لختبر .
إن هدى المسعى لقد أعطى نتائج مرضية خاصة بالنسبة لإثبات التسيير و ذلك بالمقارنة مع نظام التحكم القديم لعملية التجفيف.
المفاتيح: مراقب، غير جلي (غير واضح)، تمثيل، مجفف.

II. Résumé

Dans le domaine des matériaux de construction d'une façon générale, l'optimisation des opérations de traitement en l'occurrence le séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont :

- la consommation restreinte de l'énergie nécessaire ;
- la sauvegarde des propriétés thermomécaniques du produit séché.

L'évolution des procédés de séchage vers des cycles de plus en plus courts et des rendements meilleurs, impose une connaissance plus précise des différents phénomènes physicochimiques qui se déroulent dans ces installations industrielles.

Ces considérations ont conduit à de nombreux travaux et ce, aux différents niveaux du processus : le séchoir, le produit et le coût économique.

Cette étude se propose de contribuer à l'optimisation et au dimensionnement d'un séchoir de produits de la céramique lourde et ce, par une modélisation adéquate du processus de séchage en vue de déterminer le profil de température et d'humidité permettant ainsi de simuler le fonctionnement du système de séchage dans l'hypothèse de conditions constantes.

Ce modèle est ensuite soumis à une validation par confrontation des résultats de la simulation avec ceux obtenus par l'expérimentation (courbe de conduite du constructeur de l'installation). L'étape suivante consisterait en l'élaboration d'une description symbolique constituée de relevés sur site et sur la base de laquelle, un contrôleur à logique floue est configuré, implémenté et finalement testé. Cette démarche a donné des résultats satisfaisants quant à la stabilité du processus en comparaison avec la conduite classique installée.

MOTS-CLÉS : Contrôleur flou, Modélisation, Séchoir, Simulation.

III. Abstract:

During the past years, many control techniques have been developed to improve drying performances. The problem of controlling involves many practical problems which may appear as a result of a continuous change of its control parameters. The mathematical equivalent system model

will be continuously changing and therefore one controller will not be sufficient to meet the different operating system conditions.

Due to the nonlinearities of the various system components, a linear model obtained by linearization around an operating point is usually adopted to design the controller. As a result, however, because of inherent characteristics of changing loads, the system performances with controllers designed for a specific operating point will no longer be optimum.

The present work concerns the fuzzy control of a drying system. This approach is known to be model-free and utilizes the field experience with running and supervising the process by human expertise. The advices offered by the expert to run properly these systems are given in the form of recipes full of linguistics. These linguistics can be turned into linguistic variables with limited sets of labels conceived by the designer to be the primitive seeds for what is called a knowledge base.

The main objective of this study is to propose to develop a fuzzy controller to substitute the conventional "Top program" in order to obtain enhanced performances and better results. This system is controlled by a "Top program" controller acting on temperature and humidity, which are difficult to set, due to the strong two variables interdependence. The fuzzy controller is elaborated to monitor the temperature and the humidity, taking into account simultaneously the variation of these parameters.

The validation and the simulation results obtained by the present approach have led to better performances with this design compared to the usual classical control in the field of drying process of ceramic.

Key words: Drying process, Fuzzy control, Simulation.

Sommaire

AVANT-PROPOS

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE

1.	Contexte de l'étude.....	01
2.	Objectif de l'étude.....	02
3.	Approche adoptée.....	03
4.	Organisation du document.....	03

RECHERCHE BIBLIORAPHIQUE

1.	Introduction.....	05
2.	Aperçu sur la Recherche-développement sur la conduite des séchoirs à céramique.....	06
2.1.	Instruments de contrôle dans les séchoirs.....	06
2.2.	Les différents modèles mathématiques développés sur le séchage.....	06
2.3.	Les modèles décrivant le comportement du produit au séchage.....	07
2.4.	Les modèles d'optimisation du taux d'humidité.....	07
2.5.	Les modèles d'optimisation globale du procédé de séchage.....	08
3.	Conclusion.....	08

CHAPITRE I

DESCRIPTION ET MODELISATION DU PROCEDE DE SECHAGE

1.1.	Introduction.....	09
1.2.	Apport de la modélisation et Les difficultés de sa mise en œuvre.....	09
1.2.1.	Modèle de connaissance.....	09
1.2.2.	Modèle de régulation.....	10
1.2.3.	Modèle de fonctionnement.....	10
1.3.	Le séchoir, objet de la modélisation.....	11
1.3.1.	Le séchoir et son environnement.....	11
1.3.2.	Taux de séchage.....	11
1.3.3.	Spécificités de la matière première.....	11
1.4.	Le produit céramique et l'installation de séchage.....	12
1.4.1.	Etapes d'élaboration des produits céramiques lourds.....	12
1.4.2.	Le processus de séchage et l'interaction de ses paramètres.....	12
1.4.3.	Description de l'installation de séchage.....	13
1.4.4.	Fonctionnement du séchoir.....	15
1.5.	Modélisation du processus de séchage.....	17
1.5.1.	Bases de la modélisation.....	17
1.5.2.	Considérations fondamentales.....	17
1.5.3.	Description du cycle de séchage.....	18
1.5.3.1.	Procédure de séchage.....	18
1.5.4.	Transfert d'énergie et de masse.....	18
1.5.4.1.	Chambre de mélange.....	18
1.5.4.1.1.	Apports d'énergie: Bilan massique des entrées.....	18

I.5.4.1.2. Bilan massique des sorties.....	19
I.5.4.2. Générateur de chaleur	21
I.5.4.3. Les chambres de séchage.....	21
I.5.5. Méthodologie de calcul du bilan énergétique.....	23
I.5.5.1. Bilan massique de chaque chambre.....	23
I.5.5.2. Bilan énergétique de l'échangeur (séchoir).....	23
I.5.5.3. Procédure de calcul des paramètres d'une seule chambre.....	24
I.5.5.4. Calcul des paramètres pour toutes les chambres.....	25
I.5.5.5. Calcul des paramètres du séchoir (dimensionnement du séchoir).....	25
I.6. Conclusion.....	27

CHAPITRE II

SIMULATION DU PROFIL DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE AU COURANT DU PROCESSUS DE SECHAGE DE PRODUITS CERAMIQUES

II.1. Introduction.....	28
II.2. Simulation du profil de température et d'humidité.....	28
II.2.1. Procédure du cycle de séchage.....	28
II.2.2. Etapes d'exécution de l'algorithme de simulation.....	29
II.2.3. Résultats de simulation.....	32
II.2.4. Variation des grandeurs d'une chambre.....	35
II.3. Validation de l'approche développée.....	37
II.3.1. Validation des résultats de simulation.....	39
II.3.1.1. Modèle expérimental du constructeur.....	39
II.3.1.2. Modèle de connaissance (modélisation-simulation).....	40
II.4. Comparaison des courbes du modèle expérimental et simulé.....	41
II.4.1. Variation de la température.....	41
II.4.2. Variation du taux d'humidité.....	41
II.5. Conclusion.....	42

CHAPITRE III

COMMANDE CLASSIQUE ET SES LIMITES, ETUDE DE L'EXISTANT

III.1. Introduction.....	43
III.2. Connaissance actuelle des structures de commande des séchoirs.....	44
III.2.1. La mesure.....	45
III.2.2. Objets de commande.....	46
III.2.2.1. Les conditions de l'air.....	46
III.2.2.2. Système de chauffage.....	46
III.2.2.3. Régulation des températures de l'air.....	47
III.2.2.4. Implantation des programmes de séchage.....	47
III.3. Différentes configurations de conduite des séchoirs à céramique.....	49
III.3.1. Choix des paramètres de régulation.....	49
III.3.2. Système basé sur deux PID indépendants.....	52
III.3.3. Système basé sur le temps.....	53
III.3.4. Correction à base d'humidité moyenne.....	53
III.3.5. Système basé sur la mesure du poids de la charge.....	54
III.3.6. Système basé sur le contrôle de la T°C au sein de la charge (DTC).....	54
III.3.7. Régulation prédictive et combinée de la T°C air sec / T°C air humide.....	55

III.4. La commande existante au niveau de l'entreprise, objet de l'étude.....	56
III.4.1. Procédure de régulation du séchoir à céramique.....	56
III.4.2. Commentaire.....	58
III.5. Conclusion.....	58

CHAPITRE IV

MODELISATION DES CONNAISSANCES IMPARFAITES PAR LES SOUS-ENSEMBLES FLOUS : CONCEPTS FONDAMENTAUX

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. La logique floue a déjà 60 ans !.....	60
IV.3. Les ensembles flous.....	61
IV.3.1. Raisonnement en logique floue.....	61
IV.3.2. Définitions et Caractéristiques des sous-ensembles flous.....	63
IV.3.3. Les opérations sur les ensembles flous.....	64
IV.3.4. Notions de règles linguistiques.....	65
IV.3.5. Raisonnement flou.....	66
IV.4. La commande floue.....	66
IV.4.1. Généralités.....	66
IV.4.1.1. Historique.....	66
IV.4.1.2. Principe.....	66
IV.4.1.3. Propriétés.....	67
IV.5. Structure générale d'un contrôleur flou.....	68
IV.5.1. Différentes configurations d'un correcteur flou.....	69
IV.6. Les différents systèmes d'inférence floue.....	71
IV.7. Opération de fuzzification.....	73
IV.8. Base de règles d'inférence.....	74
IV.8.1. Mise en oeuvre de la base de règles.....	74
IV.9. Défuzzification.....	75
IV.10. Implémentation du correcteur flou.....	75
IV.10.1. Conversion et traitement des paramètres mesurés.....	76
IV.11. Application de la logique floue.....	76
IV.12. Conclusion.....	77

CHAPITRE V

APPROCHE FLOUE POUR LA CONDUITE DU PROCEDE DE SCHAGE

V.1. Introduction.....	78
V.2. Conception du correcteur à logique floue.....	79
V.2.1. Etude du système à régler et nécessité d'un correcteur flou.....	79
V.2.2. Configuration du contrôleur flou.....	80
V.2.2.1. Algorithme proposé.....	80
V.2.2.2. Identification des variables d'entrée et de sortie.....	81
V.2.2.3. Univers des discours.....	81
V.2.2.4. Définition des fonctions d'appartenance.....	81
V.2.2.5. Prise en charge du paramètre temps du déroulement du processus.....	81

V.2.2.6.	Conception du moteur d'inférence.....	81
V.2.2.7.	Architecture de la boucle de régulation floue.....	82
V.3.	Construction du correcteur flou.....	82
V.3.1.	Module de fuzzification.....	82
V.3.2.	Etablissement des lois d'inférence.....	84
a)	Représentation linguistique des règles.....	84
b)	Matrice des lois d'inférences.....	85
V.3.3.	Procédé de défuzzification.....	85
V.4.	Implémentation de l'algorithme de conduite.....	87
V.4.1.	Implémentation et simulation du correcteur flou sous l'environnement Delphi.....	87
V.4.1.1.	Schéma d'implémentation en tant que simulateur.....	87
V.4.1.2.	Conception.....	88
V.4.1.3.	Procédures principales de l'algorithme de commande.....	88
V.4.1.3.1.	Quelques algorithmes décrivant les blocs précédents.....	90
a)	Acquisition de paramètres.....	90
b)	Fuzzification des valeurs acquises ou saisies.....	91
V.4.1.4.	Description de l'environnement d'implémentation.....	91
V.4.1.4.1.	Programmation orientée objet.....	91
V.4.1.4.2.	Choix du langage d'implémentation.....	92
V.4.1.5.	Présentation de l'application et des résultats.....	92
V.4.1.5.1.	L'interface principale.....	92
V.4.1.5.2.	Simulation du séchoir.....	92
V.4.1.5.3.	Régulation.....	93
V.4.1.6.	Résultats de simulation et validation du modèle symbolique avec celui simulé.....	95
V.4.2.	Implémentation sous l'environnement Matlab.....	95
V.4.2.1.	Elaboration des règles d'inférence et des fonctions de variables.....	95
V.4.2.2.	Représentation dans l'espace d'état tridimensionnel des lois surfaciques.....	95
V.4.2.3.	Test du contrôleur par application des lois d'inférence.....	96
V.4.2.4.	Simulation du correcteur sur le plan dynamique.....	98
V.4.2.4.1.	Etude en mode de régulation.....	99
V.4.2.4.2.	Etude en mode asservissement.....	99
V.5.	Validation globale des différentes réponses.....	101
V.6.	Implémentation et Conduite préconisées par un API.....	102
V.6.1.	Architecture du système de conduite du séchoir à céramique basée sur un A.P.I.....	102
V.6.2.	Programmation du contrôleur flou en pseudo-langage sur API équipé en bloc fuzzy.....	104
V.7.	Test final lors de mise en oeuvre sur l'installation.....	104
V.8.	Conclusion.....	104

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1.	Objectifs.....	105
2.	Résultats et Commentaires.....	105
3.	Perspectives.....	106

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBGRAPHIE

I.	Ouvrages sur des études théoriques et méthodologiques.....	BIBLIO-I
II.	Documentation et références sur des applications.....	BIBLIO-II
III.	Webgraphie & Courriel.....	BIBLIO-III

ANNEXES et RECAPITULATIF DES RESULTAS

Introduction Générale

1. Contexte de l'étude

Il n'est plus à démontrer le rôle prépondérant joué par la conception et l'optimisation des procédés de l'industrie chimique pour accroître la compétitivité, en augmentant les capacités de production, en réduisant les coûts d'investissements et/ou d'exploitation, en assurant une plus grande fiabilité et une meilleure sécurité de fonctionnement.

Ainsi, sur les procédés déjà existants, l'effort porte sur les améliorations techniques permettant de réduire la consommation des matières premières et de l'énergie nécessaires. Il s'agit alors de déterminer des conditions d'exploitation optimales sur un procédé à structure fixée.

Dans la conjoncture actuelle, les unités de production sont, en majorité, en crise de productivité. Vu le passage à l'économie de marché la production concurrentielle impose un produit de haute qualité. Ainsi, il est temps de penser à rentabiliser au maximum les moyens de production et à une politique de reprise de certaines unités de production avec des coûts à moindres investissements et d'intégration maximale de l'outil informatique.

Le séchage est une opération unitaire transversale et commune à de nombreux secteurs d'activités industrielles. La conséquence est, que l'industrie céramique lourde est grosse consommatrice d'énergie, avec un poste absorbant dans la plus part des cas 30 à 40% des coûts de production à l'exclusion des coûts d'investissements.

L'opération de séchage est d'une importance capitale dans l'industrie céramique, et par conséquent, elle doit retenir toute l'attention voulue. Le meilleur rendement du séchage ne peut être atteint qu'au moyen d'une exploitation rationnelle des installations du séchage en tenant compte des caractéristiques des matières premières de fabrication.

La qualité finale de nombreux produits est fortement influencée par le traitement thermique qu'ils subissent. Aussi une bonne connaissance des opérations thermiques telles que le séchage, la cuisson de la brique ou d'autres produits céramiques permet de contrôler la qualité du produit développé.

Dans les séchoirs à céramique, le choix du cycle conditionne en grande partie à la fois la qualité des produits finis, la productivité du séchoir ainsi que le coût énergétique de cette phase cruciale de la fabrication des produits céramiques. L'étude de l'effet de variation des différentes grandeurs opératoires du cycle sur ce triplet de facteurs revêt une importance capitale, et pour l'ingénieur concepteur et surtout pour les industriels.

Les installations qui permettent de mener une analyse du séchage dans des conditions proches des conditions industrielles n'existent pas. A cette fin deux volets sont indissociables :

- valider les choix de modélisation,
- affiner la gestion des cycles et proposer des courbes de séchage optimales.

La modélisation globale d'un tel système implique la prise en compte d'un nombre considérable de facteurs (variables d'état process) et fait appel à des calculs itératifs pour arriver à estimer avec précision le fonctionnement des différents organes de cette installation, car un problème complet de séchage conduit à un système d'équations fortement non linéaires et couplées. Ainsi les codes développés peuvent être prohibitifs en temps de calcul. Le problème devient nettement plus compliqué lorsqu'il s'agit d'élaborer une application d'aide à la décision ayant pour théâtre un équipement industriel réel.

Les procédés industriels régis par des transferts couplés de chaleur et de masse (séchoirs, échangeurs...) doivent être optimisés à l'aide d'outils spécifiques.

L'approche expérimentale étant extrêmement laborieuse et surtout coûteuse, alors les céramistes font appel de plus en plus à la modélisation par simulation. Les applications en usage devront aider le concepteur et l'utilisateur à identifier le comportement temporel des différentes grandeurs, et ce pendant tout le cycle de séchage telles que :

- ❖ Le champ thermique instantané dans toute la charge, principalement pour vérifier la qualité de séchage. Cette dernière est liée à la température à cœur qui règne dans les produits céramiques et le gradient thermique dans les pièces ;
- ❖ La loi de variation de la puissance de chauffe dans le temps à assurer et ce, pour satisfaire aux valeurs de consignes du cycle (T°C, quantité : Air / Gaz).

L'analyse thermique fine d'un système nécessite le plus souvent la prise en compte des couplages entre les différents modes de transmission de la chaleur (conduction, convection, rayonnement) avec éventuellement transport fluide et / ou contraintes mécaniques. Cette analyse du cycle de séchage montre également que les différentes températures et humidités (cœur, surface et enceinte) sont les paramètres de commande d'un séchoir. La conduite de cet équipement ainsi que la consommation énergétique doivent être directement liées aux fréquences des cycles. L'endommagement mécanique de la brique (fissures, déformation...) qui est dû à un retrait différentiel du matériau, peut être minimisé en optimisant la procédure de séchage. Il s'agit alors de mettre en place des procédés de séchage garantissant un minimum de risque pour ce matériau.

L'avancée technologique vers des systèmes plus performants et plus rentables est freinée par la complexité intrinsèque de la physique des transferts et de leur modélisation. En utilisant les méthodes classiques, les temps de simulation restent longs et rendent difficile une optimisation globale et la définition de lois de commande adaptées à ces procédés.

La première démarche repose sur les méthodes d'analyse modale, de réduction et d'identification de modèles. La seconde démarche intègre l'utilisation couplée de réseaux de neurones artificiels et d'algorithmes génétiques. Elle a été appliquée à la simulation et à l'optimisation de séchoirs mais à l'échelle d'équipements pilotes.

Différentes approches permettent d'atteindre les différents choix technologiques optimisant la conception et la conduite de ce procédé [cf. **Recherche Bibliographique**]. Certes ces modèles caractérisent tant bien que mal la face dynamique du procédé d'une façon acceptable, mais leur principal handicap reste leur orientation point de fonctionnement, leur trop grande complexité et surtout la difficulté de leur mise en œuvre sur un séchoir dans son environnement complexe en tant qu'installation réelle. Par conséquent, l'objectif est de faire appel à de nouvelles techniques autorisant une conduite plus souple sur le plan représentation, tout en restant robuste au point de vue application.

Dans les conditions difficiles précitées ci-dessus, les modèles utilisés possèdent différentes structures, de forme très simple réduit à tout l'espace du séchoir, ou très complexe préconisant un découpage très fin de la charge et du flux gazeux.

Initiés en grande partie par un besoin de synthèse sur les procédés, la démarche que nous avons entreprise a consisté, tout d'abord à faire un tour d'horizon sur l'état de l'art dans ce domaine. Nous avons constaté, et ce d'une façon systématique la tendance très prononcée et orientée application.

2. Objectif de l'étude

Notre travail est motivé par la perspective de contribuer à un tel projet de régulation. L'objectif global visé est de proposer une autre approche pour appréhender la problématique de cette opération unitaire de séchage permettant de la représenter à l'aide d'un modèle qui a la particularité de ne retenir que les caractéristiques essentielles du séchoir et de définir une loi pour améliorer ses performances de contrôle-commande..

Le modèle que nous nous proposons est de la première forme, et est global tant d'un point de



Recherche Bibliographique

1. Introduction

Le problème du séchage en céramique a déjà été depuis fort longtemps abordé par de nombreux scientifiques en l'occurrence [Kri59], [Lik59], [Sal54], [Hir32], qui se sont intéressés à ses divers aspects théoriques et qui ont contribué à accroître, sans cesse, les connaissances s'y rapportant.

Pour effectuer des études de fonctionnement ou de dimensionnement des équipements des processus qui atteignent un certain degré de complexité, on développe généralement des modèles permettant de décrire soit le comportement d'ensemble de l'installation, soit celui d'un équipement pris isolément. On peut imaginer de nombreux modèles plus au moins adaptés aux études que l'on désire effectuer [Hen76].

La démarche que nous avons suivie a consisté, tout d'abord, à établir l'état de l'art en matière de modèles mathématiques de représentation d'un tel procédé. Dans la majorité des sources bibliographiques que nous avons consultées, l'approche du séchage est proposée à plusieurs échelles, celle des mécanismes où il s'agit d'affiner la modélisation des phénomènes physiques contribuant au séchage [Nad, Pui95], celle cinétique où il s'agit de définir et de caractériser les comportements de divers produits et de relier ces comportements aux exigences de qualité sur le produit final [Kor82], enfin celle du procédé dans son ensemble où il s'agit de qualifier l'apport des différents procédés étudiés et de quantifier les couplages existants entre le comportement du produit et le fonctionnement du procédé [Muj83].

On constate une approche originale du procédé de séchage avec une analyse abordée en évoluant successivement dans des échelles géométriques croissantes qui permettent de passer du modèle de connaissance microscopique au modèle macroscopique en terme de génie des procédés puis au séchoir lui-même.

Mais les modèles qui y sont développés sont du type à paramètres répartis fortement non linéaires, possédant des structures complexes et difficilement exploitables en conduite de procédés bien qu'ils constituent une bonne approximation des phénomènes physiques qui se produisent dans le système en question.

Actuellement, on peut constater deux problèmes fondamentaux de commande de processus dans ce secteur :

- ❖ Le choix et le maintien d'un régime de séchage dans le but d'atteindre une humidité prédéfinie et une qualité de produit avec une productivité maximale du séchoir et surtout un minimum de coût d'énergie.
- ❖ Le choix et le maintien d'un régime de cuisson du produit dans le but de minimiser l'écartement des indicateurs de qualité du produit fini par rapport aux données initiales en diminuant le coût énergétique dans la mesure du possible.

Au moment où la recherche est orientée vers une investigation de lois de commande basées sur une approche mathématique formelle, d'autres axes ont été fixés dans le but de mettre en œuvre de nouvelles théories appelées intelligentes (neuronal, floue, génétique). En 1974, E.Mamdani et son équipe, se basant sur un article de L.A.Zadeh [Zad73], ont réussi à réaliser la première application de la théorie de la logique floue dans la conduite des procédés [Mam74]. Cette application concernait le contrôle d'une installation à vapeur. Ceci a favorisé d'autres réalisations pratiques telles que, la température d'un réacteur chimique [Mam, Kin76], contrôle d'un métro automatique [Yas, Myi85] au Japon, la commande globale d'un four rotatif à voie humide de production de clincker par la société F.L.S. au Danemark sur la base d'algorithmes élaborés par [Ost.79] et [Her.82], donnant ainsi un caractère spectaculaire à la mise en œuvre

pratique de la logique floue et enfin tout récemment en Europe, une intense activité de recherche a débuté afin d'introduire la logique floue en milieu industriel. Une synthèse des avancées dans ce domaine peut être aussi trouvée dans plusieurs autres travaux [Lee.90], [Gue93], etc.

Cette approche offre une insensibilité à l'imprécision des paramètres des systèmes et fournit ainsi une alternative originale pour résoudre les problèmes de commande. Cependant, plusieurs problèmes demeurent notamment le réglage des gains de normalisation des entrées (Ge, Gde) et des sorties (Gu, Gdu) du régulateur flou [Gue92]. L'aspect fortement non linéaire et les difficultés d'utilisation du modèle des régulateurs flous rendent difficile la synthèse de techniques visant à l'extraction des règles de calibrage automatique des gains du régulateur en fonction des variations paramétriques du système à commander.

2. Aperçu sur la Recherche-développement dans le domaine de la conduite Automatique des séchoirs à céramique [Aizenberg, Kip.87]

Dans cette partie, nous nous étalerons sur certains développements scientifiques et techniques en cours qui touchent le séchage. Spécifiquement, on a exploré la Recherche-développement entourant les nouveaux instruments de mesure, les moyens de systèmes de contrôle-commande et les modèles mathématiques qui se rattachent aux développements des contrôleurs de séchoirs (cf. aussi chapitre III). La recherche sur les instruments de mesure portera sur des outils pour mesurer les variables du procédé qui permettront de faire progresser le programme de séchage ou déterminer avec précision l'arrêt des séchoirs en fin de cycle, tandis que la recherche sur les modèles mathématiques porte sur des moyens de définir automatiquement les programmes de séchage. La littérature du domaine fut notre source (cf. [Références Bibliographiques]).

2.1. Les instruments de contrôle dans les séchoirs

La teneur en humidité, le taux de variation de la teneur en humidité, le gradient d'humidité dans les pièces du produit et les contraintes induites par la variation de teneur en humidité dans les pièces sont autant de facteurs influençant la qualité du séchage. Ces variables demeurent difficiles à mesurer et constituent des défis pour les développeurs d'instruments de contrôle. Jusqu'à maintenant, pour appliquer un programme de séchage, deux types de mesure sont requis. Il s'agit de la mesure de l'évolution de la teneur en humidité qui sert principalement à faire avancer le programme et la mesure de la teneur en humidité de la charge pour déterminer l'arrêt du séchoir.

Les difficultés entourant le développement d'instruments de mesure proviennent des propriétés hétérogènes du produit, du grand nombre de pièces dans le séchoir, de la variabilité des conditions de séchage, de la difficulté technique de mesurer les grandes et petites teneurs en humidité. La majorité des instruments qu'on retrouve dans l'industrie et en même temps dans les recherches publiées se basent sur les propriétés électriques, résistance électrique, et autres, tous corrélées avec la teneur en humidité [Rogovoï.75].

2.2. Les différents modèles mathématiques développés sur le séchage

L'activité scientifique touchant la modélisation du séchage en général est abondante et diversifiée [Nadeau, Pui.95]. Malheureusement, ce n'est pas le cas des produits rouges de la céramique lourde. Ce qui suit donnera un aperçu sur ce qui se passe dans le milieu de la recherche en ciblant les travaux sur la commande et la conduite des séchoirs à céramique. Dans ce contexte, le développement de modèles mathématiques est justifié par la nécessité d'obtenir des outils pour définir le programme de séchage et les appliquer. Ainsi, l'objectif serait d'intégrer les modèles mathématiques aux contrôleurs de séchoirs pour en faire de nouveaux contrôleurs dits avancés.

Pour faire une synthèse des développements en cours, nous avons classé les modèles en trois catégories. Ces catégories représentent à notre avis une suite d'étapes à franchir pour intégrer les modèles mathématiques à la commande des séchoirs à céramique. Ces catégories sont :

1. les modèles décrivant le comportement du produit au séchage;
2. les modèles cherchant l'évolution optimale de la teneur en humidité et de la température du produit ;

3. les modèles permettant d'appliquer automatiquement le séchage optimal.

2.3. Les modèles décrivant le comportement du produit au séchage

Le résultat attendu de la première catégorie de modèles permet de visualiser le séchage en produisant des courbes qui montrent l'évolution de la teneur en humidité et de la température de la charge. Ces modèles servent à comprendre et à prédire le séchage en fonction de différentes conditions de l'air imposées et des différentes caractéristiques de la charge. Ces modèles deviennent un outil prédictif du comportement du matériau lors du séchage et appuieraient l'opérateur lors de l'élaboration des programmes de séchage.

Cette catégorie regroupe une partie importante des efforts dédiés à la modélisation. Un de ces modèles est présenté par Marsov [Mar, Sla.88]. Celui-ci n'avait pas la prétention de couvrir toutes les particularités du procédé du séchage et pour preuve, depuis ce temps de nombreux auteurs se sont attardés à développer d'autres modèles. Ceux-ci décrivent l'évolution de la teneur en humidité du produit à partir d'un ensemble d'équations établissant un bilan de masse et d'énergie. Ils nécessitent toutes la connaissance de l'humidité initiale (condition initiale) de la pièce de charge et les conditions de séchage imposées à la surface du matériau (conditions frontières). Ils se distinguent les uns des autres par le choix des lois gouvernant le mouvement de l'eau dans la charge, le nombre de direction du mouvement étudié, les méthodes de résolution numérique et la façon de traduire les conditions de séchage imposée à la surface du matériau.

En effet, la variabilité naturelle des propriétés du produit fait qu'il n'existe toujours pas un modèle universel. Il existe plutôt plusieurs modèles avec des domaines de validité restreints.

C'est du moins la conclusion qu'on peut faire. Nous pensons également qu'une étude de comparaison sur plusieurs modèles devrait être faite. Cette comparaison permettrait de faire apparaître du moins la différence qui existe d'un modèle à l'autre et s'assurer si les résultats de simulation concordent bien avec les résultats d'essais expérimentaux. Le degré de corrélation entre ces résultats devrait mettre en évidence le fait que les modèles ne sont toujours pas un outil utilisé pour définir des programmes de séchage et par conséquent les améliorer.

La variabilité de la matière et du procédé de séchage étant une contrainte importante lors de la modélisation, certains auteurs y ont prêté une attention particulière. Ainsi, [Bous.78] traite l'aspect stochastique du procédé. Il nota avec cette approche que chaque simulation doit générer des résultats légèrement différents. Cela représente mieux le cas réel d'un séchoir où chaque pièce de la charge a des propriétés distinctes et est soumise à des conditions de séchage différentes selon sa position dans le lot global. Ce type de modèle offre un aspect plus dynamique du procédé et constitue, d'après nous, de bons fondements pour les besoins d'optimisation et de contrôle-commande du procédé de séchage d'un produit céramique. Une approche statistique devrait en principe favoriser la représentation de la variabilité naturelle du procédé.

2.4. Les modèles d'optimisation du taux d'humidité

Si les modèles présentés à la section précédente s'avéraient précis, il deviendrait naturel de chercher des méthodes d'optimisation qui définiraient les programmes de séchage en donnant l'évolution de la teneur en humidité optimale du matériau. Ce type de modèle constitue la deuxième catégorie que nous désirons introduire.

D'une façon générale, l'optimisation s'énonce ainsi trouver l'évolution de la teneur en humidité du matériau qui minimiserait le temps de séchage, le rebut et l'énergie. Différentes qualités de matériaux et différents procédés de séchage conduiraient à différentes solutions optimales. Dans ce cas, le rebut est le premier critère d'optimisation ce qui ne serait pas nécessairement le cas pour le séchage d'un produit céramique où le temps pourrait être le premier critère sans toutefois négliger complètement le rebut.

Certains auteurs [Mar, Sla.88] ont donc mis en oeuvre des critères d'optimisation (cf. III.3.1.) pour obtenir des programmes de séchage qui limiteraient le rebut. Dans ce cas, les conditions de température de l'air seraient ajustées pour limiter les contraintes imposées au matériau et ainsi

améliorer la qualité du séchage. Cette approche nécessite l'ajout d'un autre modèle qui représente les efforts internes engendrés par le phénomène de retrait du matériau qui diffère d'une couche du matériau à l'autre (sectionnement) pendant l'opération de séchage.

Outre ces exemples qui portent sur les contraintes dans le matériau, il existe peu de travaux ayant porté sur des programmes de séchage *optimisés*. Cela s'explique de la même manière que précédemment si les modèles n'arrivent pas à représenter le procédé de séchage avec suffisamment de précision, il est donc évident que la mise en oeuvre de méthodes d'optimisation soit difficile.

2.5. Les modèles d'optimisation globale du procédé de séchage

Finalement, nous traitons ici la description de la troisième catégorie de modèles. Ce sont des modèles qui doivent résoudre un ensemble d'équations et estimer en temps réel certains paramètres qui serviront à imposer les conditions de séchage dans le séchoir.

Quelques auteurs y ont travaillé, certains en axant leurs efforts sur les modèles fondamentaux, tandis que d'autres ont exploré les avenues offertes par l'application d'autres méthodes de la commande. Dans ce type d'application, les modèles ont une structure différente. Ils possèdent différents blocs, comme des modules d'identification, d'observation, de prédiction et d'optimisation. De plus, ils nécessitent la prise de mesure dans le séchoir en temps réel et doivent aussi agir directement sur le procédé. Ces modèles deviennent partie intégrante de la structure de commande et modifieraient substantiellement la structure actuelle telle que présentée dans la figure III.03.

3. Conclusion

Force est d'admettre que les modèles mathématiques n'ont pas permis de combler les attentes de ceux qui voyaient dans cet outil un moyen de franchir de nouvelles étapes dans la façon de sécher un matériau céramique. Cet insuccès n'est pas lié à un manque d'efforts si on considère le nombre d'études scientifiques dédiées à cet aspect du problème. Comme cela a été le cas de l'instrumentation, le grand nombre de pièces de la charge dans le séchoir, le procédé de séchage, etc. sont autant de raisons qui limitent l'applicabilité des modèles mathématiques.

Plusieurs années d'efforts ont passé. On comprend bien la position des industriels qui fait qu'ils ne sont pas associés à des programmes de recherche pour le développement de nouveaux contrôleurs de type avancé. Ils auraient de la difficulté à justifier des investissements dans la recherche sans avoir identifié au préalable une première recherche prometteuse avec un risque limité. Ainsi, les modèles mathématiques demeurent l'apanage du milieu scientifique avec quelques percées industrielles

On observe que la recherche-développement entourant les nouveaux instruments de mesure et les modèles mathématiques ne permettent pas d'appuyer l'élaboration de contrôleurs de séchoirs. On constate que l'innovation dans le domaine des contrôleurs ne suit pas le rythme observé dans d'autres secteurs de pointe. En fait, la mesure de la teneur en humidité demeure un problème technique non résolu

Dans ce cas, on peut conclure que la difficulté de modéliser le procédé de séchage et de ne pas pouvoir mesurer la teneur en humidité demeurent deux barrières importantes au développement et à l'implantation de systèmes de contrôle-commande avancés

Cette constatation explique en grande partie la difficulté d'adopter de nouvelles technologies de séchage et surtout pourquoi le temps demeure la principale variable de contrôle même si la qualité du produit céramique fini est identifiée comme la variable de contrôle la plus importante.

Nous pensons qu'il serait plus rationnel d'effectuer une analyse de ces modèles en les comparant sous divers types de critères de performances (précision, espace de stockage, complexité de mise en oeuvre, possibilité d'adaptation ou non à des situations en temps réel, etc.) pour aboutir aux principales questions que nous pouvons poser dans ce cas-ci, à savoir :

- ❖ Quels sont les principaux obstacles au développement et à l'implantation de systèmes de contrôle-commande avancés dans le procédé de séchage ?
- ❖ Quels seraient les applications cibles pour ces systèmes de contrôle-commande ?

Chapitre I

Description et Modélisation du Procédé de Séchage de Produits Céramiques

I.1 Introduction

Il est rare qu'une production industrielle (procédés continus) ne fasse pas intervenir des échanges de chaleur. S'il a été possible durant de longues années de minimiser leur importance, la compétition énergétique dans laquelle nous sommes engagée a rapidement, voire brutalement, remis les choses à leur place.

Le séchage est une opération unitaire fondamentale du génie chimique. En effet, avoir la possibilité de faire passer d'un fluide chaud vers un fluide froid un flux de chaleur donné, avec un écart de température le plus faible possible de manière fiable et économiquement optimisée, est devenu un objectif primordial. Mais la diversité des systèmes thermiques industriels rend très difficile l'exercice qui consiste à détailler pour chacun les techniques permettant d'optimiser son bilan thermique. Les pertes les plus importantes proviennent des entrées d'air parasites, notamment à l'enfournement et à la sortie du produit [Atg.00]. La conception initiale du circuit aéraulique du séchoir, vise donc à réduire ces airs parasites le plus possible en tant que perturbations. En général, on doit maintenir une légère dépression et une bonne homogénéité de la température dans l'enceinte du séchoir et du produit.

La fabrication de la céramique lourde dans le volume global de production des matériaux de construction est de l'ordre de 32 %. Ce qui lui donne un rang de premier ordre dans la construction.

Dans ce chapitre introductif à notre étude, nous nous intéressons à l'étude des phénomènes thermiques et massiques au cours de ces opérations de déshydratation qui s'effectuent à des échelles interdépendantes :

- à l'échelle du matériau où il s'agit de définir les termes des transferts.
- à l'échelle de l'installation où il s'agit de préciser l'influence des paramètres géométriques et de fonctionnement de l'installation.

La description de ces phénomènes complexes nous incite à distinguer différents types de modèles possibles [Hen.76].

I.2. La modélisation et les difficultés de sa mise en œuvre

I.2.1. Modèle de connaissance

Ce modèle est établi à partir des équations physiques et de corrélations adéquates. Aucun phénomène physique n'est à priori négligé dans la mesure où il est difficile de déterminer à l'avance son effet sur le comportement d'ensemble. Si l'on établit un modèle ponctuel ne résolvant que les équations différentielles du temps, il est difficile de chiffrer les erreurs que l'on commet par rapport à un modèle spatial comportant les équations aux dérivées partielles, fonctions du temps et de l'espace. Ce modèle est complexe, il nécessite une mise au point longue. Certes ce modèle permet de rendre compte finement et avec la précision des corrélations choisies, de l'évolutions de toutes les grandeurs physiques de l'installation et est donc bien adapté aux études de dimensionnement optimal des matériels, quand il résulte de contraintes obtenues sur des transitoires sévères et de grande amplitude.

I.2.2. Modèle de régulation

Parmi les études de fonctionnement, les études de régulation se distinguent dans la mesure où elles nécessitent un compromis stabilité-précision qui impose de représenter localement avec une bonne précision statique et dynamique le comportement du processus que l'on désire régler. Il est donc nécessaire de tenir compte des caractéristiques des capteurs et des actionneurs qui peuvent influencer sur le comportement de la chaîne de réglage.

Ce modèle établi dans le but d'appliquer une méthode de réglage, est en général linéaire, et donc valable uniquement autour d'un point de fonctionnement donné ce qui exclut de l'utiliser pour effectuer des transitoires d'une grande amplitude.

La structure du modèle est arbitraire (matrice comportant soit des fractions rationnelles de la variable de Laplace, soit des réponses impulsionnelles, soit sous forme d'équation d'état etc.). Ce modèle est obtenu par identification soit du modèle de connaissance, soit à partir d'essais effectués sur l'installation réelle. Il n'est donc valable que pour les conditions dans lesquelles ont été effectués les essais ayant servi à l'identification et on aboutit à autant de matrices que de conditions d'essais. Par contre le modèle obtenu est simple et permet d'effectuer rapidement la simulation en boucle fermée et donc de définir la régulation et d'étudier la sensibilité du comportement par rapport aux coefficients de réglage.

I.2.3. Modèle de fonctionnement

Les deux types de modèles décrits précédemment résultent de démarches très différentes. Celui de connaissance est obtenu par analyse théorique. Tous ses paramètres ont une signification physique. Par contre l'effet de chacun d'eux sur le transitoire d'ensemble ne peut être connu que par des essais analogues à ceux que l'on effectuerait sur le système physique lui-même. A l'inverse, le modèle de régulation est obtenu expérimentalement. Les paramètres sont en relation directe avec le comportement d'ensemble mais n'ont aucune signification physique.

Le modèle de fonctionnement, par contre, doit réaliser le compromis entre ces deux approches. Il doit permettre de suivre l'évolution du processus mais aussi d'en extraire certains paramètres caractéristiques :

La structure n'est pas arbitraire mais cohérente avec le fonctionnement physique, (car ici apparaissent explicitement les notions globales de transfert de masse et d'énergie, certains coefficients spécifiques etc.). Donc ce modèle est mieux adapté à certains types d'études pour lesquelles il est préférable de bénéficier d'une grande souplesse de mise en œuvre plutôt qu'une grande finesse de représentation.

Par conséquent, ce modèle essaie d'établir une approche commune entre le modèle de connaissance établi par analyse théorique et le modèle de représentation déduit de l'expérimentation. Alors, nous pouvons conclure que le modèle mathématique établi à partir des équations physiques est indispensable pour approfondir la connaissance des processus complexes, or le modèle de fonctionnement prenant en compte les bilans massiques et énergétique globaux et intégrant les résultats expérimentaux est un outil complémentaire qui s'avère d'une mise en œuvre plus souple pour certaines applications telle que la nôtre.

Il est donc naturel que l'on s'oriente vers la recherche d'un autre modèle simplifié mais qui peut nous donner à peu de frais des résultats suffisants pour des applications telle que la nôtre.

Nous avons finalement retenu un modèle de représentation basé sur des données expérimentales, que nous avons enrichi des constatations faites sur site avec les opérateurs.

Le modèle que nous considérons par la suite sera donc a priori un modèle statique décrivant un fonctionnement à l'équilibre. Nous voulons ajouter également que pour appréhender le processus de séchage il faut, en effet, connaître les caractéristiques du produit céramique, la température et l'humidité de l'air de séchage et leur évolution dans l'installation.

Il est indispensable de connaître les courbes de séchage avec précision pour lesquelles une étude expérimentale s'avère généralement nécessaire, soit encore en vue de rechercher les courbes caractéristiques de la charge qui permettront ensuite de déterminer ces mêmes courbes dans les conditions différentes. Il faut aussi tenir compte du fait que la durée du cycle de séchage a une

incidence directe sur la taille de l'installation.

I.3. Le séchoir, objet de la modélisation

I.3.1. Le séchoir et son environnement

Un séchoir est un ensemble de chambres où il est nécessaire de maintenir des conditions de travail propices de séchage. Sa forme et sa construction sont conçues de manière à fournir et contrôler la température, l'humidité et la circulation de l'air. Ainsi, les séchoirs modernes sont adiabatiques. On y retrouve des ventilateurs, des systèmes de chauffage et des événements. Le chargement du séchoir à chambres ne bouge pas en cours de séchage, ce sont plutôt les conditions de séchage qui évoluent en cours de procédé. Cette progression des conditions est imposée par un programme de séchage.

La qualité du design d'un séchoir a une influence sur la capacité de bien sécher le matériau. Du point de vue énergétique le séchoir doit être bien isolé pour diminuer la demande de puissance et empêcher la condensation sur les murs. Ensuite, un séchoir doit être étanche afin de mieux contrôler les infiltrations et exfiltrations d'air. Ce bon contrôle limite les variations de l'humidité de l'air.

Finalement, la disposition des ventilateurs doit être conçue de façon à uniformiser la distribution de l'air et de la chaleur nécessaire au séchage.

I.3.2. Taux de séchage

Lorsque dans un séchoir on contrôle les conditions ambiantes, cela permet d'accélérer le séchage. On peut quantifier cette vitesse de séchage par le taux de séchage (TH). On observe que le taux de séchage est influencé par différents facteurs tels que la température du matériau, sa teneur en humidité, la structure et la forme du produit et le procédé lui-même ; par exemple la ventilation, le design des séchoirs. Dans la figure I.01., ce taux de séchage s'exprime par la pente de la ligne tangente à la courbe de séchage. On calcule la valeur du taux de séchage par la différence de la teneur en humidité sur la différence de temps comme indiquée par le petit triangle tangent à la courbe de séchage de (cf. Figure. I.01).

De plus, on observe sur cette figure que si on traçait le même triangle plus tard en cours de procédé, la pente serait inférieure et par conséquent, le taux de séchage plus faible.

Dans cette deuxième phase de séchage, l'eau qui reste dans la matière étant en plus petite quantité, sa migration vers la surface est plus difficile. Ainsi, on note que le taux de séchage diminue vers la fin du séchage.

Cette caractéristique est importante dans le procédé de séchage et influence la façon dont les programmes de séchage sont implantés.

D'autres caractéristiques influencent aussi l'évolution de la teneur en humidité du matériau.

Ce sont, entre autres, les différences dans la structure, la forme, la position des pièces sur les claies et la teneur en humidité initiale. Ainsi, l'évolution de la teneur en humidité du produit telle qu'illustrée à la figure I.01, maintenant est plus représentative du procédé de séchage et conduit à la définition conceptuelle du domaine du procédé de séchage.

I.3.3. Spécificités de la matière première

L'argile est un mélange composé en grande partie de Silicates d'Alumine et d'oxyde de Silicium (quartz et mica), de Chaux, de Potasse, de Sodium et Fer, avec adjonction de petites quantités d'autres sels [Dās.69].

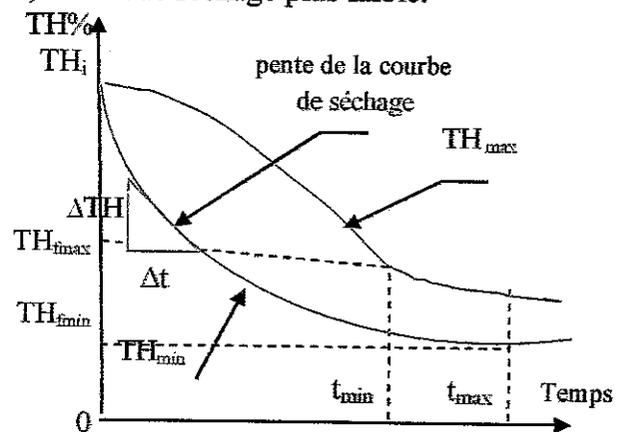


Figure.I.01 Courbe de séchage.

A fin de travailler plus facilement avec ce matériau, il faut lui adjoindre de l'eau afin de le rendre plastique et ce dans le but d'obtenir des formes de briques et de tuiles désirées.

Avant de passer à la cuisson, le produit ainsi obtenu, est ensuite séché pour augmenter sa consistance. Le but principal du séchage donc, est de réduire (de $\approx 26\%$ à $\approx 3\%$ au max) l'eau résiduelle dans la brique accompagnée d'un retrait variant entre 5 et 10% par rapport au produit sec. Par conséquent, un séchage mal effectué provoque de nombreux inconvénients, tel que la fissuration, la déformation et l'affaiblissement de la résistance mécanique qui se répercutent sur le produit fini et son utilisation dans les ouvrages de construction.

L'opération de séchage représente par ailleurs, un pourcentage important du coût total de la fabrication, et de ce fait, la quantité d'énergie à fournir pour extraire l'eau physique contenue dans le produit doit être minimale.

Ceci dit, les sources de chaleur utilisées dans notre cas sont entre autres :

- ❖ L'énergie fournie par le générateur à gaz ;
- ❖ ---/---/--- d'air frais ;
- ❖ ---/---/--- récupérée des fumées du four tunnel ;
- ❖ ---/---/--- recyclée à partir du séchoir même.

I.4. Le produit céramique et l'installation de séchage

I.4.1. Etapes d'élaboration des produits céramiques lourds

L'élaboration des produits céramiques rouges comprend les opérations suivantes :

- L'extraction de l'argile de la carrière ;
- Le façonnage des pièces céramiques ;
- Le séchage de la charge ;
- La cuisson du produit semi fini.

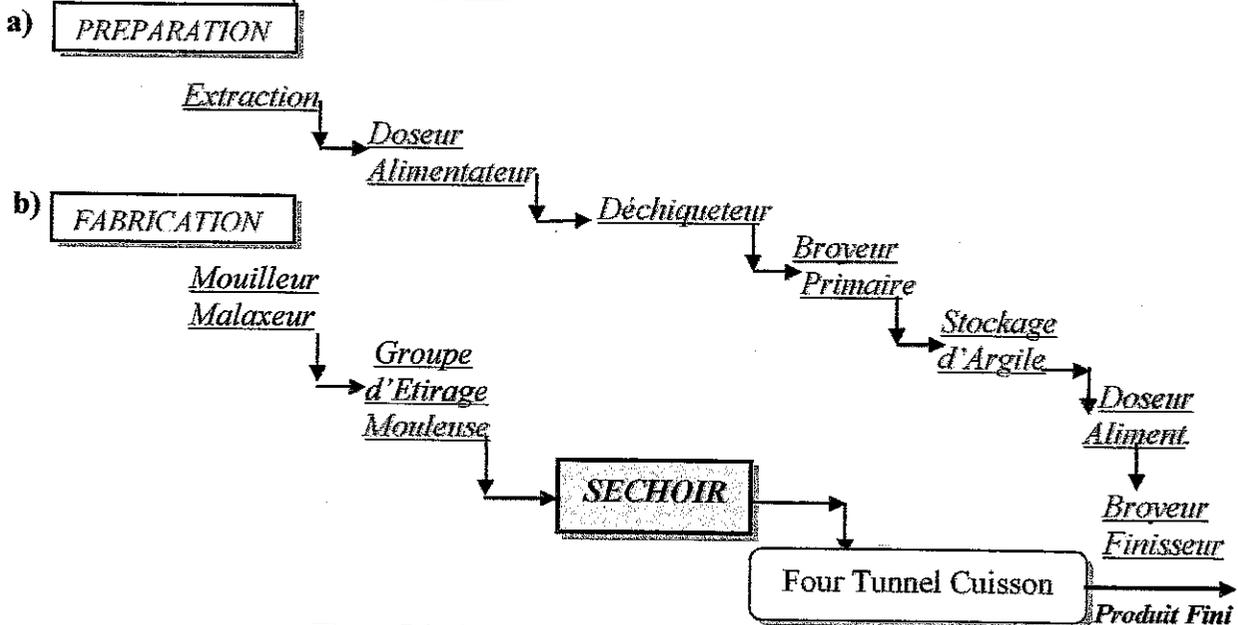


Figure.I.02.les différentes étapes du procédé de fabrication.

I.4.2. Le processus de séchage et l'interaction de ses paramètres

Le procédé de séchage des produits rouges dans les séchoirs à chambres est complexe. Le produit semi fini, à sa sortie du cycle de séchage, ne doit pas présenter de fissure. Cette qualité est fonction de la quantité d'eau présente dans le façonnage de l'argile. Le départ d'eau de ce matériau doit être proportionnel au temps. Ceci dit, le cycle de l'évaporation d'eau peut être subdivisé en trois stades principales [Kra.77] possédant chacun une caractéristique particulière, ce qui impose certaines contraintes à savoir :

↘ Au 1^{er} stade :

La vitesse de séchage est presque constante. Il y a apparition d'un gradient d'humidité qui assure le transport d'eau de l'intérieur vers l'extérieur au fur à mesure que l'eau de surface

s'évapore.

↳ Au 2^{ème} stade :

La vitesse de séchage se modifie. L'eau se retourne alors à l'intérieur, se déplace à travers la couche sèche du produit sous l'effet de la diffusion de la vapeur, puis celle-ci est emportée par l'air sur la surface du produit.

↳ Au 3^{ème} stade :

Il est caractérisé par l'expulsion des dernières traces d'humidité. La vitesse de séchage diminue encore plus et tend de 4% à 2%.

Ces trois stades sont des étapes primordiales qu'il faudra observer pour avoir un bon séchage. Cette évaporation est due à l'influence de l'air (fumée) injecté dans les chambres de séchage. Le processus est compliqué, vu qu'en premier stade, la surface du produit est imbibée d'eau et la température reste constante. Ceci dit, la chaleur nécessaire pour l'évaporation est fournie par l'air chaud, la vitesse de séchage augmente fortement, et ce au fur et à mesure que la température de l'air s'élève.

La vitesse de séchage dépend essentiellement du gradient de pression de la vapeur entre la surface du produit et l'air de séchage le léchant [Kra, 77]. La pression de la vapeur dépend de la température à la surface humide du produit, donc une grande température des produits provoque une pression de vapeur élevée à la surface du matériau, donc une grande évaporation à mesure que l'humidité de l'air augmente la différence de pression partielle entre les points d'évaporation et l'air diminue, ce qui diminue la vitesse de séchage.

IL existe plusieurs facteurs, dont quelques variables d'état, qui sont déterminants de par leur influence sur le processus de séchage, notamment :

↳ la température de l'air, (cf. ci-dessus).

↳ l'humidité relative de l'air de séchage.

Au fur et à mesure que l'humidité relative augmente la différence de pression partielle de vapeur entre les points d'évaporation et l'air diminue, ce qui diminue la vitesse de séchage, le produit garde en équilibre avec l'air une certaine quantité d'humidité.

↳ la vitesse de l'air

La couche d'air limite retourne sur les produits, offre une résistance vis à vis de la chaleur venant de l'extérieur et de la vapeur d'eau qui migre vers l'extérieur à travers cette couche. Cette résistance dépend de la vitesse de l'air, à mesure qu'elle augmente, l'épaisseur ainsi que la vitesse de la couche limite diminue.

↳ l'épaisseur des pièces céramiques

Plus l'épaisseur des produits augmente, plus le séchage est délicat, car le dégagement de l'eau devient difficile, ce qui peut provoquer des contraintes de fissurations, comme ça influe aussi sur la vitesse de séchage en la diminuant.

I.4.3. Description de l'installation de séchage (cf. figure.I.03)

L'installation de séchage est constituée de :

- 17 chambres dont chacune est équipée de :
 - ❖ Registre d'admission d'air chaud (secondaire) ;
 - ❖ ----/----- de recyclage (secondaire) ;
 - ❖ ----/----- d'extraction (secondaire).
- Un générateur de chaleur ayant un rôle d'appoint de chaleur, où la quantité de chaleur est fournie par la combustion d'un volume de gaz naturel et d'une quantité d'air frais.
- Chambre de mélange : où se déroule le mélange de deux quantités de fumée d'air chaud provenant de la récupération du four et de recyclage du séchoir.
- Registre d'admission (principal) ;
- ----/----- de recyclage (principal) ;
- ----/----- d'extraction (principal) ;
- ----/----- de récupération du four (principal) ;
- ----/----- d'air frais (principal).

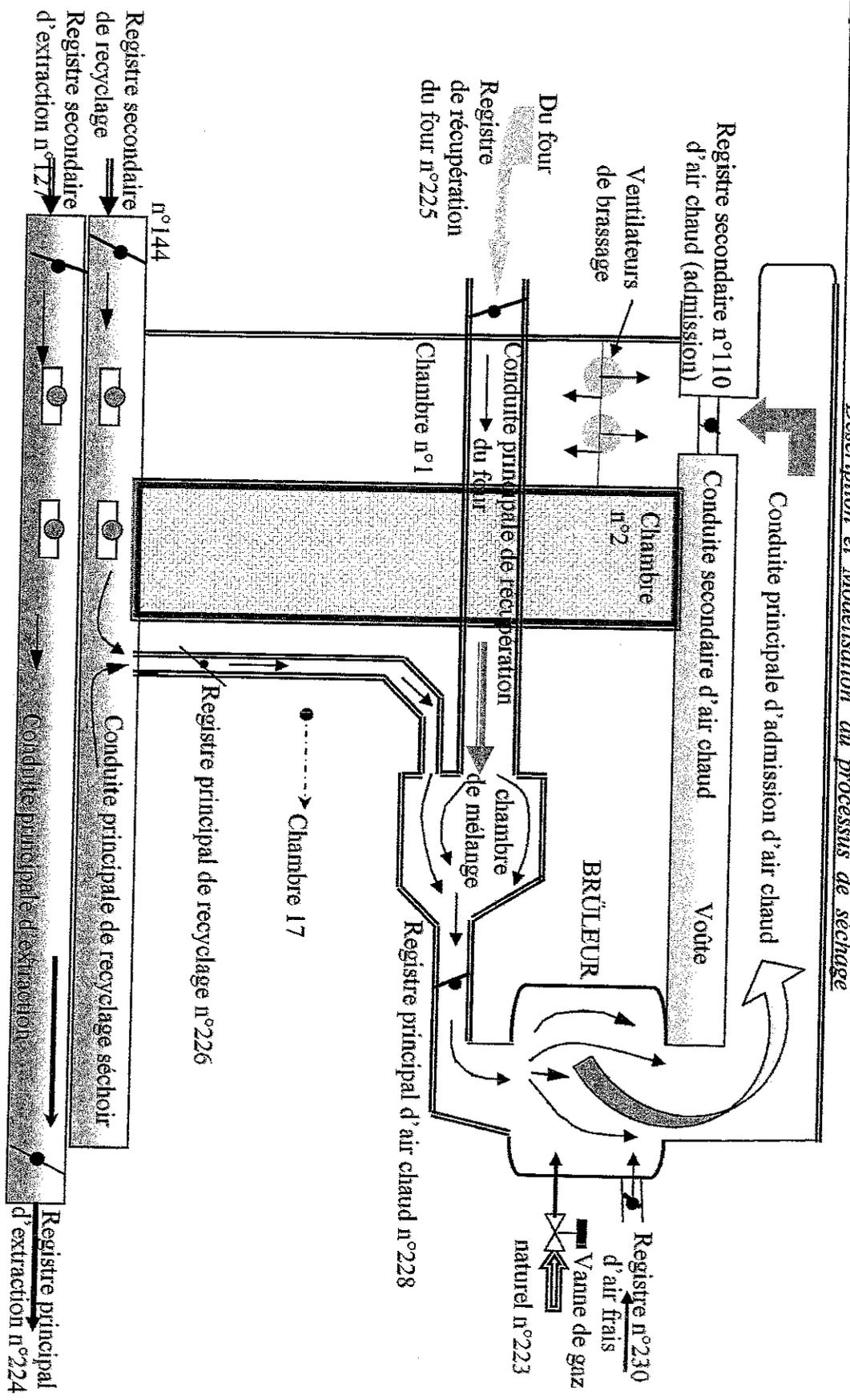


Figure 1.03. Schéma principal du séchoir à chambres de l'unité de production

I.4.4. Fonctionnement du séchoir (cf. figure.I.04)

Le mélange des airs se fait dans la chambre de mélange qui passe ensuite par la chambre de combustion où il sera porté à une température de 120 à 150°C selon le nombre de chambres utilisées, traversant par la suite la conduite principale d'admission d'air chaud ou il sera distribué dans les chambres à travers les conduites secondaires d'admission.

Chaque chambre est commandée par un système de commande automatique d'ouverture ou fermeture des registres secondaires qui caractérisent ainsi le régime de séchage. Ce système de commande (cf. chapitre II) est destiné à poursuivre une courbe de température en fonction du temps, tracée théoriquement par le concepteur de l'installation, donnant ainsi les températures de consigne de la chambre considérée.

L'état des registres secondaires de chaque chambre se fait de la manière suivante :

- **Registre d'admission** : Ce registre est actionné par un servomoteur qui est commandé par un système de régulation automatique. Son ouverture se fait progressivement tant que la température de la chambre est inférieure à celle de la consigne et se ferme graduellement dans le cas contraire.
- **Registre d'extraction** : L'ouverture de ce registre se fait par un servomoteur
- **Registre de recyclage** : Ce registre s'ouvre à 100% dès la 16^{ème} heure, suite à la fermeture du registre d'extraction jusqu'à la fin de séchage (24 heures).

Références des désignations relatives à l'instrumentation portées sur la **figure.I.05**

item	Désignation	Qté	Destination
1 à102	Ventilateur hélicoïdal	102	17 chambres x 6 ventilateurs.
103à119	Registre de ventilation	17	Organe d'admission des fumées
120à136	idem	17	-----d'extraction-----
137à153	idem	17	-----de recyclage-----
154à170	Pilote de commande	17	Pilote les registres n° 137 à 153
171à187	idem	17	----- n° 120 à 136
188à203	servomoteur	17	-----n° 103 à 119
204à221	programmeur	17	Régulateur à cames (électroméc)
222	servomoteur	1	transducteur
223	Ventilateur hélicoïdal	1	Ventilateur d'extraction à l'atmos.
224	Registre de ventilation	1	Organe d'extraction des fumées
225	idem	1	Récupération des fumées du four
226	idem	1	Recyclage des fumées du séchoir
227	servomoteur	1	Pilote le registre n° 225
228	Registre de ventilation	1	admission principale des fumées
229	Ventilateur hélicoïdal	1	Soufflage au brûleur
230	Registre d'air frais	1	Organe d'exécution d'air frais
231	servomoteur	1	Pilote le registre n° 230
232	brûleur	1	
233	Vanne automati. de gaz	1	Régule le débit de gaz
235	régulateur	1	Pilote la vanne 233 admission gaz
236à252	Capteur de température	17	thermocouples
253	servomoteur	1	Pilote le registre n° 228
254	idem	1	Pilote le registre n° 226
255	Ventilateur hélicoïdal	1	Tirage des fumées.

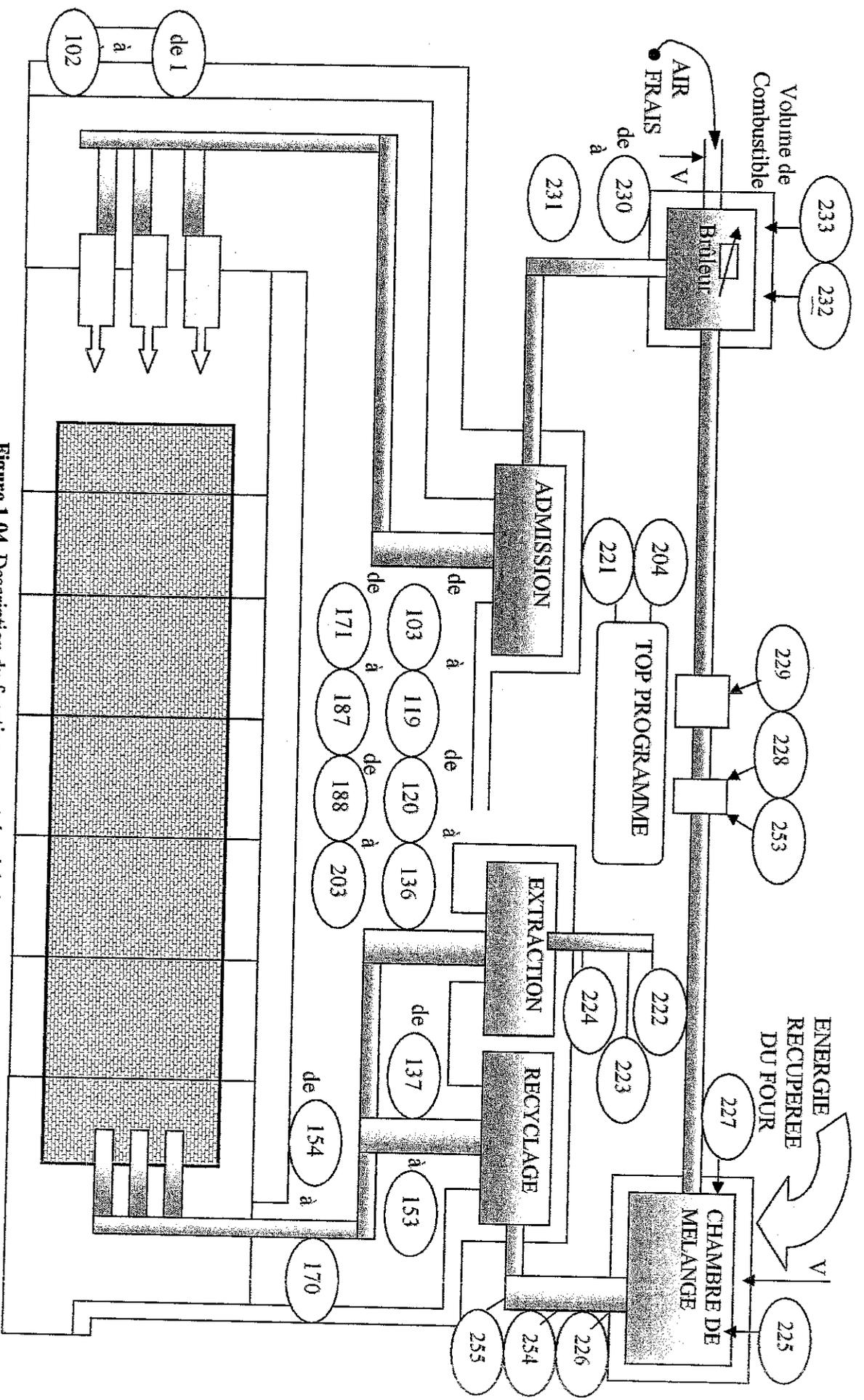


Figure.1.04. Description du fonctionnement du séchoir.

I.5. Modélisation du processus de séchage

I.5.1. Bases de la modélisation

En statique, c'est à dire ici sans qu'il y est déplacement de la charge à l'intérieur du séchoir, l'état du produit évolue suivant les trois phases successives [Cha, Cav, 91]:

- montée en température quasiment sans perte d'humidité ;
- évaporation de l'eau libre (en surface) à température constante ;
- évaporation de l'eau liée (adsorbée) à température croissante et vitesse de dessiccation décroissante.

Dans ce modèle, notons que

- les échanges air/matière dépendent de la quantité de produit dans la chambre, du débit d'air et des différences de température et d'hygrométrie entre air et produit ;
- la circulation d'air se fait pour sa part d'après les puissances de soufflage à l'entrée et à l'extraction, la résistance opposée par la quantité de matière, les pressions dans les chambres ;
- la température de l'air dépend de son débit et de la puissance fournie aux résistances par la source d'énergie ;
- les calculs de la température et de l'hygrométrie moyenne se font d'après les bilans de matière, d'eau, de vapeur et de chaleur.

Le problème qui se pose pour valider effectivement ce modèle vient de ce que de nombreux coefficients sont mal connus ou varient en cours d'exploitation : c'est le cas notamment des coefficients d'échange thermique air/matière, liés entre autres aux caractéristiques principales de la charge, en l'occurrence à sa granulométrie et à sa température.

Il est pratiquement impossible d'appréhender le mouvement du liquide et de la chaleur dans le produit, par voie mathématique. Toutefois, on dispose de connaissances fondamentales, relatives aux caractéristiques du produit à sécher qui sont d'une valeur inestimable.

Les phénomènes essentiels de ce procédé deviennent donc accessibles en supposant que le séchage s'effectue dans des conditions extérieures constantes ($T^{\circ}\text{C}$, $\text{H}\%$ et une vitesse de l'air constantes) [Kra.77].

Néanmoins, nous soulignons le fait que, nous manquons cruellement de données expérimentales et de relations supplémentaires permettant une *estimation conséquente et précise* des échanges convectifs et des gradients de température et d'humidité dans la charge dans les séchoirs à céramiques.

I.5.2. Considérations fondamentales

Problématique : *Qu'elle est la quantité d'énergie horaire minimale qu'il faudra fournir au produit vert, de telle sorte à extraire le maximum d'eau qu'il contient sans altérer sa qualité à l'état final?*

a) Objectif

- Définition des procédures de conduite de séchage (interaction des paramètres)
- Détermination de la quantité horaire d'énergie optimale afin de réduire les dépenses en combustible et de même, avoir un produit de meilleure qualité

b) Contraintes

- Absence de modèle mathématique dynamique approprié de l'objet à l'étude ;
- Absence d'enregistrement en temps réel de courbes évolutives de $T^{\circ}\text{C}$ et d' $\text{H}\%$;

c) Solution

- Définition des paramètres de conduite du séchoir ;

- Modélisation statique de l'installation sur la base du modèle établi par le constructeur ;
- Détermination du comportement des paramètres principaux.

I.5.3. Description du cycle de séchage

L'opération de séchage consiste à réduire au maximum le pourcentage d'eau contenue dans la charge constituée de la pâte argileuse.

Le cycle de séchage dure en réalité 24 heures dispatchées de la façon suivantes :

- ↘ Temps de séchage réel = 22 [h] ;
- ↘ Temps de remplissage = 01 [h] ;
- ↘ Temps de vidage = 01 [h].

I.5.3.1. Procédure de séchage

- Entre la 1^{ère} et la 16^{ème} heure : Registres secondaires d'air chaud et d'extraction sont ouverts, par contre le registre de recyclage est fermé.
- Entre la 16^{ème} et la 22^{ème} heure : Registres secondaires d'air chaud et de recyclage sont ouverts, par contre le registre d'extraction est fermé.
- De la 22^{ème} à la 24^{ème} heure : Les trois registres secondaires d'air chaud, de recyclage et extraction sont fermés.

I.5.4. Transfert d'énergie et de masse

L'étude quantitative d'un processus de séchage, dans un séchoir, exige la connaissance du bilan matière et du bilan thermique.

Les équipements essentiels du séchoir sont comme suit : (cf. **figure.I.03**)

- La chambre de mélange ;
- Le générateur de chaleur (le brûleur) ;
- Les 17 chambres de séchage.

I.5.4.1. Chambre de mélange

Dans cette chambre se fait le mélange de deux quantités de fumée d'air chaud issues de la récupération du four et de recyclage du séchoir.

Le bilan thermique formulé implicitement est comme suit :

$$\sum \text{Apports} = \sum \text{Dépenses}$$

I.5.4.1.1. Apports d'énergie: Bilan massique des entrées

- Air chaud récupération four :

Les fumées issues de la combustion du gaz naturel dans le four tunnel, contiennent une énergie (chaleur dite sensible qu'on va récupérer). Celle-ci sera une source supplémentaire de chaleur au séchoir. Par conséquent, son apport, n'est pas négligeable et introduit des économies d'énergie supplémentaires.

➤ L_f : Quantité massique issue de la récupération des fumées du four :

$$L_f = f(T_f, F_f, X_f, I_f)$$

L_f : quantité de fumée issue du four

$$(I.01) \\ [Kg/H] ;$$

T_f : température de la fumée de récupération du four	[°C] ;
F_f : humidité de la fumée de récupération du four	[%] ;
X_f : humidité absolue de la fumée de récupération du four	[Kg d'eau/Kg d'a.s.a] ;
I_f : enthalpie de la fumée de récupération du four	[Kcal/Kg d'a.s.a].

Pour le séchage, les fumées ne doivent pas être trop humides, ainsi l'humidité contenue dans la fumée récupérée du four est limitée et désignons là par L_{fmax} , la quantité optimale des fumées que nous pouvons récupérer du four.

- Air chaud recyclage des fumées du séchoir :
 - L_{res} : Quantité massique issue du recyclage des fumées du séchoir :

$$L_{res} = f(T_{res}, F_{res}, X_{res}, I_{res}) \quad (I.02)$$

L_{res} : quantité de fumée de recyclage du séchoir	[Kg/H] ;
T_{res} : température de fumée de recyclage du séchoir	[°C] ;
F_{res} : humidité de fumée de recyclage du séchoir	[%] ;
X_{res} : humidité absolue de fumée de recyclage du séchoir	[Kg d'eau/Kg d'a.s.a] ;
I_{res} : enthalpie de fumée de recyclage du séchoir	[Kcal/Kg d'a.s.a].

A partir de la 16^{ème} heure les fumées évacuées de la chambre sont moins humides, donc on peut les utiliser comme source supplémentaire de chaleur pour le séchage de brique. La somme des quantités de fumées qu'on peut obtenir à partir de la 16^{ème} heure de séchage de chaque chambre est limitée par L_{resmax} .

1.5.4.1.2. Bilan massique des sorties

Le résultat des débits de mélange des fumées issues, de la récupération du four et du recyclage de séchoir forme une quantité de fumée $L's$.

$$L'_s = f(T_0, F_0, I_0, X_0) \quad (I.03)$$

$$L'_s = L_f + L_{res} \quad (I.04)$$

T_0 : la température de la fumée avant le brûleur	[°C] ;
F_0 : l'humidité de la fumée avant le brûleur	[%] ;
I_0 : l'enthalpie de la fumée avant le brûleur	[Kcal/Kg d'a.s.a] ;
X_0 : l'humidité absolue de la fumée avant le brûleur	[Kg d'eau/Kg d'a.s.a].

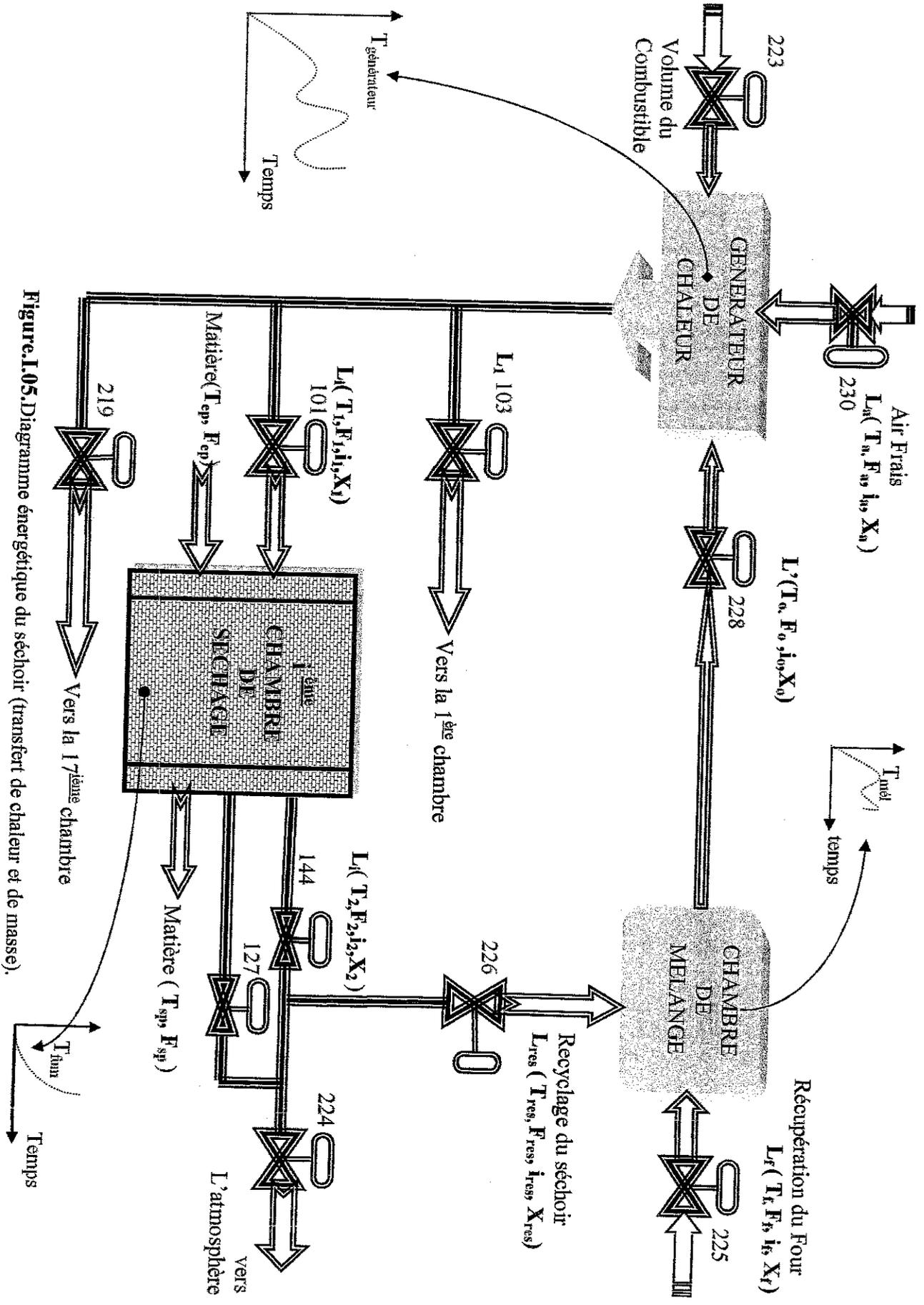


Figure.I.05. Diagramme énergétique du séchoir (transfert de chaleur et de masse).

I.5.4.2. Générateur de chaleur

Le générateur de chaleur a un rôle d'appoint de chaleur. S'il y a une différence entre la chaleur fournie " L_s " et la chaleur " Q_s " nécessaire pour satisfaire les besoins des 17 chambres, le générateur intervient afin de compenser cette différence de chaleur.

Ceci dit, cette quantité d'énergie est fournie par la combustion d'un volume (D) de gaz naturel et d'une quantité d'air frais tel que :

$$Q_s = f(I_a, D) \quad (1.05)$$

Avec : I_a : Energie sensible due à l'air :

$$L_a = f(T_a, F_a, I_a, X_a) \quad (1.06)$$

L_a : quantité d'air frais	[Kg/H]
T_a : température d'air frais	[°C]
F_a : l'humidité relative d'air frais	[%]
I_a : enthalpie d'air frais	[Kcal/d'a.s.a]
X_a : l'humidité absolue d'air frais	[Kg d'eau/d'a.s.a].

➤ L_s : Quantité de chaleur fournit par le générateur :

$$L_s = f(T_1, F_1, i_1, X_1) \quad (1.07)$$

$$L_s = L_f + L_{res} + L_a \quad (1.08)$$

T_1 : température de fumée à l'entrée de la chambre	[°C]
F_1 : l'humidité relative de fumée à l'entrée de la chambre	[%]
I_1 : enthalpie de fumée à l'entrée de la chambre	[Kcal/d'a.s.a]
X_1 : l'humidité absolue de fumée à l'entrée de la chambre	[Kg d'eau/d'a.s.a].

I.5.4.3. Les chambres de séchage

Dans chaque chambre de séchage, il doit y avoir un abaissement d'humidité et une évolution de la température du produit à sécher (*courbe de séchage*). Ceci dit, pour abaisser l'humidité du produit de F_i à F_f , il faut augmenter la température de l'air de T_i à T_f .

Les grandeurs qui rentrent dans le bilan massique sont :

✓ A l'entrée de la chambre :

$$L_i = f(T_1, F_1, i_1, X_1) \quad (1.09)$$

✓ A la sortie de la chambre :

$$L_i = f(T_2, F_2, i_2, X_2) \quad (1.10)$$

Il y a une différence de température δT , entre la température de l'air et la température du produit qui est provoquée par le contact d'air chaud sur la surface des briques. Par ailleurs, en raison de manque de données pour la détermination de l'allure (fonction mathématique) de la variation de δT en fonction de la température, on suppose que $\delta T = 0$.

$$T_{produit} = T_{air} - \delta T; \quad \delta T = 0.$$

Donc : $T_{produit} = T_{air};$

D'où, on peut écrire : $T_{ep} = T_i, T_{sp} = T_2;$

Avec : T_{ep} : température du produit humide à l'entrée de la chambre ;

T_{sp} : température du produit sec à la sortie de la chambre ;

T_1 : température d'air à l'entrée de la chambre ;
 T_2 : température d'air à la sortie de la chambre.

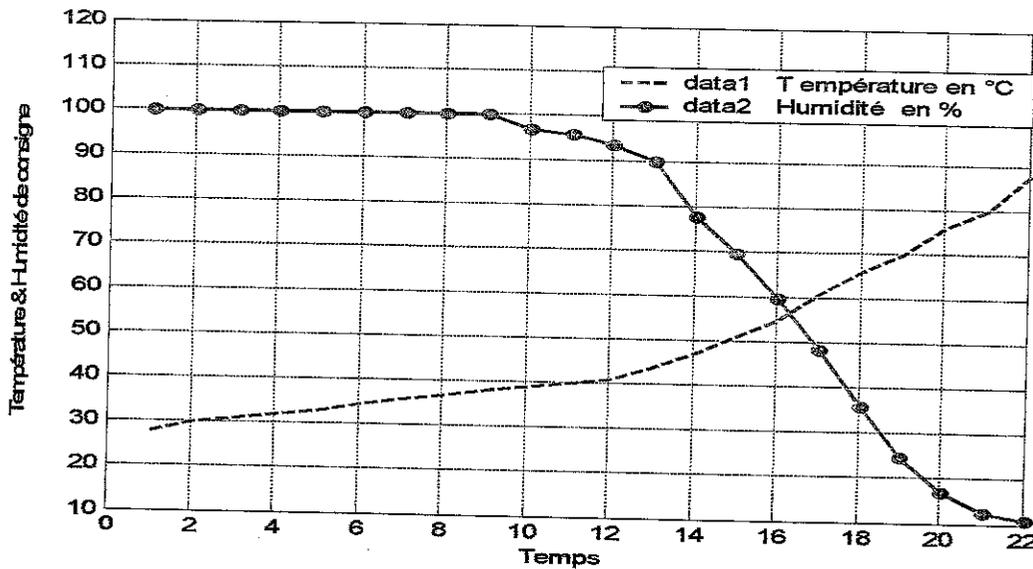


figure.I.06. la courbe de cycle du procédé séchage *constructeur*

▪ *Remarque au sujet de la courbe du constructeur :*

L'évolution de la température et de l'humidité du produit (T_1 et F_1) est représentée sur la courbe de séchage du constructeur de l'équipement (cf. figure. I.06.).

Sur la courbe, les 26 % d'humidité relative du produit représentent les 100% d'eau existante dans le produit vert (à l'état humide).

Pour calculer l'humidité absolue(X) et l'enthalpie (i), on utilise les relations mathématiques suivantes :

$$X = (0.622 F.P_d) / (P_{atm} - F.P_d)$$

$$I = C_{pt}.T + X (C_{pd} T + R_0)$$

(I.11)
(I.12)
(%)

F : humidité relative de fumée

X : humidité absolue de fumée ;

T : température de fumée ;

P_d : la pression de saturation de vapeur d'eau à la température T ;

P_{atm} : pression atmosphérique

C_{pt} : la chaleur spécifique moyenne de l'air

R_0 : la chaleur d'évaporation de l'eau à 0°C

C_{pd} : la chaleur spécifique moyenne de la vapeur

D'où :

$$I = 0.24 T + X (0.46 T + 597)$$

(I.13)

Le séchoir est composé de 17 chambres où chaque chambre reçoit une charge en produit vert à sécher et un apport d'énergie définis technologiquement selon un temps de séchage prédéterminé. Le séchage s'effectue à porte fermée par brassage d'air chaud sur le produit .Ce dernier provient de :

- ✓ La récupération du four ;
- ✓ Le recyclage du séchoir ;
- ✓ L'air frais.

Ceci dit, pour éviter une surpression ou dépression d'air dans les gaines du séchoir, il faut respecter le débit de chaque volume d'air chaud qu'il faut introduire dans la chambre, en

corrélation avec un volume de fumée extrait s'échappant, soit par le registre d'extraction au début du séchage et ou soit par le registre de recyclage en fin de cycle de séchage global.

I.5.5. Méthodologie de calcul du bilan énergétique

Le bilan thermique donne un excellent aperçu des divers facteurs calorifiques qui interviennent au cours d'un processus de séchage. Pour ce faire, les principales étapes de calcul, déterminant la quantité de chaleur qu'il faut fournir à chaque heure pour chaque chambre sont :

I.5.5.1. Bilan massique de chaque chambre

- la quantité d'eau à évaporer W_i :

$$W_i = P_{sec} (F_{1i} - F_{2i}) / 100 \quad (I.14)$$

- quantité de fumée nécessaire comme agent de séchage [L_i] :

$$L_i = W_i / (X_{2i} - X_0) \quad (I.15)$$

- volume de fumée refouler dans la chambre (V_i) :

$$V_i = L_i (R_i + X_0 R_d) (273 + T_1) / P_{am} \quad (I.16)$$

I.5.5.2. Bilan énergétique de l'échangeur (séchoir)

Pour calculer Q_i , il suffit d'établir le bilan thermique d'une chambre.

a) Les énergies en apport liées à :

- ‡ Energie sensible à l'air frais à T_0 :

$$Q_1 = L_i I_0 \quad (I.17)$$

- ‡ Chaleur sensible aux produits secs entrant à T_1 :

$$Q_2 = p_{sec} C_b T_1 \quad (I.18)$$

- ‡ Chaleur sensible des accessoires (claies) due à la température T_1 :

$$Q_3 = E C_E T_1 \quad (I.19)$$

- ‡ Chaleur sensible liée à l'humidité du produit à sécher à T_1 :

$$Q_4 = W_i T_1 \quad (I.20)$$

- ‡ Chaleur fournie par la combustion du gaz naturel :

Q_i = c'est la quantité de chaleur qu'on veut déterminer.

b) Dépenses de chaleurs liées à

- ‡ Chaleur due à l'évacuation par les fumées humides à T_2 :

$$Q'_1 = L_i I_2 \quad (I.21)$$

- ‡ Chaleur sensible aux produits (briques séchées) à la température sortie T_2 :

$$Q'_2 = P_{sec} C_b T_2 \quad (I.22)$$

↓ Chaleur emmagasinée par les accessoires (clais) due à la température T_2 :

$$Q'_3 = E C_E T_2 \quad (I.23)$$

↓ Chaleur perdue par l'enceinte et les parois de séchoir :

$$Q'_4 = F \lambda \Delta T \quad (I.24)$$

- **Remarque** : En raison de la non-disponibilité de capteurs d'humidité, on remplace cette équation par l'équation empirique suivante :

$$Q'_4 = L_i (I_1 - I_2) - (P_{sec} C_b + E C_E) (T_2 - T_1) + W T_1 \quad (I.25)$$

c) **D'après la loi de conservation d'énergie**

$$\Sigma \text{Chaleur en apport} = \Sigma \text{Chaleur en dépense}$$

A partir de cette loi, l'équation suivante peut être établie :

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_i = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 \quad (I.26)$$

Donc :

$$Q_i = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 - Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 \quad (I.27)$$

Après la simplification on peut écrire :

$$Q_i = L_i (I_1 - I_0) \quad (I.28)$$

où, Q_i : est la chaleur fournie pour une chambre.

1.5.5.3. Procédure de calcul des paramètres de conduite d'une seule chambre

- Le débit (D_i) de gaz naturel nécessaire au niveau du générateur de gaz chaud

$$D_i = Q_i / P_c \quad (I.29)$$

- Calcul du % d'ouverture de registre d'admission de la chambre (R_{adi})

$$R_{adi} = (V_i 100) / (\omega S_{adi} 3600) \quad (I.30)$$

- Calcul du volume et la plage d'ouverture (en %) du registre d'extraction de la chambre (V_{ext} ; R_{ext}).

On a déjà vu à partir du cahier de charges, qu'entre la 1^{ère} et la 16^{ème} heure, le registre secondaire d'extraction est ouvert et sera fermé entre la 16^{ème} et la 22^{ème} heure.

Si $H \leq 16$:

$$V_{exti} = L_i (R_1 + X_2 R_d) (273 + T_2) P_{atm} \quad (I.31)$$

$$R_{exti} = (V_{exti} 100) / (\omega S_{ext} 3600) \quad (I.32)$$

Si $H > 16$:

$$V_{exti} = 0 ; \text{ et } R_{exti} = 0.$$

- Calcul du volume et la plage d'ouverture (en %) du registre de recyclage de la chambre (V_{exti} ; R_{exti}) :

Le registre de recyclage fonctionne inversement par rapport au registre d'extraction, c'est à dire que, entre la 1^{ère} et la 16^{ème} heure, le registre secondaire de recyclage est fermé, et sera ouvert entre la 16^{ème} et la 22^{ème} heure.

Si $H \leq 16$:

$$V_{resi} = 0; \quad \text{et} \quad R_{resi} = 0;$$

Si $H > 16$:

$$V_{resi} = L_i (R_1 + X_2 R_d) (273 + T_2) / P_{atm}; \quad (I.33)$$

$$R_{resi} = (V_{resi} 100) / (0.25 S_{resi} 3600) \quad (I.34)$$

I.5.5.4. Calcul des paramètres pour toutes les chambres

- Calcul de : L_s , Q_s , D_s ,

$$L_s = \sum_{i=1}^{17} L_i, \quad (I.35)$$

$$Q_s = \sum_{i=1}^{17} Q_i, \quad (I.36)$$

$$D_s = \sum_{i=1}^{17} D_i. \quad (I.37)$$

- Calcul du volume et l'ouverture du registre d'admission principal et de la chambre : V_{ad} et R_{ad} :

$$V_{ad} = L_s (R_1 + R_d X_0) (273 + T_0) / P_{atm} \quad (I.38)$$

$$R_{ad} = (V_{ad} 100) / (\omega S_{ad} 3600). \quad (I.39)$$

I.5.5.5. Calcul des paramètres du séchoir (dimensionnement du séchoir)

Il faut offrir une quantité de fumée L_s à l'échangeur qui s'exprime implicitement par la formule suivante :

$$L_s = f(T_0, F_0, I_0, X_0) \quad (I.40)$$

Pour obtenir L_s , il existe trois sources possibles :

- ☛ Air frais qui est défini par :

$$L_a = f(T_a, F_a, I_a, X_a) \quad (I.41)$$

- ☛ Recyclage provenant du séchoir qui est défini par :

$$L_{res} = f(T_{res}, F_{res}, X_{res}, I_{res}) \quad (I.42)$$

- ☛ Récupération provenant du four qui est défini par :

$$L_f = f(T_f, F_f, X_f, I_f) \quad (I.43)$$

Donc pour calculer L_s il faut déterminer les quantités : L_a , L_{res} , L_f .
Ce calcul peut être représenté par le schéma suivant :

air récupération recyclage fumée de
 du four du séchoir mélange

$$\begin{pmatrix} L_a \\ T_a \\ F_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f \\ T_f \\ F_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{res} \\ T_{res} \\ F_{res} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_0 \\ T_0 \\ F_0 \end{pmatrix}$$

On calcule (L_a), la quantité d'air nécessaire pour la combustion :

$$V_a = D_s \times P_c \tag{I.44}$$

$$L_a = (V_a P_{atm}) / (R_l + R_d X_0)(273 + T_a) \tag{I.45}$$

Donc:

$$R_a = (V_a 100) / (\omega S_a 3600) \tag{I.46}$$

Pour calculer L_f, L_{res} , on doit suivre la méthode suivante :

D'après le bilan des équations présenté ci-dessus, on remplace la récupération du four par un sous-mélange :

$$L_x = f(T_x, F_x, X_x, L_x) \tag{I.47}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} L_x \\ T_x \\ F_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_a \\ T_a \\ F_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_0 \\ T_0 \\ F_0 \end{pmatrix}$$

On calcule les caractéristiques des fumées du sous mélange L_x on a :

$$L_x = L_s - L_a \tag{I.48}$$

D'autre part, à l'aide des équations de base de la thermodynamique on peut établir le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} L_s I_0 = L_a I_a + L_x I_x \\ L_x X_0 = L_a X_a + L_x X_x \end{cases}$$

$$D'où : \quad I_x = (L_s I_0 - L_a I_a) / (L_s - L_a) \tag{I.49}$$

$$X_x = (L_x X_0 - L_a X_a) / (L_s - L_a) \tag{I.50}$$

Pour l'étape suivante on calcule les différentes composantes de L_x :

Sous récupération recyclage
mélange X du four du séchoir

$$\begin{pmatrix} L_x \\ T_x \\ F_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_f \\ T_f \\ F_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{res} \\ T_{res} \\ F_{res} \end{pmatrix}$$

On calcule L_f , L_{res} , on a :

$$\begin{cases} L_x I_x = L_f I_f + L_{res} I_{res} \\ L_x = L_f + L_{res} \end{cases} \quad (I.51)$$

D'où :

$$L_{res} = L_x (I_x - I_f) / (I_{res} - I_f) \quad (I.52)$$

$$L_f = L_x (I_x - I_{res}) / (I_f - I_{res}) \quad (I.53)$$

Le calcul de V_{ext} et R_{ext} , V_{res} et R_{res} et V_f , R_f , R_{gaz} donne :

$$V_{ext} = L_{ext} (R_l + R_d X_{ext}) (273 + T_{ext}) / P_{atm} \quad (I.54)$$

$$R_{ext} = (V_{ext} 100) / (\omega S_{ext} 3600) \quad (I.55)$$

$$V_{res} = L_{res} (R_l + R_d X_{res}) (273 + T_{res}) / P_{atm} \quad (I.56)$$

$$R_{res} = (V_{res} 100) / (\omega S_{res} 3600) \quad (I.57)$$

$$V_f = L_f (R_l + R_d X_f) (273 + T_f) / P_{atm} \quad (I.58)$$

$$R_f = (V_f 100) / (\omega S_f 3600) \quad (I.59)$$

$$R_{gaz} = (D_s 100) / 5000. \quad (I.60)$$

I.6. Conclusion

Arrivés au terme de ce premier chapitre, dans lequel nous nous sommes attardés sur l'aspect process en détaillant le fonctionnement du séchoir et son environnement, avant d'entamer la modélisation des transferts de chaleur et de masse en dernier lieu, nous pouvons affirmer qu'un modèle de procédé n'est qu'un ensemble de relations mathématiques permettant de prédire *certaines* aspects de son fonctionnement.

Ceci dit, nous avons pu situer le déroulement du processus de séchage et le comportement du séchoir et ce, en définissant les paramètres optimaux et la durée du séchage en se basant sur la connaissance de l'action conjuguée des facteurs suivants :

- Géométrie de l'installation et de la charge ;
- Variables d'état du processus de séchage i.e. la T°C, l'H% et le degré de renouvellement de l'air ainsi que l'H% initiale et finale désirée de la charge destinée au traitement ;
- Caractéristiques essentielles de la pâte céramique.

Enfin, On voudrait souligner le fait que notre modèle *moyenne* certains phénomènes locaux, car les écoulements d'air comme de produit n'étant pas uniformes, mais il met en évidence les facteurs majeurs et respecte les bilans globaux, en masse et en énergie.

Quant à la fiabilité et les imperfections de ce modèle, celles-ci ne peuvent être prédites qu'au courant de l'analyse qui sera menée tout au long de cette étude.

Quant à l'efficacité des modèles en général, celle-ci ne repose que sur une analogie, plus ou moins étroite, entre le comportement des objets physiques décrits et celui des êtres mathématiques supposés représenter fidèlement ces mêmes systèmes.

Chapitre II

Simulation du Profil de Température et d'Humidité au Courant du Processus de Séchage de Produits Céramiques

II.1. Introduction

Entre les développements théoriques et leurs applications à des procédés réels, les travaux de simulation se révèlent être un moyen d'investigation très puissant pour l'étude des processus industriels et jouent un rôle central dans toutes les phases de conception et d'ingénierie des systèmes de commande.

Dans cette partie donc de notre étude nous allons relater les différents résultats de la simulation numérique pour la mise au point de notre approche. Pour pouvoir s'en apercevoir de la bonne concordance et de l'adéquation des deux modèles (élaboré & expérimental), nous finirons par une validation des résultats et ce, en calculant les paramètres appropriés sous l'environnement du logiciel Matlab.

Cependant, la validation définitive nécessitera, bien sûr et toujours, une phase expérimentale afin de confronter l'algorithme du régulateur flou qui sera configuré dans le chapitre V à des conditions réelles ; car les résultats expérimentaux qui seront obtenus permettront de recalibrer précisément le modèle du système élaboré et testé en simulation.

Malheureusement, cette étape ne sera pas à notre portée pour la simple et évidente raison que nous n'avons ni les moyens matériels ni la possibilité d'accéder à l'installation en vue de procéder aux tests et essais de cette nature.

II.2. Simulation du profil de température et d'humidité

II.2.1. Procédure du cycle de séchage

Nous allons donner un aperçu sur le cycle hebdomadaire de fonctionnement de l'installation de séchage, autrement dit *le cahier des charges* sur :

- ☞ l'ouverture des registres du séchoir ;
 - ☞ les quantités d'énergie de récupération four et recyclage séchoir ;
 - ☞ L'air frais ;
 - ☞ Le combustible nécessaire à chaque heure de séchage.
- *i^{ère} heure* : Une seule chambre est en cours d'exploitation, dont les paramètres à calculer sont :
 - Quantité de chaleur nécessaire (Q_i) ;
 - Quantité de l'air chaud nécessaire (L_i) ;
 - L'ouverture des trois registres secondaires de la chambre (registre d'admission $Rad(i)$ (N°103), registre de recyclage $R_{res}(i)$ (N°137) et registre d'extraction $R_{ext}(i)$ (N°120) ;

Alors les paramètres principaux du séchoir à calculer sont :

- ✓ Le débit de combustible D ;
- ✓ La quantité d'air frais pour la combustion L_a ;
- ✓ La quantité de récupération de four L_f ;
- ✓ La quantité de recyclage de séchoir L_{res} ;
- ✓ Les ouvertures des registres principaux R_{gaz} (N°233), R_a (N°230), R_f (N°225), R_{res} (N°226) respectivement. Cependant, pendant cette heure on procède au remplissage de la 2^{ème} chambre.

- 2^{ème} heure : On a donc 2 chambres en fonction (la 1^{ère} et la 2^{ème}), on calcule de même les paramètres correspondants de chaque chambre, puis les paramètres principaux du séchoir ;
- On fait de même à chaque heure, c'est à dire le remplissage des chambres s'effectue l'une après l'autre et l'est également pour le calcul de leurs paramètres respectifs ainsi que, les paramètres principaux du séchoir ;
- A la 17^{ème} heure du séchage, on arrive au remplissage des 17 chambres. Par conséquent, elles sont toutes en état de marche et on procède de la même manière pour le calcul des paramètres de chaque chambre et les paramètres principaux de séchoir ;
- Enfin on poursuivra le processus de séchage d'heure en heure jusqu'à la fin de cycle de séchage de chaque chambre qui est de 24 heures ;
- A la fin du cycle d'une chambre, c'est à dire à la 22^{ème} heure on ferme les trois registres secondaires [$Rad(i)$], [$R_{res}(i)$], [$R_{ext}(i)$] et on remettant à zéro les autres paramètres [$Q(i)$], [$L(i)$], on arrive à une période dite de repos, qui durera en tout deux heures de temps :
 - ⊗ 1 heure pour l'évacuation des produits séchés de la chambre ;
 - ⊗ 1 heure pour l'enfournement de nouveaux produits verts.
 Ensuite cette chambre entame un nouveau cycle de séchage.

⊗ A la fin de la semaine de séchage, on vide les chambres sans les remplir au fur et à mesure qu'elles arrivent à la fin de leur cycle de séchage.

II.2.2. Etapes d'exécution de l'algorithme de simulation (résumé succinct)

- 1 Introduction des données du séchoir ;
- 2 Interprétation des valeurs initiales et finales de la température et de l'humidité du produit céramique à partir de la courbe de séchage et ce, pour chaque chambre : T_{ib} , T_{fb} , F_{ib} , F_{fb}
- 3 Calcul des enthalpies (i_o , i_1 , i_2) et l'humidité absolue (X_o , X_2).
- 4 Le bilan de masse donne : la quantité d'eau évaporée ($W(i)$), la quantité de fumée en tant qu'un agent de séchage ($L(i)$), et enfin le volume de fumée refoulée dans la chambre ($V(i)$)
- 5 Bilan énergétique :
 - Apports de chaleur : $A = \sum Q_i$
 - Calcul de : Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , avec Q_i , le paramètre à déterminer.
 - Quantité de chaleur fournie par le brûleur, $Q(i)$.
 - Dépenses de chaleur : $B = \sum Q'_i$
 - Calcul de : Q'_1, Q'_2, Q'_3, Q'_4
$$A = B ;$$

- Détermination de $Q(i)$. (Quantité de chaleur fournie par le générateur).
6. Détermination de la $i^{\text{ème}}$ chambre :
 - Débit de gaz pour générer $Q(i) : D(i)$.
 - Ouverture du registre d'admission secondaire $R_{ad}(i)$, [variable de commande].
 - Volume de fumée extrait de la chambre ($V_{ext}(i)$)
 - Ouverture du registre d'extraction secondaire ($R_{ext}(i)$), [variable de commande].
 - Volume de fumée recyclée de la chambre ($V_{rest}(i)$)
 - Ouverture du registre de recyclage secondaire ($R_{res}(i)$), [variable de commande].
 7. Reproduire le même calcul pour les autres chambres ;
 8. Déterminer la quantité de chaleur, de fumée ainsi que le débit de gaz pour toutes les chambres :

$$L_s = \sum_{i=1}^{17} L_i ; \quad Q_s = \sum_{i=1}^{17} Q_i ; \quad D_s = \sum_{i=1}^{17} D_i ;$$

9. Détermination des variables du séchoir :
 - Volume d'admission principal (V_{ad}) ;
 - Ouverture du registre principal d'admission ($Rad(i)$),
 - Le quantité de fumée recyclée du séchoir (L_{res}), récupérée du four (L_f), et d'air frais (L_a),
10. une comparaison est faite entre les paramètres suivants :
 - (L_f) avec une quantité de fumée définie comme étant maximale ($L_{f\ max}$), récupérée du four.
 - (L_{res}) avec la quantité maximale de recyclage que nous pouvons obtenir ($L_{res\ max}$).

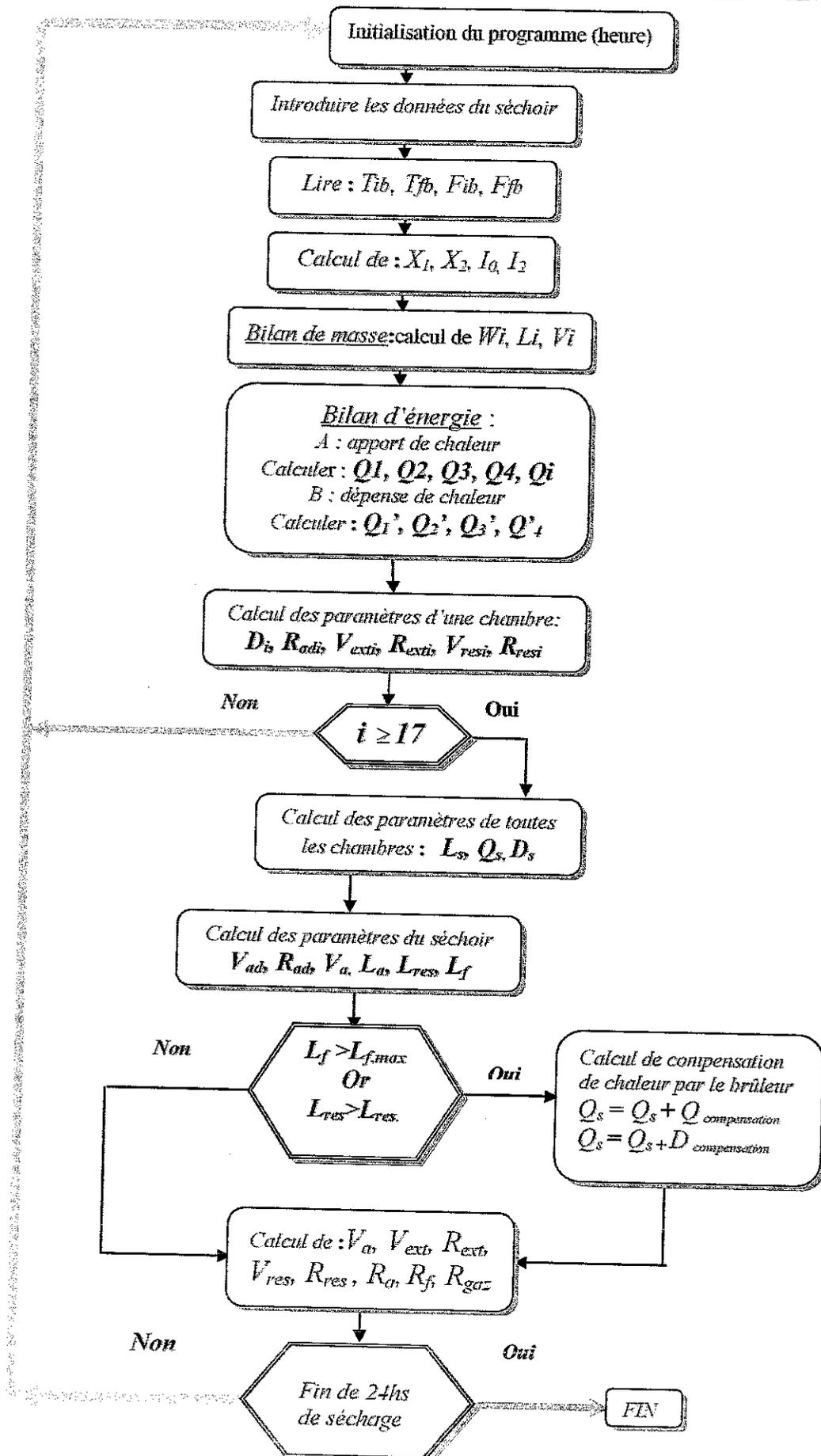
Dans le cas où : $L_f < L_{f\ max}$ et $L_{f\ max} < L_{res\ max}$, on détermine les débits passant à travers les registres de recyclage séchoir (R_{res}), de récupération four (R_f) et de l'air frais (R_a).

Dans le cas où : $L_f > L_{f\ max}$ ou $L_{f\ max} < L_{res\ max}$, on détermine la compensation de chaleur fournie par le brûleur ainsi que les valeurs de D_s et Q_s et enfin on calcule R_{res} , R_f , R_a
11. Déterminer (V_{ext}), (R_{ext}) et (R_{gaz}).
12. Dans le cas où c'est la fin du cycle de séchage, alors l'algorithme tire à sa fin. Dans le cas contraire nous serons contraints à répéter l'algorithme de la 1^{ère} étape jusqu'à la fin.

Ces différentes étapes de l'algorithme relatées ci dessus, de par leur exécution contraignante, un organigramme est présenté ci-dessous dans le but de nous permettre de procéder à la programmation de toutes ces opérations en vue de l'obtention des résultats de simulation escomptés.

Il faut noter que dans la suite de cet algorithme, des valeurs numériques sont tabulées pour permettre une éventuelle comparaison intervariable et ce, dans le but de mieux appréhender le comportement de toutes les grandeurs régissant le fonctionnement de l'installation.

Organigramme de simulation du cycle de séchage de produits céramiques



II.2.3. Résultats de simulation

A partir de la simulation des programmes des bilans massique et énergétique, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

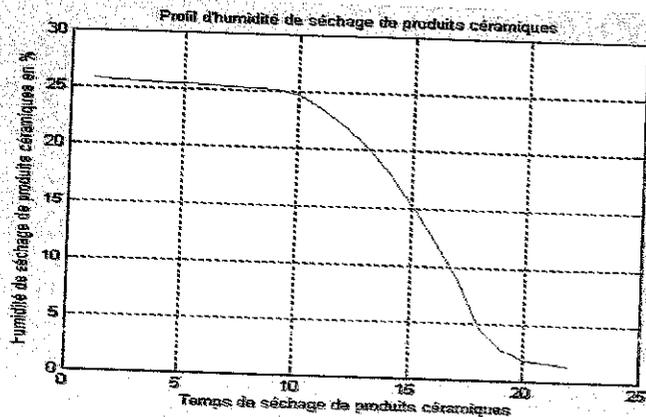
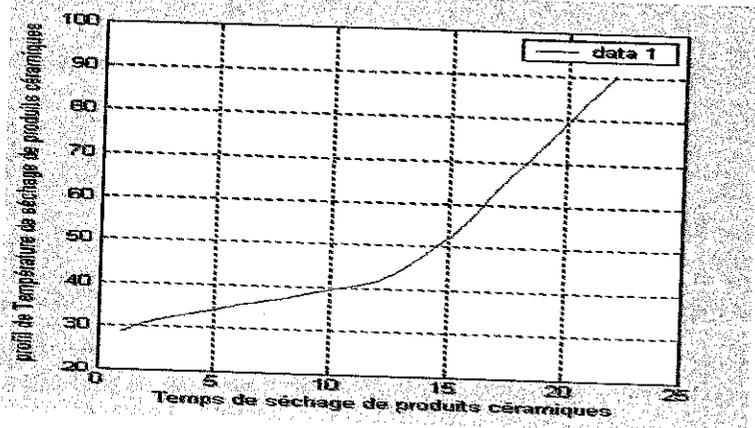
- Courbes de séchage :
Ces courbes donnent l'évolution des profils de température et d'humidité du produit en fonction du temps de séchage (cf. tableau II.01 et fig.II.01).
- Concernant les chambres, les grandeurs suivantes sont déterminées :
 - Les étapes d'évolution de séchage pour chaque chambre (heure (HI) et cycle de séchage (cyclII) correspondant, un cycle = 22 h. de séchage + 2 h. de manipulation).
 - Les exigences de séchage de chaque chambre tels que le volume (VI) d'air chaud, quantité de fumée (LI) pour développer la chaleur (QI), débit de combustible (DI) nécessaire pour créer QI et le taux d'ouverture des registres secondaires (RadI), (Res), (Rext). Sont données également les valeurs du débit du combustible (Ds).
 - le taux d'ouverture des registres principaux ainsi que les quantités passant à travers ces derniers (Ra, La), (Rf, Lf), (Res, Lres). (cf. tableau II.02, 03, 04).
- En fin de semaine de séchage, le programme affichera le nombre de pièces séchées à savoir (293.040) et le volume total de combustible consommé (3.503,19m³)(par unité : 0,0119m³).
- L'évolution des paramètres principaux d'une chambre sont récapitulés par le tableau II.4 et matérialisés par leurs courbes respectives :
 - VI : Volume d'air chaud ;
 - QI : Quantité de chaleur ;
 - DI : Débit de gaz naturel ;
 - RadI, ResI, RextI : Taux d'ouverture des registres secondaires respectifs.

Les données numériques et les courbes des profils de T°C et H % obtenues par simulation sont :

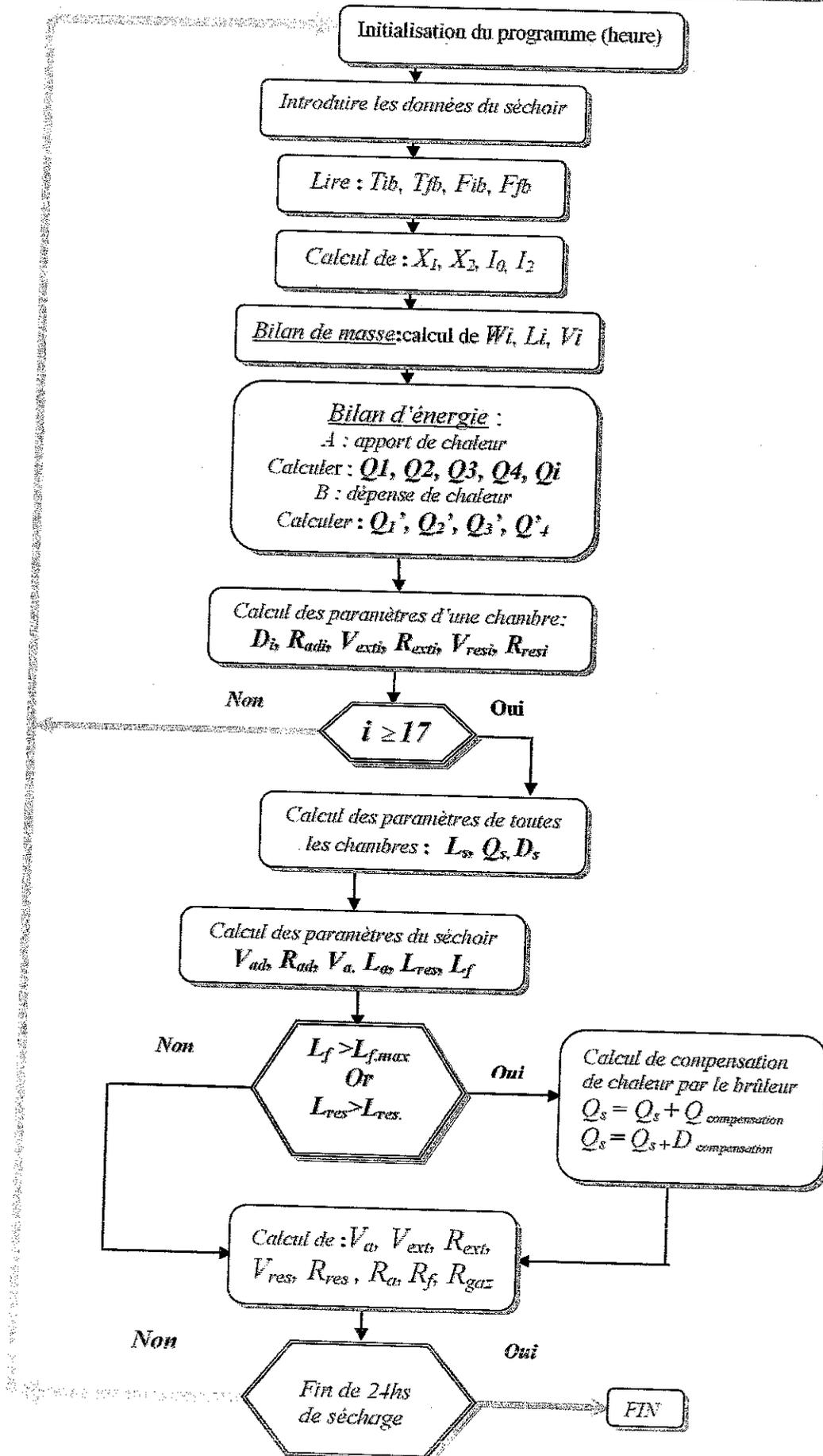
Tableau II.01

Temps(h) séchage	Température en °C	Humidité Taux : %
01	28.75	25.8284
02	30.93	25.6873
03	32.02	25.6064
04	33.12	25.5237
05	34.21	25.4393
06	35.30	25.3553
07	36.39	25.2704
08	37.48	25.1850
09	38.57	25.0995
10	39.66	24.7195
11	40.75	23.5964
12	41.84	22.0846
13	44.71	20.1950
14	48.09	17.9177
15	52.37	15.2508
16	57.54	12.3187
17	63.59	8.87710
18	69.02	4.65100
19	74.45	2.80770
20	79.88	1.80580
21	85.31	1.65420
22	90.74	1.37450

Figure. II.01 Profils de T°C et H %



Organigramme de simulation du cycle de séchage de produits céramiques



II.2.3. Résultats de simulation

A partir de la simulation des programmes des bilans massique et énergétique, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

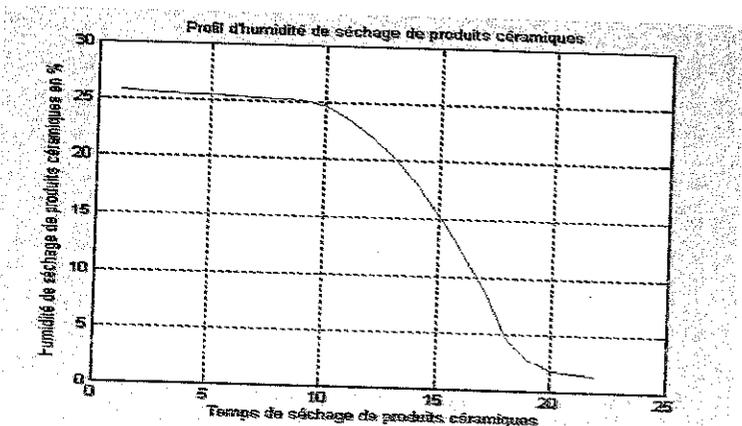
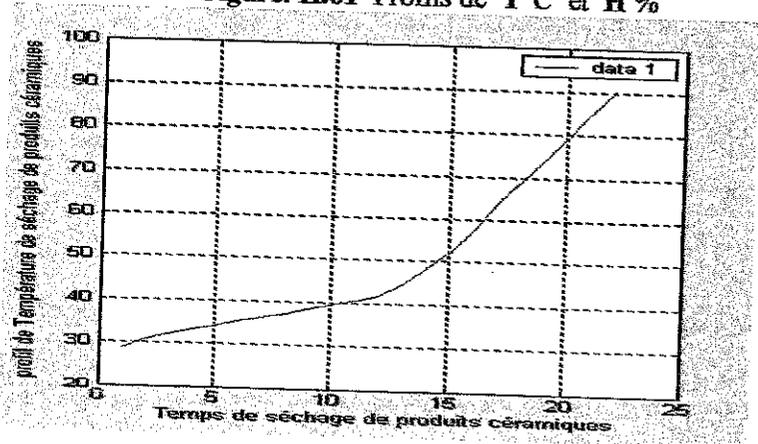
- Courbes de séchage :
Ces courbes donnent l'évolution des profils de température et d'humidité du produit en fonction du temps de séchage (cf. tableau II.01 et fig.II.01).
- Concernant les chambres, les grandeurs suivantes sont déterminées :
 - Les étapes d'évolution de séchage pour chaque chambre (heure (HI) et cycle de séchage (cyclI) correspondant, un cycle = 22 h. de séchage + 2 h. de manipulation).
 - Les exigences de séchage de chaque chambre tels que le volume (VI) d'air chaud, quantité de fumée (LI) pour développer la chaleur (QI), débit de combustible (DI) nécessaire pour créer QI et le taux d'ouverture des registres secondaires (RadI), (Res), (ResI). Sont données également les valeurs du débit du combustible (Ds).
 - le taux d'ouverture des registres principaux ainsi que les quantités passant à travers ces derniers (Ra, La), (Rf, Lf), (Res, Lres). (cf. tableau II.02, 03, 04).
- En fin de semaine de séchage, le programme affichera le nombre de pièces séchées à savoir (293.040) et le volume total de combustible consommé (3.503,19m³)(par unité : 0,0119m³).
- L'évolution des paramètres principaux d'une chambre sont récapitulés par le tableau II.4 et matérialisés par leurs courbes respectives :
 - VI : Volume d'air chaud ;
 - QI : Quantité de chaleur ;
 - DI : Débit de gaz naturel ;
 - RadI, ResI, ResI : Taux d'ouverture des registres secondaires respectifs.

Les données numériques et les courbes des profils de T°C et H % obtenues par simulation sont :

Tableau II.01

Temps(h) séchage	Température en °C	Humidité Taux : %
01	28.75	25.8284
02	30.93	25.6873
03	32.02	25.6064
04	33.12	25.5237
05	34.21	25.4393
06	35.30	25.3553
07	36.39	25.2704
08	37.48	25.1850
09	38.57	25.0995
10	39.66	24.7195
11	40.75	23.5964
12	41.84	22.0846
13	44.71	20.1950
14	48.09	17.9177
15	52.37	15.2508
16	57.54	12.3187
17	63.59	8.87710
18	69.02	4.65100
19	74.45	2.80770
20	79.88	1.80580
21	85.31	1.65420
22	90.74	1.37450

Figure. II.01 Profils de T°C et H %



➤ Résultats de simulation à un moment (H) :

Volume de combustible :

$D_s = 9.38 \text{ (m}^3\text{/h)}$;
 $R_{gaz} = 13.03 \%$.

Quantité d'air sec :

$L_a = 2326.72 \text{ (kg/h)}$;
 $R_a = 12.88 \%$.

Quantité de fumée récup-four :

$L_f = 22.27 \text{ (kg/h)}$;
 $R_f = 10.91 \%$.

Quantité de fumée recy-séch. :

$L_{res} = 0.00 \text{ (kg/h)}$;
 $R_{res} = 100 \%$.

Quantité d'extraction du séch. :

$L_{ext} = 2358.37 \text{ (kg/h)}$;
 $R_{ext} = 13.48 \%$.

Tableau II.02

CH I	Cycl I	HI (h)	VI (m ³ /h)	QI (kcal/h)	DI (m ³ /h)	LI (kg/h)	RadI (%)	ResI (%)	Rext (%)
01	01	01	3816	43594	4.92	3502	71	00	77
02	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
03	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
04	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
05	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
06	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
07	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
08	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
09	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
10	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
11	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
12	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
13	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
14	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
15	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
16	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
17	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00

➤ Résultats de simulation à un moment (H+I) :

Volume de combustible :

$D_s = 16.38 \text{ (m}^3\text{/h)}$;
 $R_{gaz} = 22.76 \%$.

Quantité d'air sec :

$L_a = 4064.16 \text{ (kg/h)}$;
 $R_a = 22.50 \%$.

Quantité de fumée récup-four :

$L_f = 38.90 \text{ (kg/h)}$;
 $R_f = 19.06 \%$.

Quantité de fumée recy-séch. :

$L_{res} = 0.00 \text{ (kg/h)}$;
 $R_{res} = 100 \%$.

Quantité d'extraction du séch. :

$L_{ext} = 4119.44 \text{ (kg/h)}$;
 $R_{ext} = 23.54 \%$.

Tableau II.03

Ch i	Cycl	HI (h)	VI (m ³ /h)	QI (kcal/h)	DI (m ³ /h)	LI (kg/h)	RadI (%)	ResI (%)	Rext (%)
01	01	02	2850	32553	3.67	2615	53	00	58
02	01	01	3816	43594	4.92	3502	71	00	77
03	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
04	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
05	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
06	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
07	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
08	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
09	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
10	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
11	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
12	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
13	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
14	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
15	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
16	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00
17	00	00	0.00	0.000	0.00	0.00	00	00	00

➤ Résultats de simulation à un moment quelconque :

Tableau II.04

Volume de combustible :

$D_s = 11.03 \text{ (m}^3\text{/h)}$;

$R_{gaz} = 15.32 \%$.

Quantité d'air sec :

$L_a = 4828.99 \text{ (kg/h)}$;

$R_a = 15.15 \%$.

Quantité de fumée récup-four :

$L_f = 46.22 \text{ (kg/h)}$;

$R_f = 22.64$

Quantité de fumée recy-séchoir

$L_{res} = 2180.56$;

$R_{res} = 100 \%$.

Quantité d'extraction du séchoi

$L_{ext} = 4886.24\text{/h}$;

$R_{ext} = 27.92$

CH (l)	Cyc (l)	HI (h)	VI (m³/h)	QI (kcal/h)	DI (m³/h)	LI (kg/h)	RadI (%)	ResI (%)	Rext (%)
01	02	24	0.000	0.000	0.00	0.00	00	00	00
02	01	23	0.000	0.000	0.00	0.00	00	00	00
03	02	22	262.5	2998.9	0.34	240.9	06	47	00
04	02	21	184.0	3243.7	0.37	260.6	07	50	00
05	02	20	307.6	3513.2	0.40	282.3	08	54	00
06	02	19	333.7	3811.3	0.43	306.2	08	58	00
07	02	18	362.6	4142.1	0.47	332.8	09	62	00
08	02	17	394.9	4510.6	0.51	262.4	10	67	00
09	02	16	431.0	4923.3	0.56	295.6	11	73	00
10	02	15	471.7	5387.9	0.61	432.9	12	00	11
11	02	14	517.7	5913.5	0.67	475.1	13	00	11
12	02	13	570.2	6512.7	0.73	523.2	14	00	13
13	02	12	630.4	7200.9	0.81	578.5	16	00	14
14	02	11	700.2	7997.6	0.90	642.5	17	00	15
15	02	10	781.8	8929.9	1.01	717.4	19	00	17
16	02	09	878.4	10034	1.13	806.1	22	00	19
17	02	08	994.4	11359	1.28	912.5	25	00	21

Les deux courbes ci-dessous nous donnent un aperçu sur le comportement de deux grandeurs importantes pour le séchoir, à savoir le débit de gaz consommé DI ainsi que la quantité d'air chaud LI, et ce pour les besoins d'une seule chambre.

Par ailleurs, nous pouvons observer une variation progressive sans à coups de ces deux paramètres pendant toute la durée du traitement.

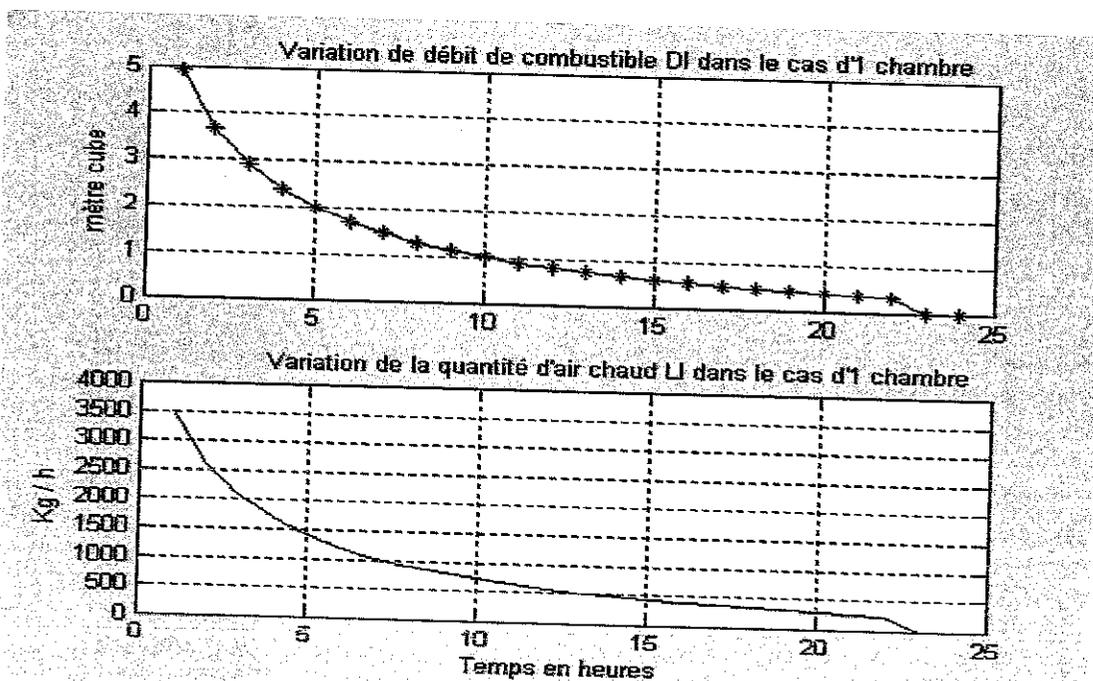


Figure. II.02-Variation de l'apport en chaleur et du combustible

II.2.4. Variation des grandeurs d'une chambre

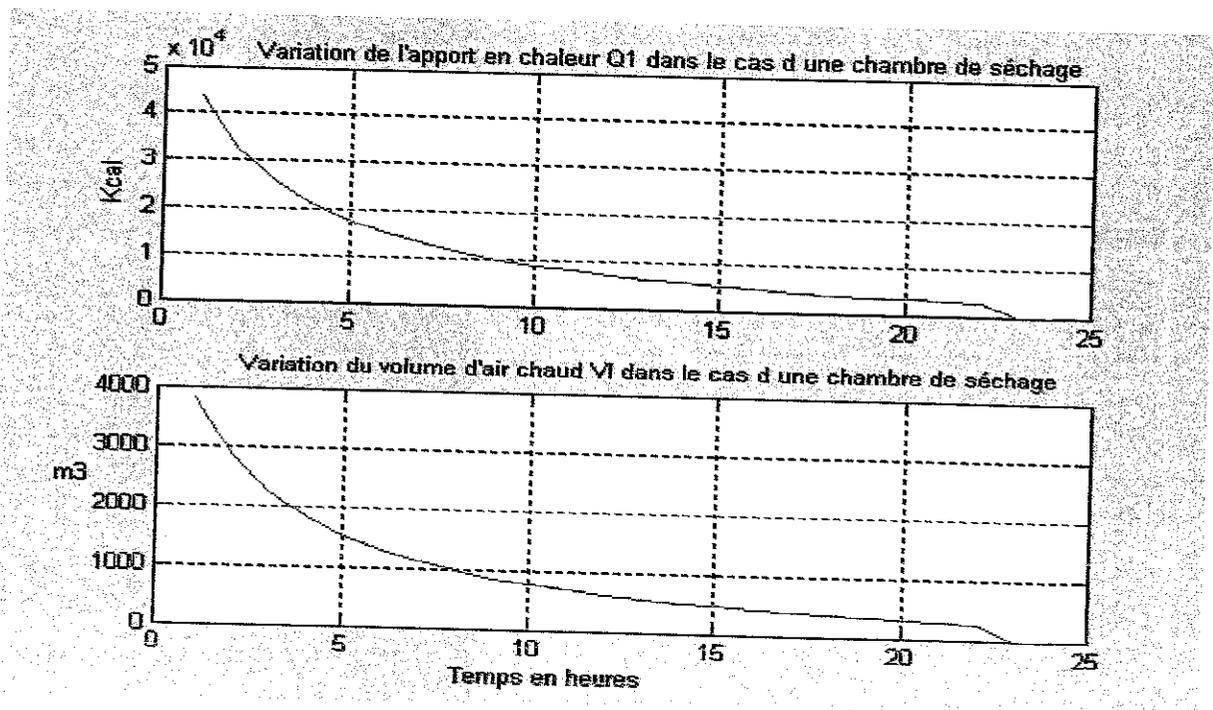
Tableau II.05

Le tableau ci-contre récapitule toutes les grandeurs principales relatives à une chambre, et ce au courant d'une opération complète de séchage de produits céramiques.

Les différentes courbes obtenues et visualisées ci-dessous, matérialisent les autres résultats de simulation et nous donnent une idée claire sur l'évolution des différents paramètres tout au long du cycle de séchage.

Nous pouvons remarquer que le même état des courbes sans cassures et l'absence de variations brusques se répètent. Cet état de fait ne peut qu'être bénéfique pour un meilleur comportement du séchoir.

HI (h)	VI (m³/h)	QI (kcal/h)	DI (m³/h)	LI (kg/h)	Radi (%)	Rresi (%)	Rextl (%)
01	3816.6	43594.5	4.92	3502.19	71	00	77
02	2850.0	32553.5	3.67	2615.20	53	00	58
03	2247.2	25668.6	2.90	2062.10	42	00	46
04	1836.1	20962.4	2.37	1684.83	34	00	38
05	1538.1	17569.1	1.98	1411.42	28	00	32
06	1312.5	14992.0	1.69	1204.39	24	00	27
07	1136.1	12976.4	1.46	1042.46	21	00	24
08	0994.4	11358.8	1.28	0912.41	18	00	21
09	0878.4	10033.9	1.13	0806.08	16	00	19
10	0781.8	8929.90	1.01	0717.39	14	00	17
11	0700.2	7997.60	0.90	0642.49	13	00	15
12	0630.4	7200.90	0.81	0578.48	12	00	14
13	0570.2	6512.70	0.73	0523.20	11	00	13
14	0517.7	5913.50	0.67	0475.07	10	00	11
15	0471.7	5387.90	0.61	0432.84	09	00	11
16	0431.0	4923.30	0.56	0395.52	08	73	00
17	0394.9	4510.60	0.51	0362.36	07	67	00
18	0362.2	4142.10	0.47	0332.76	07	62	00
19	0333.7	3811.30	0.43	0306.18	06	58	00
20	0307.6	3513.20	0.40	0282.24	06	54	00
21	0284.0	3243.70	0.37	0260.58	05	50	00
22	0262.5	2998.90	0.34	0240.92	05	47	00
23	0.0000	0.00000	0.00	0.00000	00	00	00
24	0.000	0.00000	0.00	0.00000	00	00	00



FigureII.03. Profils de l'apport de chaleur et du volume d'air chaud.

Les deux figures suivantes nous donnent une image très précise sur la variation du taux d'ouverture des vannes des différents registres. Il faut dire aussi que ces trois paramètres auront par la suite un rôle primordial dans notre travail, car se sont en réalité les variables de commande de l'équipement étudié.

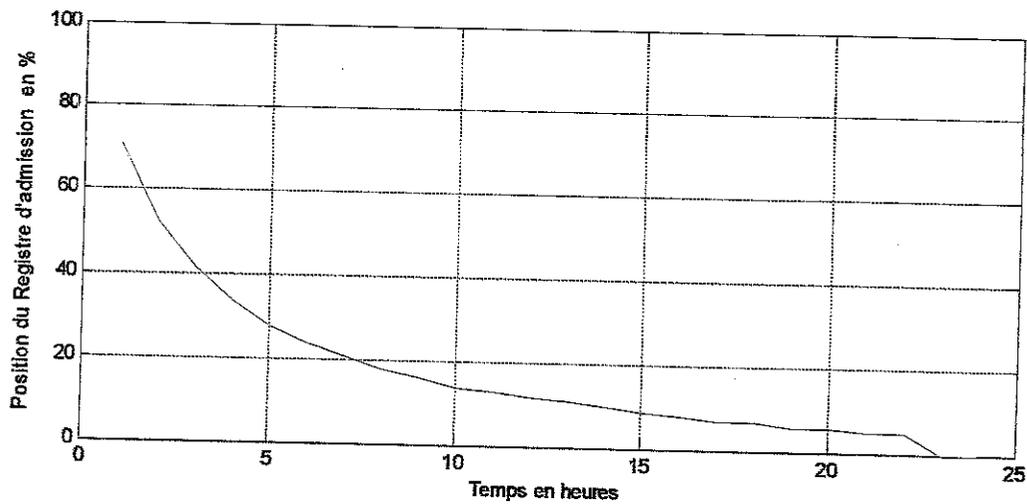


Figure.II.04. Différentes positions occupées par le registre d'admission.

Les quantités importantes de fumée en quittant le séchoir peuvent être utilisées pour un apport très conséquent en chaleur qui peut évidemment améliorer l'optimisation de l'installation.

Ceci est valable également pour les grandes quantités récupérées à partir du four, un autre équipement destiné celui ci pour l'opération de cuisson des produits céramiques.

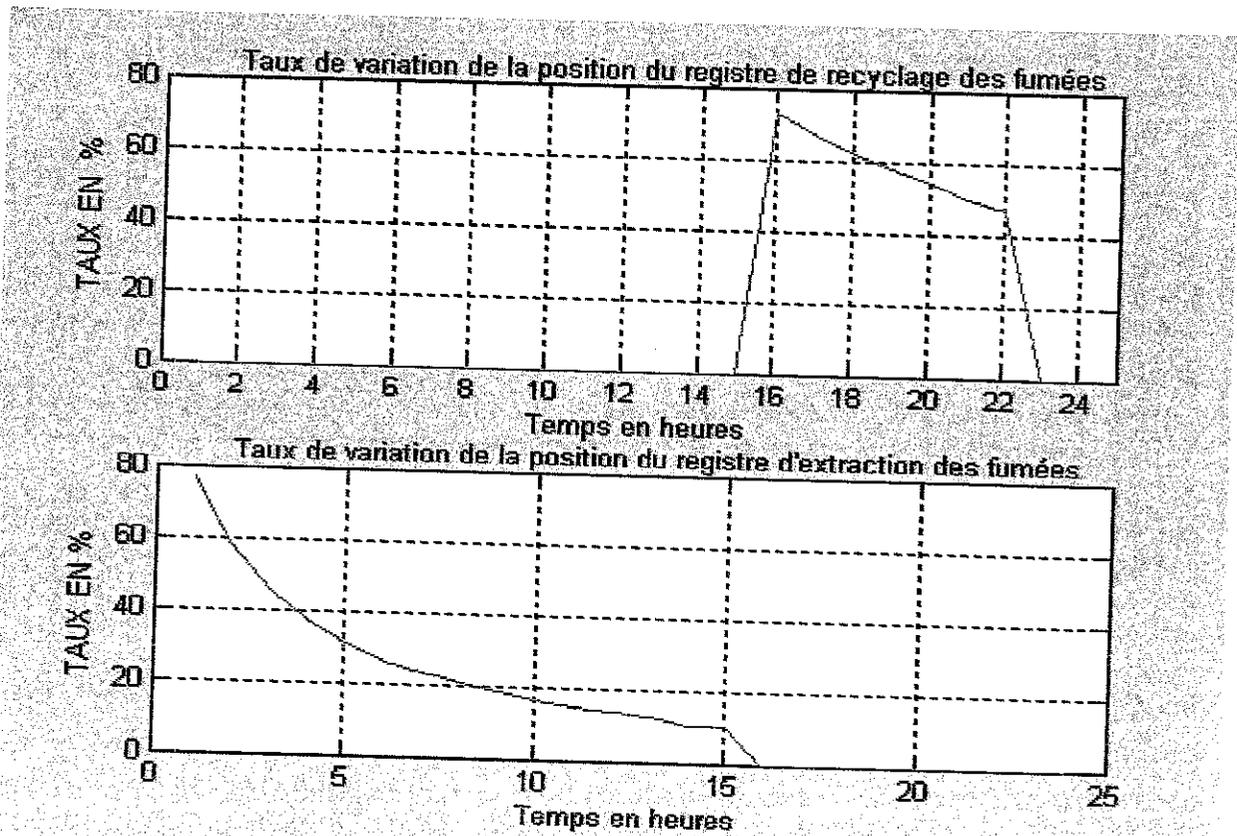


Figure.II.05. Profils des positions occupées par les registres de recyclage et d'extraction.

II.3. validation de l'approche développée [Mok, Mes.97]

Dans cette partie de ce chapitre nous allons procéder à une comparaison du modèle de connaissance obtenu par une modélisation-simulation avec le modèle expérimental (de conduite : constructeur) sous l'environnement du logiciel Matlab.

Donc, nous allons alors proposer un modèle statistique dont on cherchera à estimer les paramètres à partir de l'échantillon des mesures [Gou, Bou.91].

L'identification constitue une phase importante dans la définition du modèle, c'est par elle que le choix de la classe de modèle à adopter puis les valeurs des paramètres qui le caractérisent vont se préciser. Le plus souvent, l'identification s'effectue en optimisant un critère de qualité qui caractérise l'écart entre le comportement du processus (repéré dans notre cas par un ensemble de mesures : courbes du constructeur), et celui de son modèle (étudié par simulation) pour un ensemble de sollicitations données.

Le problème d'identification est résolu généralement avec les étapes suivantes [Bor, 91]:

- Estimation structurelle consistant à déterminer les paramètres de structure ;
- Estimation paramétrique en vue de définir les valeurs numériques des coefficients de la structure adoptée et le choix d'un critère que l'algorithme d'identification devra rendre aussi minimale que possible permettant ainsi d'estimer quantitativement la confiance à attribuer à ces valeurs.
- Validation terminale du modèle obtenu qui n'est valable, en toute rigueur, que pour l'expérience utilisée ; il faudra donc tester s'il est adéquat avec l'utilisation que l'on en fera.

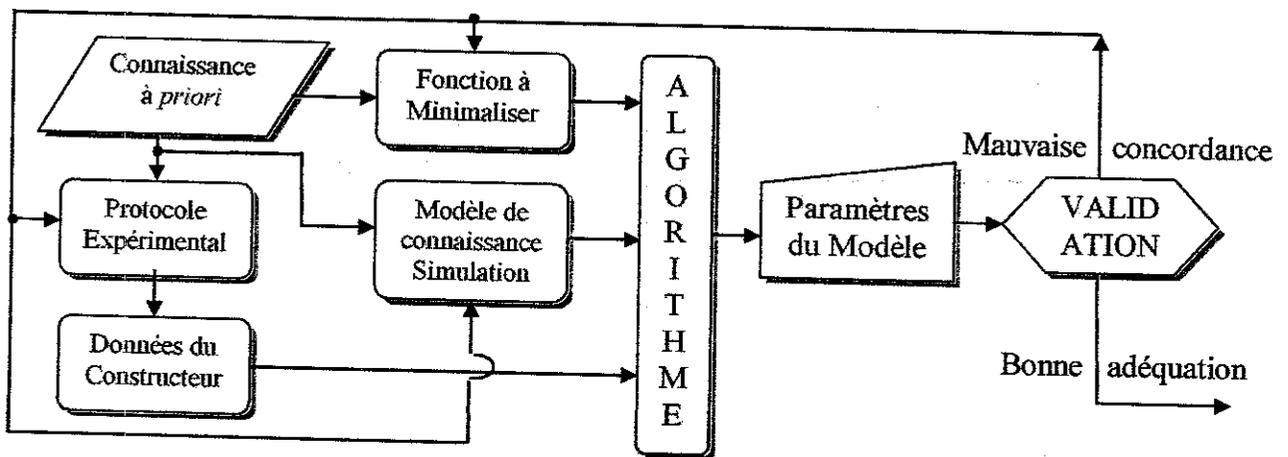


Figure.II.06. Marche à suivre pour une validation d'un modèle.

L'identification est une procédure interactive où le choix initial doit être remis en question lors d'un échec de la validation du modèle. Dans de nombreux cas, les méthodes d'identification exigent la résolution d'un système linéaire dont les coefficients dépendent des données de telle sorte à pouvoir accorder la plus grande confiance possible dans la solution de ce système, celle-ci doit être robuste c'est à dire peu sensible à une variation des données du problème. La robustesse peut être quantifiée grâce à la notion de conditionnement d'une matrice [Cia, 82].

Nous pouvons supposé en effet que les mesures enregistrées à chaque expérimentation ne sont pas entachées de bruits. D'ores et déjà, on peut distinguer deux types d'erreurs qui interviennent dans la résolution de ce problème. D'abord les erreurs de modélisation (adéquation du modèle proposé aux données) puis les erreurs numériques dues à la méthode de résolution.

Toutes ces contraintes ne peuvent que limiter la validité du modèle obtenu, considéré davantage comme un estimateur du comportement du processus que comme un simulateur exact. Aussi paraît-il nécessaire d'évaluer le degré de validité d'un modèle en le confrontant à la réalité

conformément aux différents procédés d'identification et en appliquant aux résultats obtenus un test généralement celui d'un critère quadratique à minimaliser.

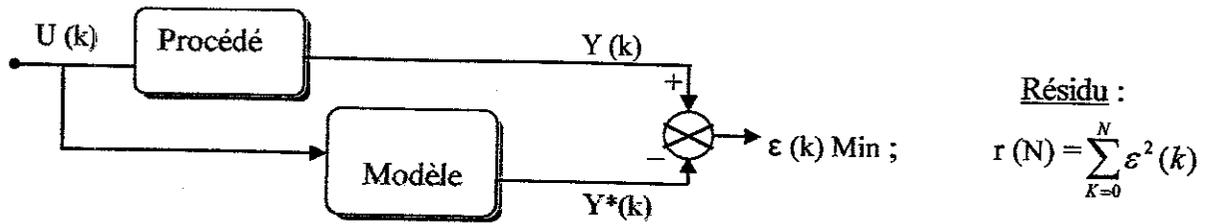


Figure.II.07. Exemple d'un schéma d'identification.

Dans le cas du modèle de conduite (expérimental) tel que celui que nous possédons, il nous semble qu'il constitue une représentation satisfaisante du comportement réel de l'installation. On s'intéresse alors plus à mesurer l'intervalle de confiance sur la réponse.

Dans le cas du modèle de connaissance obtenu par modélisation-simulation, les coefficients ont une signification physique, et dans ce cas la détermination d'un intervalle de confiance pour chacun des paramètres estimés est intéressante.

Dans certains cas il est intéressant pour valider une loi de tester *les hypothèses* pour savoir si nous devons rejeter ou non le modèle proposé. Les statisticiens ont établi de nombreux tests tels que : Kolmogorov-Smirnov, χ^2 de Pearson etc. L'intérêt de χ^2 par exemple, est de savoir si une distribution de fréquences déduite d'un nombre limité d'observations peut être valablement considérée comme le reflet fidèle d'une distribution théorique que nous pressentons. Donc, ce test montre le degré de discordance (ou de concordance) entre une distribution observée (B) et une distribution idéale (A) d'où (B) la première pourrait être extraite quelle que soit la forme de la distribution à savoir : $\chi^2 = \sum \frac{(Y_{est} - Y_i)^2}{Y_i}$;

Pour estimer la validité d'ensemble d'un modèle et son adéquation, on procède à un test de signification en procédant communément à un calcul des différents paramètres suivants pour l'ensemble de toutes les courbes :

- ♦ Coefficient de corrélation, exprimant la force de liaison linéaire et dont le carré indique quelle proportion de la réponse Y est expliquée par le modèle en étant proche de la valeur optimale de 1.
- ♦ Variance, donnant la dispersion d'une grandeur autour de sa valeur moyenne et dont la valeur est d'autant meilleure qu'elle soit proche de « 0 ».
- ♦ Norme des résidus, dans $Y = X \cdot A + E$, où A, représentant les coefficients, est l'inconnu dont on cherche l'estimation \hat{A} , telle que la somme des écarts des résidus soit minimale. Donc, le principe consisterait à annuler la dérivée de $(E^t E)$ par rapport à (A)
- ♦ Test de χ^2 . (voir ci-dessus).

Pour tenter de justifier ces résultats, nous allons passer en revue les différentes courbes obtenues, ensuite nous procéderons à un commentaire de ces dernières.

II.3.1. Validation des résultats de simulation

II.3.1.1. Modèle expérimental du constructeur

a) Grandeur : Température, cf. Figure. II.08.

Afin de valider nos résultats de simulation nous avons commencé d'abord par les courbes du modèle expérimental du constructeur.

La courbe ci-contre représente la montée en température pendant un cycle de séchage. Nous pouvons constater la bonne coïncidence (R = 0.99520) avec la courbe du modèle proposé.

Les valeurs numériques des paramètres de validation le confirment d'une façon significative.

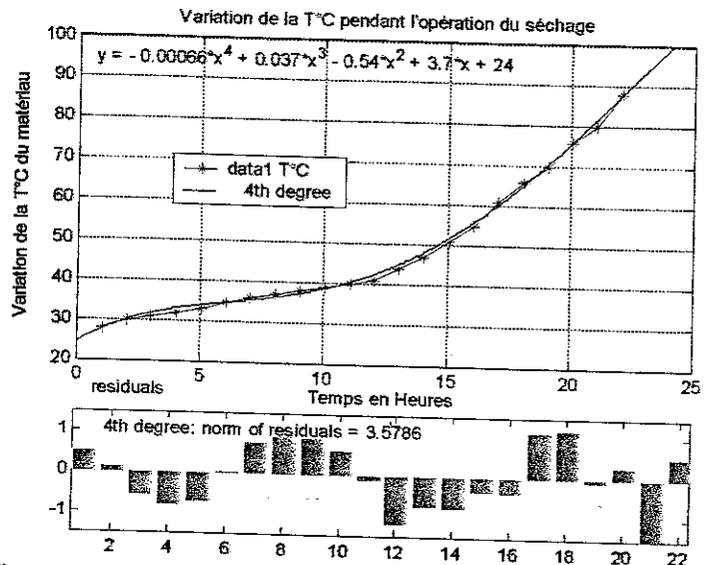


Figure. II.08. Résultats d'évaluation de la variation de T°C.

- La variance de l'erreur : Var_err = 0.60982
- Le coefficient de corrélation : R = 0.99520.

b) Grandeur : Humidité, cf. Figure. II.09

La courbe ci-contre représente la variation du deuxième paramètre de sortie à savoir l'humidité pendant tout un cycle de séchage. Nous pouvons là aussi remarquer une bonne reproduction (R=0.9970) sauf peut être au démarrage, où on constate un léger pourcentage de surplus sur l'humidité globale.

Là également, les paramètres de test donnent de très bons résultats de signification.

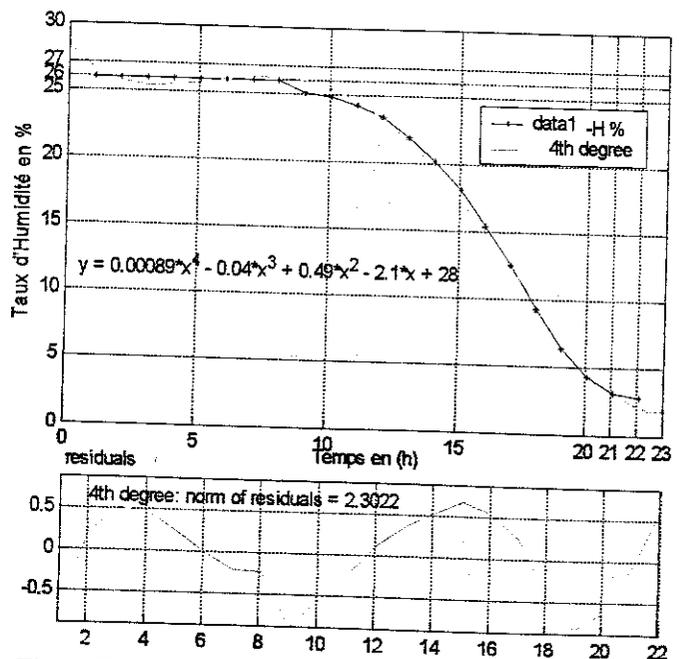


Figure. II.09. Résultats d'évaluation de la variation de H %.

- la variance de l'erreur : Var_err = 0.2524 ;
- le coefficient de corrélation : R = 0.9970.

II.3.1.2. Modèle de connaissance (modélisation-simulation)

a) Grandeur : Température,

La courbe ci-contre visualise le résultat de simulation du modèle de connaissance relatif à l'une des principales grandeurs de sortie à savoir la montée en température pendant un cycle de séchage complet. On voit encore la bonne description faite avec le modèle proposé. Ceci est quantifié par les valeurs prises par les paramètres de signification tels que la variance et le coefficient de corrélation cf. **Figure.II.10.**

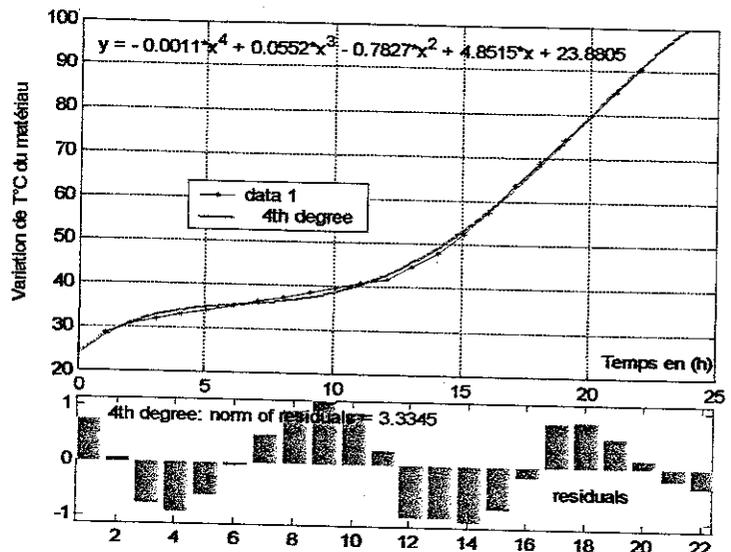


Figure.II.10. Résultats d'évaluation de la variation de T°C.
la variance de l'erreur : $Var_err = 0.52947$;
le coefficient de corrélation : $R = 0.9993$.

b) Grandeur : Humidité,

Cette courbe ci-contre montre aussi, comme celle d'ailleurs du modèle expérimental, un résultat de simulation du modèle de connaissance relatif cette fois-ci à l'autre variable de sortie à savoir le taux d'humidité au courant d'un cycle complet.

On peut encore voir une superposition sur le modèle candidat. Ici, les valeurs prises par les paramètres de signification sont de nettement meilleurs que ceux du modèle expérimental, voire la norme des résidus et le coefficient de corrélation cf. **Figure.II.11.**

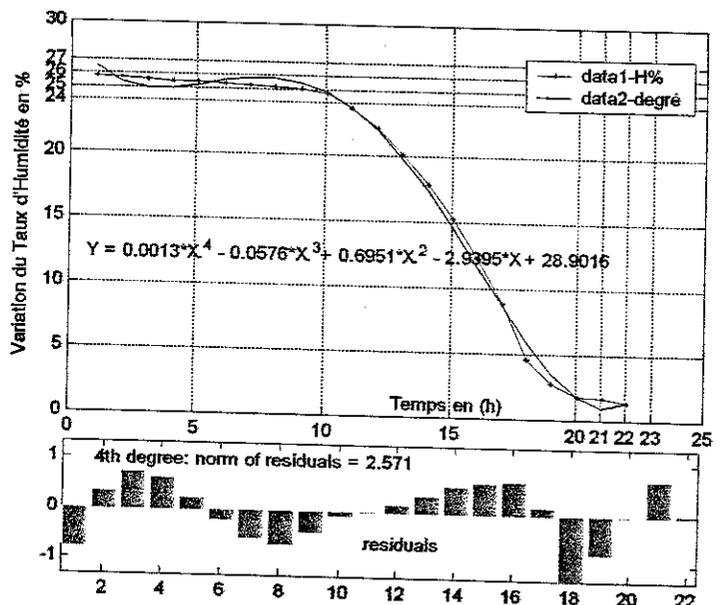


Figure. II.11. Résultats d'évaluation de la variation de H %.
la variance de l'erreur : $Var_err = 0.2324$;
le coefficient de corrélation : $R = 0.9983$.

Les figures qui vont suivre vont nous donner une idée globale sur la validité des deux principales variables à savoir la température et le taux d'humidité du produit céramique à la sortie de l'installation. Il sera question d'une comparaison des courbes et du modèle de connaissance et du modèle expérimental, et ce en se basant sur les résultats commentés ci dessus.

II.4. Comparaison des courbes du modèle expérimental et simulé

II.4.1. Variation de la température, cf. Figure. II.12.

Les figures ci-dessus permettent de comparer la sortie du modèle de connaissance (data1) à celle du processus réel exprimé, celui ci par la courbe expérimentale (data2). On observe la bonne concordance des résultats avec les données expérimentales et que l'écart maximum entre la sortie du modèle et celle du processus demeure dans le cas le plus défavorable inférieure pour la T°C à 3.5% et pour le taux d'humidité à 6%. Par conséquent, le calage de ces courbes montre le degré de précision acceptable de notre modèle élaboré et présenté au chapitre I.

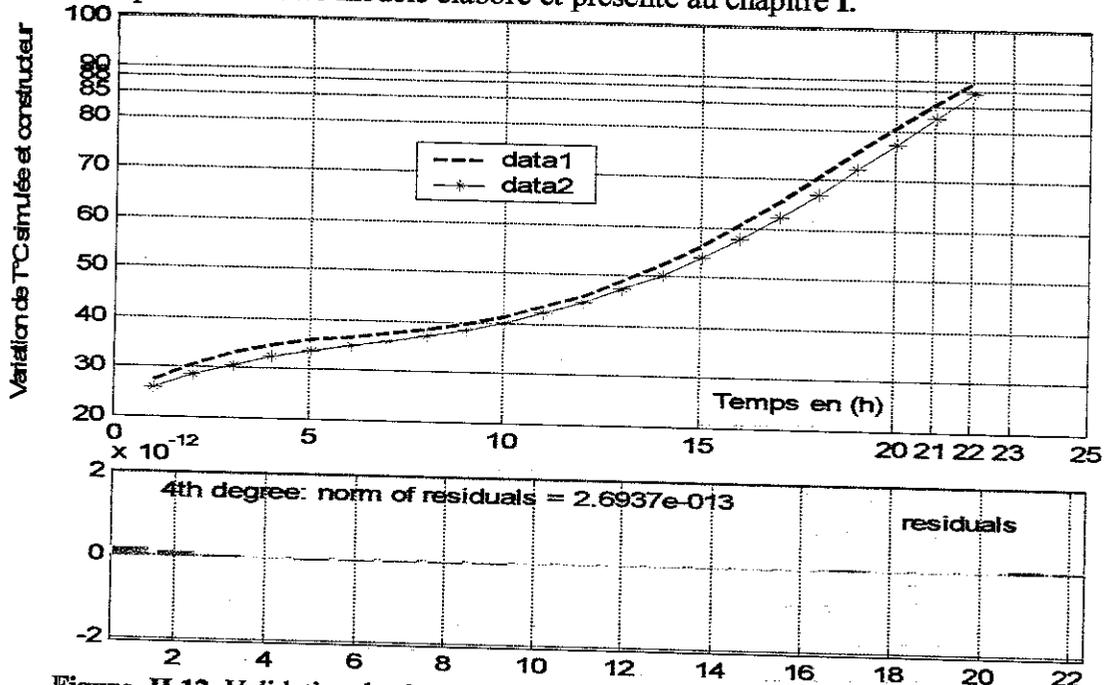


Figure. II.12. Validation des 2 courbes de T°C (expérimental (data2), connaissance (data1))

Variance de l'erreur : $Var_err = 0.59443$;

Coefficient de corrélation : $R = (corrcoef(ytc, ytc)) = 0.9996$.

II.4.2. Variation du taux d'humidité

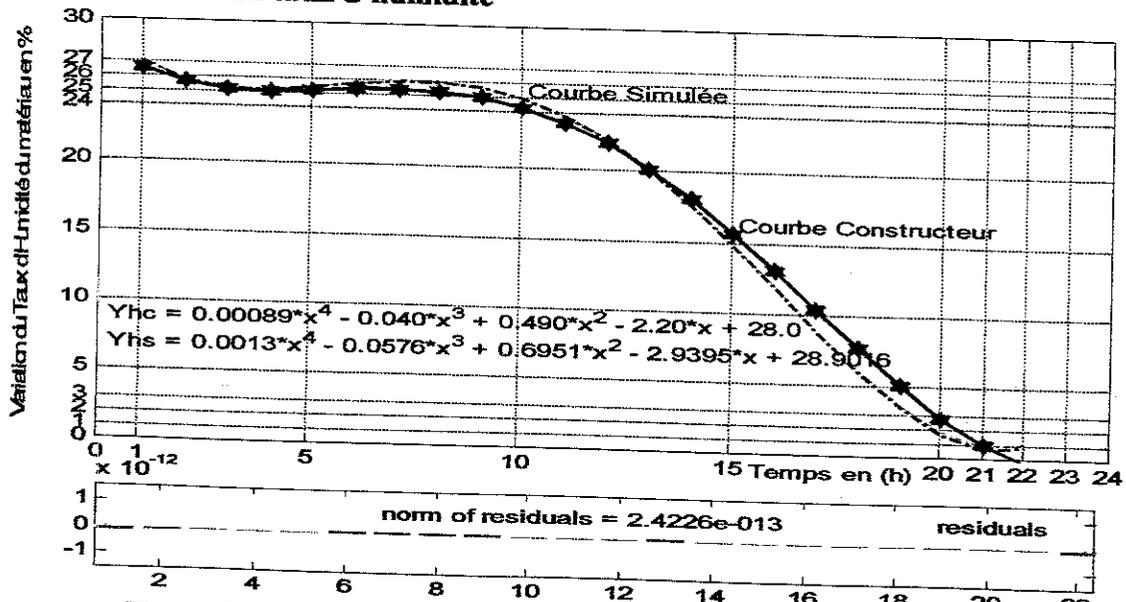


Figure. II.13. Validation des 2 courbes de H % (expérimental, connaissance).

1°) Variance de l'erreur : $Var_err = 0.6595$; 2°) Coefficient de corrélation $R = 0.9973$;

Test de $\chi^2_{0.95}$ a donné : 1.725 pour la T°C et 0.982 pour H %, donc inférieur à <32.7 (v.tabulée).

II.5. Conclusion

Nous avons passé en revue tout au long de ce chapitre important les différents aspects susceptibles de représenter le mieux le processus. Nous avons procédé au traitement des résultats de simulation de la description faite déjà au niveau du chapitre I. Nous avons aussi fourni à titre d'illustration les différentes figures produites par l'algorithme de simulation et visualisant la progression des grandeurs principales de l'installation.

On peut noter que la mise en température obtenue par simulation est toute proche de celle fournie par le constructeur. On a noté aussi un léger dépassement par rapport au modèle du constructeur, de peu de conséquence ici, qui peut s'expliquer probablement par le fait qu'il y est des bruits dans la courbe expérimentale et non reproduit par l'opération de simulation du modèle de connaissance.

Il est à souligner que le calcul du processus de séchage, à partir du produit lui-même, est très difficile. Il est toujours conseillé de comparer les calculs de ce type avec les résultats exacts, fournis par les essais de séchage sur l'installation réelle.

Dans le même contexte, nous savons également que les échanges de chaleur ne sont pas instantanés dans les installations thermiques et que la température mettra donc du temps à s'homogénéiser et la sonde thermique concernée ne donnera une information fiable que lorsque cette homogénéisation aura eu lieu.

Ces aspects n'ont pas été pris en compte dans la modélisation et il ne le seront pas non plus dans les chapitres suivants, car ceci aurait rendu le modèle beaucoup *plus complexe* et mis en difficulté l'atteinte de nos objectifs à savoir l'élaboration d'une stratégie de commande sur la base d'un modèle qui peut être *moins précis*, mais *plus simple* à exploiter.

Globalement, nous pouvons affirmer que la comparaison des différentes courbes qu'il s'agit de celle de la température ou de l'humidité, donne un aperçu satisfaisant quant à la représentativité du procédé par le modèle avancé au chapitre I. Ces résultats seront une garantie pour la réalisation au mieux de notre objectif à savoir l'élaboration d'une stratégie de conduite qui puisse s'accommoder au couplage et aux variations des grandeurs principales i.e. T°C et H%.

Chapitre III

La Commande Classique et ses Limites, Etude de l'Existant

III.1 Introduction

La complexité croissante des systèmes industriels automatisés impose une définition précise des spécifications fonctionnelles qui en régissent le comportement et ce, indépendamment de la matérialisation technologique retenue : électrique, mécanique, pneumatique, câblée ou programmée.

La conception et l'implantation d'un dispositif de mesure ou de contrôle en milieu industriel génère de nombreuses contraintes (coût, robustesse, fiabilité, rapidité et simplicité d'utilisation...). Elle ne peut se faire sans une forte interaction avec le partenaire industriel bien entendu.

Le présent chapitre porte principalement sur l'analyse des pratiques actuelles du séchage de produits céramiques. L'une des préoccupations majeures reste la diminution de la consommation énergétique tout en améliorant la qualité du produit. Il est reconnu que l'implantation de systèmes de contrôle-commande avancés constitue un bon moyen de diminuer la consommation énergétique tout en améliorant la qualité du produit.

L'objectif général de cette partie est donc de présenter une synthèse des principales tendances en matière d'implantation des systèmes de contrôle-commande et d'identifier les facteurs limitant celle-ci. Ceci servira de base pour initier ou orienter des projets dans le domaine de la commande des procédés de séchage des produits de la céramique lourde en collaboration avec l'industrie.

On constate que malgré les récents développements technologiques, les programmes de séchage demeurent la responsabilité des opérateurs et le bon fonctionnement du procédé dépend de l'habileté de ces derniers. On observe, comme nous l'avons déjà mentionné dans la partie Recherche bibliographique, que le développement entourant les nouveaux instruments de mesure et les modèles afférents ne permettent pas d'appuyer l'élaboration de contrôleurs de séchoirs. On constate que l'innovation dans le domaine des contrôleurs ne suit pas le rythme observé dans d'autres secteurs de pointe. En fait, la mesure de la teneur en humidité demeure un problème technique non résolu.

Cette constatation explique en grande partie la difficulté d'adopter de nouvelles technologies de séchage malgré que la qualité du produit céramique fini soit identifiée comme la grandeur principale de commande.

Ainsi, le développement d'un système d'exploration de la pratique complète du séchage serait, d'après nous, une des principales applications établies comme valeurs cibles à étudier. On entendrait ici collecter toutes les données générées par l'instrumentation de mesure à l'échelle d'une unité de production de produits céramiques. Ce système permettrait la définition des ratios de productivité et qualité qui donnerait une mesure exacte de la valeur du gain financier apporté par les améliorations au procédé de séchage.

Par conséquent, dans cette partie, nous tenterons de répondre à ces questions qui se posent à premier abord telles que :

- Quels sont les principaux systèmes de contrôle-commande implantés ?
- Pourquoi on privilégie un type de contrôle-commande par rapport à un autre ?

III.2 Connaissance actuelle des structures de commande des séchoirs (cf. [Alp, 04], [Leo.88], [Cer, 04]):

L'objectif de la commande des séchoirs vise à faire évoluer la teneur en humidité de la charge selon un profil qui minimise le temps de séchage, diminue l'impact du séchage sur le déclassement et minimise la consommation énergétique. Comme aucun système de contrôle ne peut agir directement sur la teneur en humidité, la conduite des séchoirs se fait d'après les conditions de l'air. Le lien entre l'évolution de la teneur en humidité et les conditions de l'air se fait par l'opérateur lors de la définition des programmes de séchage.

Le problème de la commande des séchoirs est de trouver une évolution optimale de la teneur en humidité pour atteindre une teneur en humidité finale tout en minimisant un critère de performance basé sur la qualité (rebut), le temps et l'énergie (cf. Fig. III.01).

La détermination de cette évolution optimale doit tenir compte de la capacité du séchoir, de sa dynamique, de la réponse du chargement, de la teneur en humidité initiale de charge, de la dégradation des conditions de l'air lors de son passage à travers la charge et finalement de la variabilité des propriétés physiques de chaque pièce de la charge.

Cette approche prend la forme suivante où le séchoir et sa charge, appelés système de séchage, réagissent à la commande d'un contrôleur afin de forcer l'évolution de la teneur en humidité selon une trajectoire optimale prédéfinie

Par cette approche la teneur en humidité, TH %, devient la variable de contrôle. (cf. fig III.02).

Lors de la conception d'un tel système de contrôle, trois éléments doivent être définis.

Le premier consiste à trouver l'évolution optimale de la TH comme décrite ci-dessus. Le second est la conception proprement dite du contrôleur.

Finalement, pour que ce système fonctionne, il faut trouver un moyen de mesurer la variable TH de chaque point du séchoir comme sortie du système.

Dans la pratique du séchage, tous ces aspects sont difficiles, voire impossibles à réaliser. Jusqu'ici, aucun moyen n'a été développé pour définir a priori une évolution optimale de la TH d'une charge considérant en même temps la qualité (rebut), le temps et l'énergie. Seulement quelques données expérimentales sont disponibles pour fixer une telle courbe. Cela est causé par la difficulté d'identifier la charge à sécher et par la variabilité des caractéristiques du matériau.

Aussi, pour le système de contrôle illustré dans la figure III.02, le contrôleur a besoin d'une comparaison des TH de consigne et de sortie. Toutefois, il est difficile de mesurer la TH comme signal de sortie. En effet, la TH est variable d'une pièce à l'autre et à l'intérieur d'une même pièce, et de plus, cette mesure n'est réalisable que pour une plage limitée de valeurs de TH. Ainsi, on arrive devant l'impossibilité de comparer une valeur mesurée à la valeur de consigne ce qui, dans notre cas, limite la possibilité d'utiliser la structure de commande illustrée dans la figure III.02.

Finalement, les variables de commande directes du procédé deviennent les températures de l'air, la vitesse et sa direction. Une structure de commande est illustrée dans la figure III.03 dans

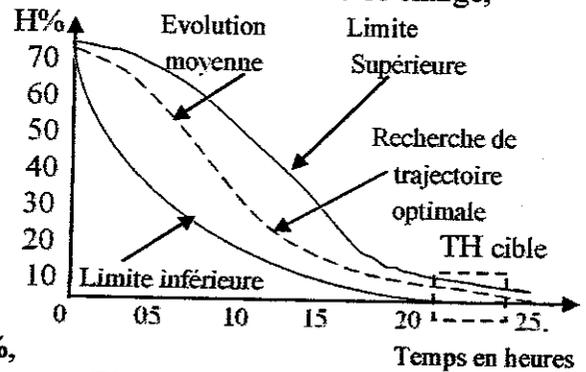


Fig. III.01. Profil optimal du taux H%

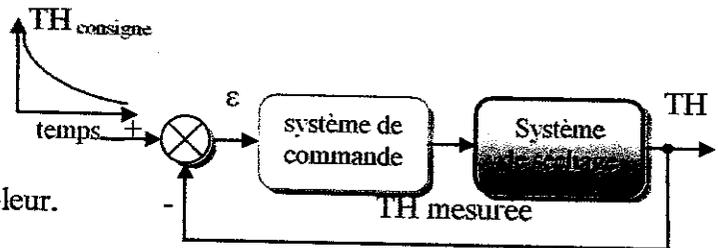


Fig III.02. Structure de commande avec Variable de contrôle TH

une forme simplifiée. Avec cette structure de commande, il est possible de mesurer la température de l'air, de la comparer avec une température de consigne et enfin agir sur le procédé pour diminuer l'erreur observée s'il y a lieu.

Ici, la sortie du système demeure la TH mais provient d'une estimation. Cette estimation peut être fondée sur le temps, ou sur une valeur échantillonnée de la TH, ou sur la mesure du DTC, ou sur une mesure de la variation de poids de la charge ou de pièces témoins, etc. Une fois estimée, cette valeur détermine le moment de la progression dans le programme de séchage. C'est ainsi que de nouvelles températures de consigne de l'air sont imposées tout au long du séchage.

De ce point de vue, la commande du procédé de séchage proprement dit, se fait par un système séquenceur. La sortie, c'est-à-dire l'évolution de la TH, n'a pas d'effet direct sur la commande sauf de faire progresser d'un segment le programme de séchage. Pour cette raison, une perturbation propre au procédé de séchage ne sera pas détectée par le système de contrôle et ne provoquera aucun changement au programme.

Par conséquent, l'utilisation dans la pratique de ce système de contrôle en boucle ouverte limite les améliorations automatiques au procédé de séchage.

Dans ces conditions, la définition et l'application d'un programme de séchage soulèvent encore des difficultés.

III.2.1 La mesure

Deux types de mesure sont introduits. Dans la boucle de régulation, la mesure de la T°C est nécessaire pour maintenir les conditions de l'air pour favoriser le séchage de la brique. Ces mesures sont la température de l'air au bulbe sec et au bulbe humide. La mesure de la température au bulbe sec se fait par des capteurs installés dans l'*écoulement* de l'air. La température au bulbe humide se fait de la même manière permettant de lire une température qui informe sur la capacité de l'air à évaporer l'eau contenue dans la brique. Ces deux mesures sont alors comparées à la valeur des températures de consigne du programme de séchage.

Pour ce qui est de la température au bulbe humide, il existe d'autres types d'instruments sur le marché. En fait, que se soit l'humidité relative, le point de rosée, l'humidité absolue ou l'humidité d'équilibre de l'argile, toutes ces mesures indiquent le même phénomène, c'est-à-dire le *contenu de vapeur* d'eau dans l'air du séchoir.

Dans le programme de séchage, les mesures sont nécessaires pour enclencher la progression de celui-ci. Par exemple, la mesure du différentiel de température de l'air entre l'entrée et la sortie de la charge permet d'estimer le taux de séchage. La mesure du poids total d'une charge en continu donne aussi l'évolution du séchage. Il est aussi possible d'évaluer l'humidité de certaines pièces témoin en leur *insérant* des sondes. En fait, une ou l'autre de ces mesures sert à évaluer l'évolution de la teneur en humidité de produit vert de manière à faire progresser les séquences du programme de séchage.

En général, il faut mentionner que la précision de la mesure est importante. Cette précision est de l'ordre du degré Celsius. On remarque souvent qu'à l'origine d'un problème de séchage est lié à une mauvaise lecture d'un capteur de température. Les raisons sont multiples mais ne sont pas toutes liées aux capteurs eux-mêmes. La mauvaise distribution de l'air et les points froids dans un séchoir ne sont pas toujours considérés par les instruments vu que, leur localisation est limitée dans les séchoirs.

Pour visualiser ce concept, on fera référence à deux types de commande soit :
la régulation des températures de l'air de séchage et l'implantation des programmes de séchage proprement dit.

la structure dans la figure.III.03 lie les différents éléments constituant la structure du système de contrôle du séchoir. La chaîne principale contient le régulateur PID, soit les différents systèmes commandés tels que le chauffage, l'air et la charge.

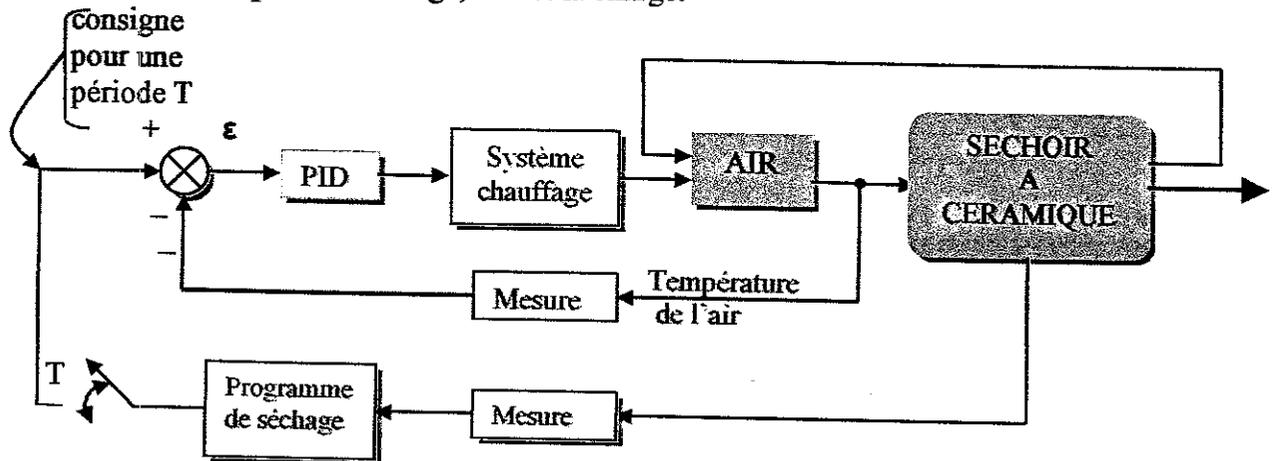


Figure.III.03.Schéma-bloc de structure d'un système de commande de séchage.

III.2.2 Objets de commande

III.2.2.1 Les conditions de l'air

L'air circule en boucle dans le séchoir. En premier, il traverse un générateur où il est mélangé aux différentes fumées provenant soit du recyclage du séchoir soit de la récupération du four. Il est brassé par des ventilateurs de brassage, ensuite il passe à travers la charge ayant une température et une humidité imposées par le programme de séchage, et enfin il peut être évacué vers l'extérieur.

Nous décrivons dans ce qui suit les principaux systèmes qui permettent d'imposer les conditions de l'air dans le séchoir.

III.2.2.2 Système de chauffage

Le premier système commandé, la source de chauffage, sert à réguler la température de l'air, tandis que les systèmes d'évents et d'humidification maintiennent l'humidité de l'air aux valeurs de consigne établies.

Sa fonction est donc multiple. Il doit compenser les pertes d'énergie dues à l'évaporation de l'eau, l'augmentation de la température de l'argile, le réchauffement de l'amenée d'air frais nécessaire pour ajuster le taux d'humidité dans le séchoir et finalement les pertes d'énergie par les murs et portes du séchoir. La capacité du système de chauffage à combler ces pertes d'énergie dépend de sa puissance, et de la vitesse de déplacement de l'air.

Le choix de la source de chaleur est, dans la plupart des cas, un compromis entre le coût de l'énergie et le coût des installations. Puisqu'un séchoir requiert deux fois plus de puissance en début de séchage, l'infrastructure de certaines installations est très onéreuse, défavorisant ainsi leur implantation.

La facilité avec laquelle il est possible de commander et de contrôler un système plutôt qu'un autre devrait influencer le choix de la source de chauffage, mais cela ne semble pas être le cas. Le type de ventilation varie aussi d'une installation à l'autre. Les systèmes à vitesse variable deviennent plus courants dans les nouvelles installations.

III.2.2.3 Régulation des températures de l'air

Le support informatique (cf.fig.III.03) utilisé est du type PC pour établir et maintenir la consigne relative aux conditions de l'air dans les séchoirs. Encore une fois, dans ce contexte-ci, le choix technologique s'avère un compromis entre la fiabilité et le coût d'implantation.

Le type de régulateurs utilisés dans ces cas là sont du type classique à savoir P, TOR, PID. Les mesures sont prises soit à l'entrée, soit à la sortie, soit une moyenne des deux, et le nombre de zones régulées peut aller jusqu'à 24. Ceci est justifié par le fait que le programme de séchage doit tenir compte du lieu de mesure de la température puisque la température de l'air est dans la plupart du temps supérieure à la température à l'entrée de la charge. Aussi, la localisation de cette mesure modifie l'ajustement des paramètres du contrôleur. En fait, l'inertie du système n'est pas la même lorsque la mesure est prise à l'entrée ou à la sortie de la charge. Les oscillations sont amorties à la sortie de la charge, Dans ce cas, l'ajustement des paramètres PID du régulateur en tient compte. Aussi, le comportement dynamique du système change tout au long du processus de séchage, l'ajustement des paramètres devient un compromis. De plus, la régulation de l'humidité perturbe la température de l'air et *vice versa*. Dans ces conditions, on observe régulièrement la température ou l'humidité de l'air oscillant autour du point de consigne plutôt que de présenter une valeur stable. Souvent, on procède à un filtrage de cette mesure, c'est pourquoi elle apparaît régulière sur les écrans. Finalement, on doit ajouter que l'ajustement des paramètres du régulateur change aussi selon la source de chauffage.

La figure.III.4 représente une partie de la structure générale soit les éléments nécessaires pour réguler les températures au bulbe sec et au bulbe humide qui sont les conditions de l'air favorisant le séchage. Cette structure est un schéma classique de la régulation. Elle permet de maintenir de façon automatique les températures de l'air à l'entrée.

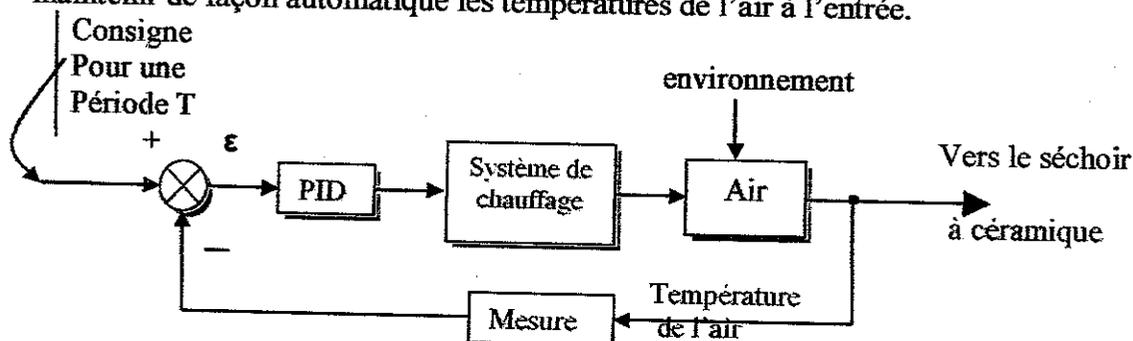


Fig.III.04.Schéma-bloc détaillé du système de séchage.

Les éléments constituant le schéma de structure de cette boucle sont les instruments de mesure, les systèmes de commandés (à savoir le chauffage et la ventilation), le régulateur PID et, finalement, un comparateur qui permet d'évaluer la différence entre la température effective dans le séchoir et la température recherchée provenant du programme de séchage.

Cette boucle permet au système de s'adapter aux fluctuations de l'environnement du séchoir.

III.2.2.4. Implantation des programmes de séchage

Les moyens utilisés en vue d'implanter les programmes de séchage constituent une fonction importante des contrôleurs de séchoirs. C'est la responsabilité de l'opérateur de définir l'ensemble des étapes indiquant les températures de l'air qui provoqueront le séchage. Cet ensemble d'étape constituera le programme de séchage. Par la suite, ces étapes seront automatiquement implantées dans le contrôleur. Donc, il s'agit de mesures sur l'air, la charge ou le temps. La mesure sur l'air est soit la température, l'humidité ou la différence de température entre l'entrée et la sortie de la charge (DTC). La mesure sur la charge donne soit le poids, soit l'humidité de pièces de la charge. La mesure d'un intervalle de temps est aussi utilisée.

Deux approches servent à implanter les programmes de séchage :

- ▶ Certaines mesures telles que la DTC (thermocouples, thermistors, etc.), les sondes d'humidité de la charge (électroniques, à résistance, bulbe humide etc.), le poids (pièces échantillons, balance) ou le temps offrent la possibilité d'agir comme élément déclencheur d'une nouvelle étape du programme de séchage.
- ▶ L'ajustement progressif de la température ou l'humidité de l'air du séchoir pour favoriser un taux de séchage prédéterminé. En fait, le taux de séchage est établi en corrélation avec la mesure soit de DTC (cf.III.3.5), soit de l'humidité de la charge, soit du poids. Par exemple, dans le cas de DTC, on souhaiterait maintenir une valeur de DTC constante et pour cette raison on ajustera la température ou l'humidité de l'air du séchoir en conséquence. De cette façon, on estime sécher la brique à taux constant.

Donc, un programme de séchage peut être élaboré compte tenu d'un ou de la combinaison de plusieurs moyens décrits précédemment. Les possibilités sont multiples et dépendent des instruments de mesure disponibles. Leur localisation et leur précision sont aussi importantes. On conclue qu'un programme de séchage reste sous la responsabilité des opérateurs et la bonne marche du séchoir dépend de leur habilité.

Finalement, la 2^{ème} structure de (cf.fig.III.05) joue un rôle pour lier les températures de l'air au procédé de séchage du produit proprement dit. On parle ici de moyens automatiques pour implanter les programmes de séchage.

Ainsi en mesurant certains paramètres de séchage tels que l'humidité de la charge, le poids des pièces témoins, la chute de température à travers la charge (DTC), etc., le contrôleur provoque les changements de températures inscrits dans le programme de séchage.

La caractéristique principale de cette boucle par opposition à la boucle de la figure III.04 provient du fait que son action agit par étapes successives préprogrammées (séquenceur)

plutôt qu'une action corrective à prendre en cas d'erreur observée (régulation).

De plus, ces séquences sont définies par les opérateurs des séchoirs en fonction de leur connaissance du procédé de séchage, des propriétés de manipulation de la charge, du fonctionnement des séchoirs, etc.

C'est principalement à ce niveau que les contrôleurs des séchoirs se différencient.

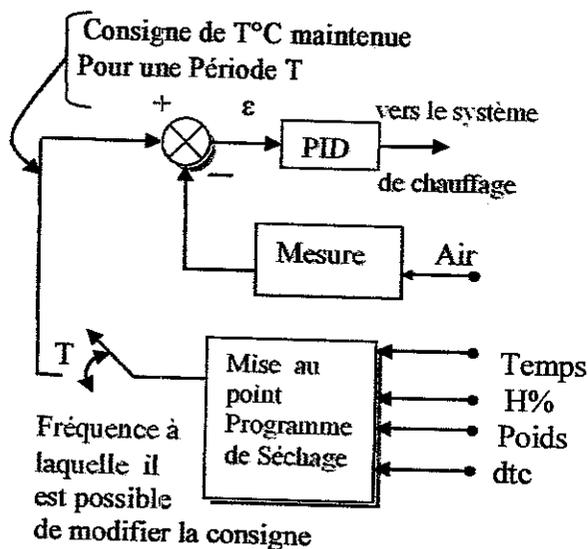


Figure.III.05.Schéma-bloc de structure du système de séchage.

III.3 Différentes configurations de conduite des séchoirs à céramique (cf. [Mar, Sla75]):

Maintenant, nous décrivons la régulation locale qui permet de maintenir les conditions de l'air imposées par le programme de séchage. Cette régulation des conditions de l'air constitue l'autre niveau de la commande.

Les changements de consigne d'un programme de séchage proviennent d'une mesure qui permet l'estimation de la teneur en humidité moyenne des pièces de la charge.

Les méthodes utilisées pour faire progresser la séquence des conditions de l'air sont une des principales distinctions entre tous les systèmes de commande actuels. Nous détaillerons le fonctionnement de quelques uns.

III.3.1 Choix des paramètres de régulation

L'analyse des questions relatives aux choix des grandeurs de contrôle et de régulation dans le domaine de la conduite des procédés de séchage des produits céramiques lourds, montre que quelque soit le procédé d'élaboration de ces matériaux, ces derniers garderont toujours une quantité d'humidité dont il va falloir s'en débarrasser au courant du processus de séchage.

Le transfert de chaleur et de masse qui accompagne le séchage par convection s'avère un processus très complexe dont la caractéristique principale est la variation du volume des produits séchés, pouvant provoquer ainsi la déformation de leur forme géométrique initiale.

L'apparition de fissures est conditionnée par l'évolution de tensions internes résultant de la non homogénéité de la distribution du gradient d'humidité dans le volume du produit vert au courant de séchage. Le produit, par conséquent, peut être déformé ou carrément *cassé*. Pour caractériser cet état on introduit un critère d'apparition de fissures K_T exprimant la différence relative de l'humidité moyenne (\bar{W}) et locale (W) en rapport avec celle, initiale W_0 ;

$$K_T = (\bar{W} - W) / W_0.$$

D'autres critères existent : la valeur du gradient superficiel d'humidité, la différence entre l'humidité moyenne et superficielle etc.

Donc, les conditions garantissant le minimum d'apparition de fissures pendant le séchage des produits céramiques lourds, consistent à ce que une des grandeurs caractérisant l'état du champ d'humidité de la charge, ne dépasse pas une certaine valeur critique. C'est à dire que l'intensité de séchage du $i^{\text{ème}}$ produit, dans n'importe quelle position par rapport aux murs des chambres, ne doit dépasser une valeur maximale admise, et définie par le critère d'apparition de fissures. Ceci est exprimé comme suit :

$Q_{mi}(i) \leq |Q_{mi}(i)_{\max}|$; où, $|Q_{mi}(i)_{\max}|$ est l'intensité maximale admise de séchage de la charge se trouvant à la $i^{\text{ème}}$ position.

Par conséquent, il découle des considérations précédentes que le choix des grandeurs de réglage portera sur l'une des caractéristiques de l'état critique du champ d'humidité du produit. Cependant, la mesure du critère d'apparitions des fissures étant impossible pendant le séchage, alors nous sommes contraints de choisir d'autres paramètres indirects pour la commande du processus, mais spécifiques à l'agent caloporteur qui sont liés intimement aux états instantanés de phase du matériau à sécher.

Il est démontré que les quantités de chaleur dépensée et d'humidité évaporée, sont déterminées complètement à une température et humidité constantes des produits à sécher à l'aide de différence de température Δt , de différence d'humidité Δx du caloporteur amené et évacué du séchoir et de son débit.

L'ensemble de ces paramètres détermine l'état des champs d'humidité au cœur de la charge et ainsi déterminer la valeur tolérée (admise) de la vitesse de séchage.

Donc, le minimum de rebut (minimum d'apparition de fissures) correspond à un régime de fonctionnement du séchoir pendant lequel les grandeurs de régulation choisies et maintenues

invariables, sont la différence d'humidité et de température à l'entrée et à la sortie de l'installation tout en stabilisant le débit du caloporteur.

A l'heure actuelle les paramètres de l'air utilisés sont : la T°C et H%, la différence de température psychrométrique etc. Souvent, la grandeur de réglage du séchoir est la T°C de sortie de l'air, car elle est très facile à mesurer et sa stabilisation peut se faire à l'aide du débit du combustible ou bien par la quantité d'air nécessaire à la combustion, ou même par la quantité de la charge à sécher. Le schéma global suivant est plutôt préconisé (cf. figure .III.06).

Dans la pratique, on procède généralement pour la commande du séchoir en agissant sur l'apport de chaleur, mais au sens de la commande automatique il serait plus rationnel de varier la vitesse d'admission de la charge en maintenant la quantité de chaleur à un niveau déterminé à l'aide d'une boucle secondaire de régulation (cf.fig.III.06)(par exemple le cas d'un séchoir à balancelles).

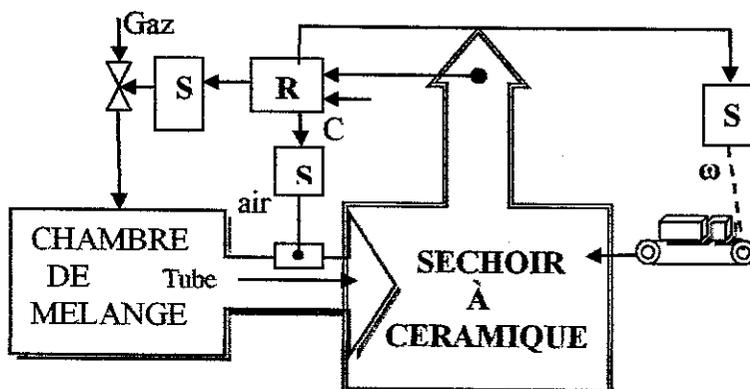


Figure.III.06.Schéma-bloc de commande d'un séchoir, mais avec un réglage de la vitesse d'amenée du produit vert.

En qualité de paramètre de sortie, on considère la température de l'air humide sortant. Mais l'utilisation de ce paramètre comme coordonnée principale et unique de régulation ne permet pas d'avoir le degré de stabilité escompté.

Alors l'introduction d'autres dispositifs de compensation censés améliorer la stabilité du système et diminuer l'influence des perturbations sur la chaîne principale de régulation s'avère par conséquent, nécessaire.

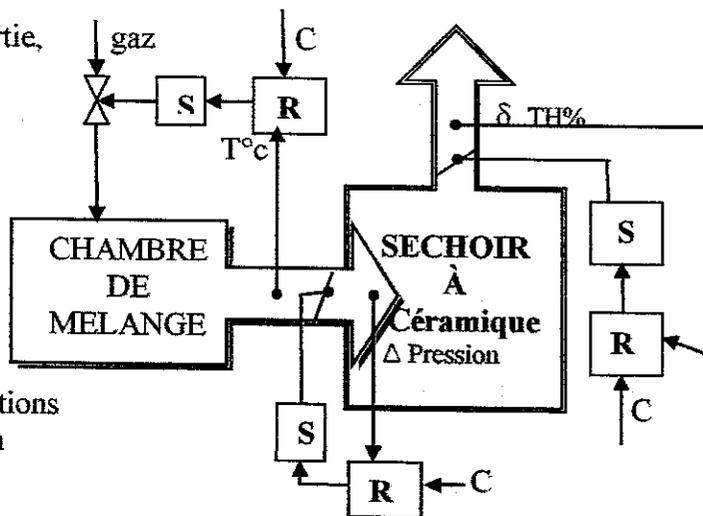


Figure.III.07.a.Commande d'un séchoir à céramique en corrélation avec l'humidité de l'air chaud et la dépression à l'entrée.

Les autres différentes approches de commande des installations de séchage de produits céramiques sont données ci-contre (cf. fig.III.07.a,b,c).

La figure (a) comporte une boucle principale qui agit sur les injecteurs de combustible ou bien le débit d'air neuf dans la chambre de mélange.

Ceci stabilisera la température à l'entrée du séchoir. Cette boucle est renforcée par d'autres boucles de compensation telles que :

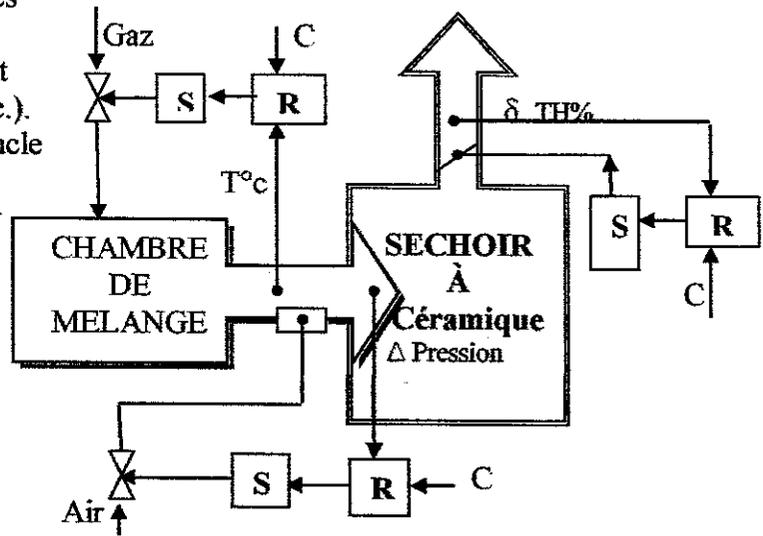


Figure.III.07.b.Schéma-bloc de commande d'un séchoir, mais avec un réglage du débit d'air du mélange.

a- Boucle secondaire de correction de l'humidité à la sortie ou la dépression à l'entrée du séchoir cf. Figure.III.07.a;

b- Boucle supplémentaire de correction du débit d'air destiné au mélange de combustion cf. Figure.III.07.b.;

c- Boucle secondaire de correction de la température par action sur la vitesse d'admission du produit vert (cas des séchoirs à balancelles) cf. Figure.III.07.c.

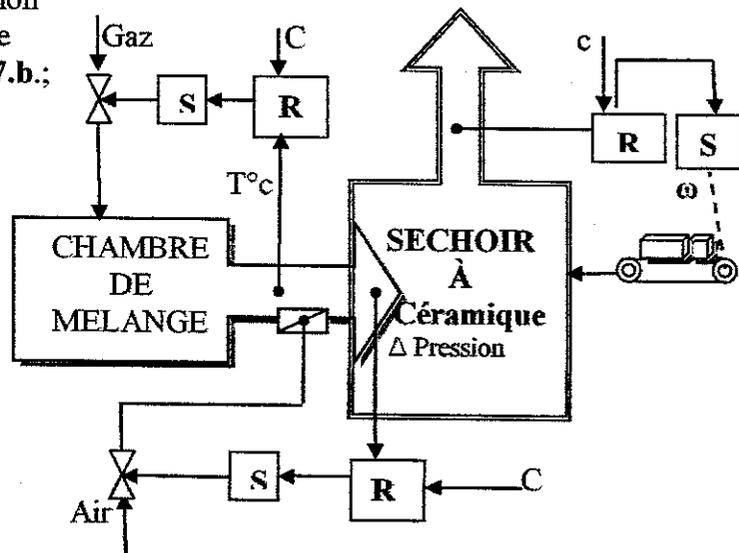


Figure.III.07.c..Schéma-bloc de commande d'un séchoir, mais avec un réglage de la vitesse d'amenée du produit vert.

L'autre procédé de contrôle est schématisé sur la figure III.08 ci-contre. Cette configuration privilégie plutôt une régulation basée sur la différence des valeurs des paramètres à l'entrée et à la sortie du séchoir et ce, en agissant avec les trois boucles suivantes :

- maintien de différence constante de T°C à l'aide de l'intensité du préchauffeur (échangeur).
- maintien d'une différence constante du taux d'humidité de l'air en l'humidifiant à la vapeur ou en faisant changer la fréquence de circulation en rapport avec ça.
- stabilisation du débit de l'air dans le séchoir, en mesurant la différence de pression à la sortie et en agissant sur le registre à l'entrée du séchoir.

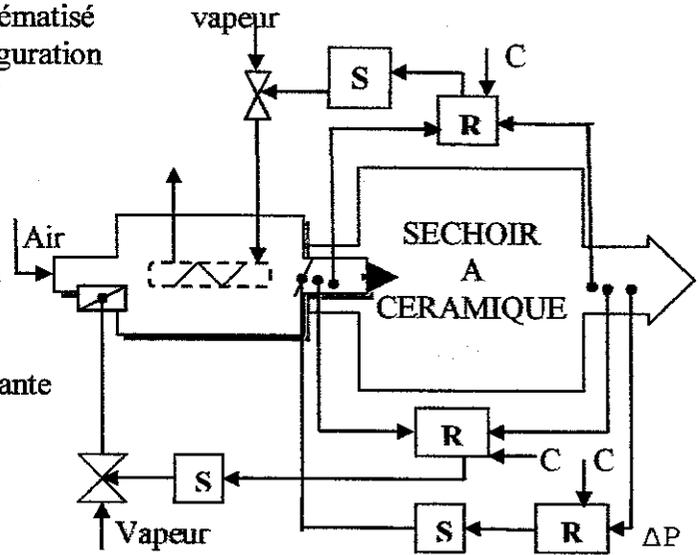


Figure III.08. Commande d'un séchoir à céramique en fonction de la diff. des paramètres entrée-sortie

Les méthodes utilisées pour faire progresser la séquence des conditions de l'air sont une des principales distinctions entre tous les systèmes de commande actuels. Nous détaillerons le fonctionnement de quelques uns.

III.3.2 Système basé sur deux PID indépendants

Cette boucle de séchage a été conçue et mise au point par la société Gauthier (France).

Le séchage doit être le plus rapide possible tout en prenant en compte les spécificités du produit à sécher. En effet, le séchage doit souvent s'effectuer selon une suite de cycles à température et humidité différentes.

Le débit d'air est contrôlé en régulant la vitesse d'un ventilateur de soufflage.

Les deux régulateurs de types « proportionnel Intégral et Dérivé » agissant de manière indépendante sur la température et et l'humidité cf. Figure.III.09.

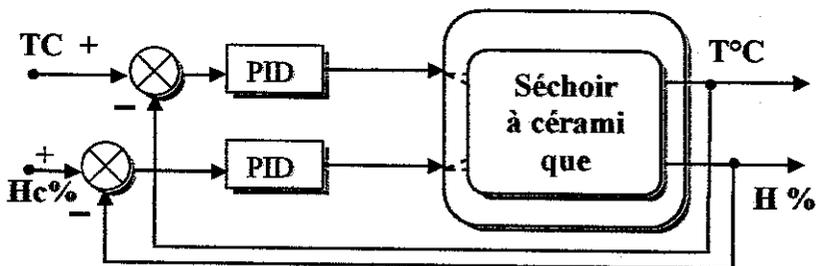


Figure.III.09. Système basé sur deux PID indépendants.

Mais nous savons d'une part, que dans les opérations de séchage, la température et l'humidité étant fortement corrélées, la réaction à la commande induite par chacun des régulateurs PID s'est révélée être souvent en opposition avec celle de l'autre. En particulier le refroidissement en cas de dépassement de la température de consigne qui s'effectue par admission d'air frais extérieur (ouverture des vantelles) introduit une perturbation sur l'autre variable commandée (humidité).

D'autre part, cette situation du processus sous entend que le découplage des grandeurs température et humidité est possible. En effet, dans ce processus multivariable tel que cette boucle utilisée dans le séchoir, l'ensemble des entrées est, en général, susceptible d'influer sur le comportement de l'ensemble des sorties. Le but de découplage est de permettre, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie, permettant ainsi de traiter le processus

sous la forme d'un ensemble de systèmes monovariables mais évoluant en parallèle. Par conséquent, les commandes sont alors non-interactives. Seulement, ce processus est *difficilement modélisable*, donc il est nécessaire une autre approche plus conséquente.

III.3.3 Système basé sur le temps

Les systèmes basés sur le temps sont les plus simples mais ne sont pas sensibles à un changement de conditions dans le séchoir. Le rôle de l'opérateur est plus important. Il doit estimer le taux de séchage et par le fait même, le temps que le produit prendra pour atteindre une humidité moyenne qui justifie un changement de consigne. La figure III.01, montre cette structure.

On note qu'un système dont la progression est fondée sur le temps enlève une boucle de retour à la structure (le bloc du programme de séchage ne reçoit plus de mesure à partir du séchoir). Si les conditions du matériau à l'entrée du séchoir et les conditions climatiques ne changent pas, il est possible d'obtenir de bons résultats de séchage. Dans ce type de système, l'opérateur joue un rôle très important et constitue en fait le lien entre les résultats obtenus et l'ajustement des programmes de séchage.

III.3.4 Correction à base d'humidité moyenne

La figure III.10. présente une structure type d'un système de contrôle basé sur la mesure de l'humidité moyenne du matériau. Là, la principale différence avec la structure précédente est l'ajout d'un lien entre le programme de séchage et la condition du produit par la mesure de l'humidité. Cette mesure est comparée à des valeurs seuils qui, une fois atteinte, fait progresser le programme d'une étape dans la séquence de séchage. Il en résulte de nouvelles consignes pour les températures de l'air aux bulbes sec et humide.

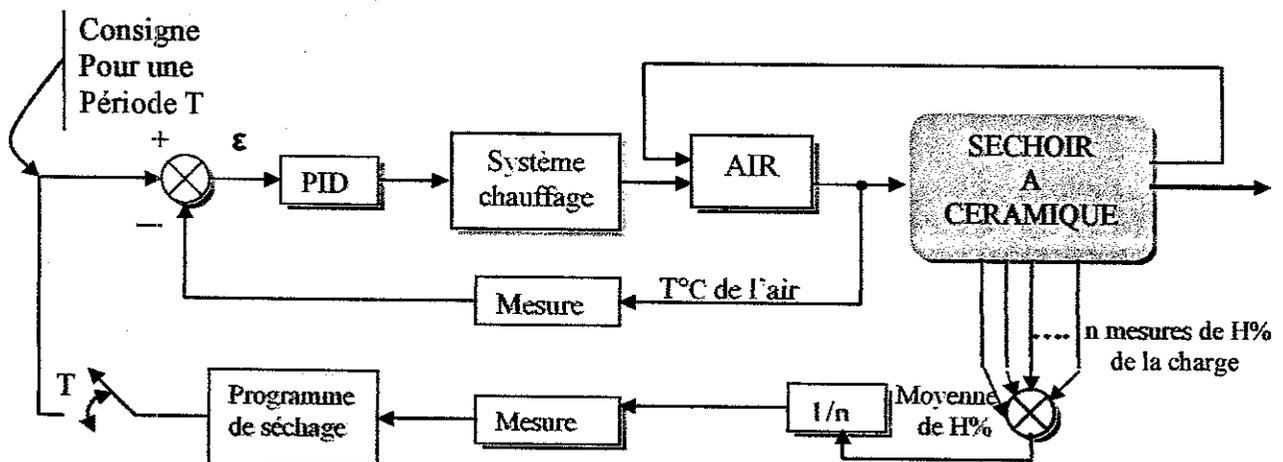


Figure.III.10. Schéma-bloc de structure de commande du système où le programme est fonction de H% de séchage.

La teneur en humidité se déduit d'une mesure délivrée par la résistance électrique entre deux électrodes introduites dans l'une des pièces de la charge. La corrélation entre l'humidité et la résistance fait toutefois intervenir d'autres caractéristiques du procédé et du matériau telles que la température et la densité. La précision de cette corrélation est limitée à un domaine défini entre 5-30 % de teneur en humidité.

On peut estimer directement l'évolution de la teneur en humidité de la charge ou bien par une deuxième sonde dans les pièces du produit vert estimer le gradient d'humidité des ces pièces. Dans ce cas, la conduite du séchage peut se faire soit par étapes successives quand on atteint des valeurs cibles d'humidité du produit ou bien dans le deuxième cas par l'imposition d'un taux de séchage en relation avec le gradient d'humidité observé.

L'interprétation de la mesure de la teneur en humidité moyenne dépend du nombre de sondes utilisées, de la distribution réelle de la teneur en humidité de la charge et d'une localisation représentative des sondes sur celle-ci (cf. fig III.10).

III.3.5 Système basé sur la mesure du poids de la charge

Les systèmes basés sur la mesure du poids ne sont en fait qu'une variante au principe du système précédent. La même structure est décrite par le système (cf. Fig. III.03.). La mesure de la balance donne le poids total d'une partie de la charge. Selon l'estimation de la masse anhydre de la charge, il est possible d'en déduire le contenu en humidité. Aussi, selon la précision de la balance, il est possible d'estimer le taux de séchage moyen de la charge.

III.3.6 Système basé sur le contrôle de la T°C au sein de la charge (DTC)

Une des méthodes présentement utilisées est la mesure du *différentiel de température de l'air à travers la charge*, appelée DTC. De façon indirecte, cette mesure permet d'estimer le taux de séchage et la teneur en humidité de la charge, information nécessaire à la conduite des séchoirs. Ainsi, le DTC devient un élément déclencheur du changement des températures de consigne dans le séchoir.

Le schéma bloc de régulation d'un séchoir utilisant la mesure du DTC est illustré par la figure III.11. La mesure du DTC consiste en une comparaison entre la température de l'air mesurée dans le séchoir, « T°e », et la température de consigne « T°c ». Effectivement, la température de l'air change tout au long de son parcours dans la charge puisque son énergie sert à évaporer l'eau comprise dans le produit vert. Toutefois, le DTC ne donne pas une valeur absolue. Par exemple, un DTC donné ne signifie pas la même chose selon la température d'opération du séchoir, l'espacement entre les rangées, la vitesse de l'air dans la charge, la largeur des lots, etc. Il est donc dépendant de plusieurs paramètres géométriques de la charge et du séchoir. Ainsi, pour ajuster les programmes de séchage il faut bien identifier toutes les conditions propres à la charge et au séchoir qui influencent la valeur du DTC.

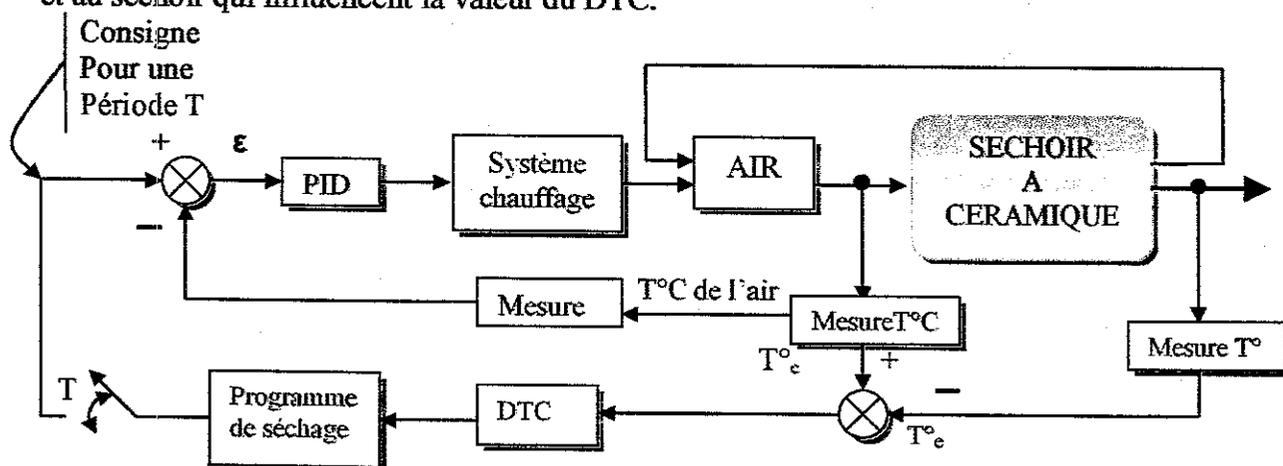


Figure III.11. Schéma-bloc de structure de commande du système où le programme est fonction de la différence de T°C au travers de la charge (DTC).

Lors du préchauffage, le DTC sert de limite maximale au taux de réchauffement. Dès que le DTC commence à diminuer, c'est-à-dire que la charge emmagasine moins d'énergie, la température de consigne est augmentée. La montée en température s'arrête lorsque la température finale est atteinte.

Cette approche est utile d'autant plus que la mesure réelle du DTC en fin de séchage est difficile puisque sa valeur est généralement très petite. Aussi, toutes les erreurs engendrées par le système rendent imprécise cette mesure. Finalement, pour diminuer le rebut et le temps de séchage lors de l'utilisation d'un système basé sur le DTC, il faut à la fois bien comprendre la

signification du DTC pour déterminer correctement les programmes de séchage et dissocier les effets externes sur la valeur du DTC.

Le DTC est un système de contrôle qui donne un lien entre le taux de séchage et le programme de séchage.

III.3.7 Régulation prédictive et combinée de la T°C air sec / T°C air humide

Il existe deux boucles de régulation dans le séchoir. Chacune d'elles fonctionne indépendamment du point de vue de la régulation mais est en fait sont liées par les phénomènes régissant le comportement de l'air. La structure de la figure III.12 montre le détail des deux boucles de régulation.

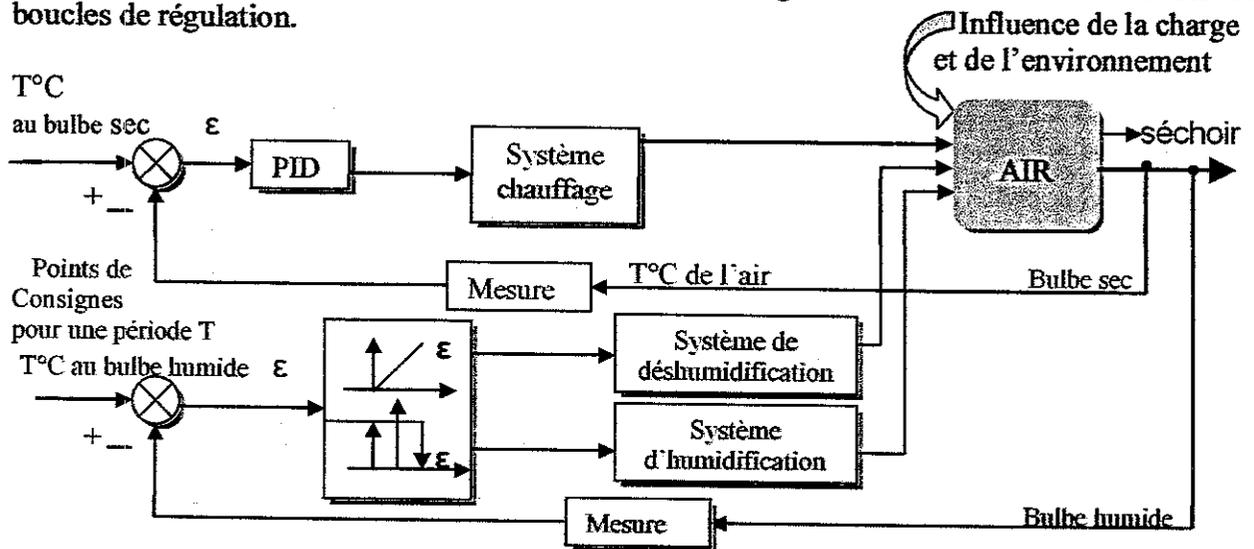


Figure.III.12.Schéma-bloc de structure détaillée du système de commande d'un séchoir.

Sur cette figure, un élément marche/arrêt est montré pour le fonctionnement de la boucle de régulation de l'humidification tandis que pour la déshumidification un élément proportionnel est montré.

L'action d'une boucle de régulation influence aussi l'autre boucle de régulation. Prenons le cas où le système détecte une erreur sur la température du bulbe sec. Si cette erreur résulte du fait que la température au bulbe sec est inférieure à la consigne, le système chauffera l'air.

On doit savoir que d'après la carte psychrométrique, lorsque l'air est chauffé, il en résulte un assèchement de celui-ci. Donc, une nouvelle erreur sera détectée sur la boucle de régulation de l'humidité de l'air. Alors cette boucle entrera en fonction pour corriger cette nouvelle erreur en humidifiant l'air. Par contre, l'humidification de l'air influence à la hausse la température du bulbe sec, ce qui engendre une nouvelle erreur. C'est pourquoi, les systèmes de régulation ont des séquences logiques qui donnent une priorité à un des systèmes selon les phases de fonctionnement. Le tableau III.02 résume l'effet des corrections sur les températures observées dans les séchoirs.

Finalement, la localisation des instruments de mesure de la température au bulbe sec a une importance sur le fonctionnement des boucles de régulation.

La mesure peut être prise soit à la sortie de la charge ou à son entrée. Une mesure à l'entrée assure une température maximale qui sera trouvée dans le séchoir. Le temps de réponse est aussi plus rapide puisque la température est ajustée par le chauffage qui se trouve près de la prise de mesure.

Dans le cas d'une prise de mesure à la sortie de la charge, c'est une température minimale qui est assurée. Cela provient du fait que la charge influence la mesure de la température. Dans le cas où le système est stabilisé, soit après un certain temps de fonctionnement, la température à l'entrée sera supérieure à la température de sortie d'une valeur proportionnelle au taux de séchage. Dans le cas d'un changement de direction de la ventilation dans les séchoirs ou d'une variation significative de la température, l'inertie de la charge influence la température. Ainsi, la charge peut fournir de la chaleur à l'air donc le système perçoit qu'il n'y a pas lieu de fournir de la chaleur au séchoir et ainsi la température de l'air à l'entrée commence à diminuer. La compréhension de ces phénomènes doit être bien acquise pour définir adéquatement les programmes de séchage.

Tableau III.02.

Correction de T°C	Chauffage	Humidification vapeur	Déshumidification
Température au bulbe sec	+	+	-
Température au bulbe humide	-	+	-

III.4. La commande existante au niveau de l'entreprise, objet de l'étude

III.4.1 Procédure de régulation du séchoir à céramique par Top programmes, cf. [Cer.04]

La régulation de la température dans le séchoir s'effectue dans la plupart des cas au niveau des gaines des fumées de la chambre de séchage. Le rôle du régulateur est de maintenir la température à une valeur de référence prédéfinie.

Dans le cas de modification de point de référence au cours du fonctionnement du séchoir, le constructeur a proposé une technique de ventilation de la chaleur dans les chambres de séchage à l'aide d'un top programme.

a) Définition du top programme

Le top programme est un régulateur programmé universel à cames, qui assure la fonction d'asservissement mécanique par un cycle prédéterminé par l'utilisateur, et ce en fonction du temps.

b) procédure de conduite par à l'aide du top programme

Chaque chambre est équipée d'un top programme dont le rôle est de donner un ordre au servomécanisme des vannes de réglages :

- D'augmenter et ou de diminuer le débit de gaz naturel du générateur, en fonction de la température que l'on veut maintenir dans la chambre de séchage ;
- D'ouvrir et ou de fermer le registre d'air chaud de la chambre en fonction de la température que l'on veut maintenir dans la chambre de séchage ;
- D'ouvrir et ou de fermer le registre d'extraction (à l'aide des cames) de la chambre en fonction de la température que l'on veut maintenir dans la chambre de séchage ;
- D'ouvrir et ou de fermer le registre de recyclage (à l'aide des cames) de la chambre en fonction de la température que l'on veut maintenir dans la chambre de séchage.

c) Le bloc programme (cf.figure.III.13) :

Il comprend la came programme (CP)fixé par la ceinture (F) sur le plateau (T), partagé en 60 divisions, à entraînement unidirectionnel (sens inverse des aiguilles d'une montre).

Il comprend aussi les cames auxiliaires de signalisation (CX), l'ensemble pouvant être facilement monté ou démonté, par simple action sur un bouton moleté (B), vissé sur l'axe horizontal du mécanisme fonctionnel.

Le bloc programme peut être enlevé sans modifier les positions relatives aux diverses cames, ce qui permet de stocker plusieurs programmes préalablement préparés et de pouvoir les remettre en service rapidement :

Came programmée : c'est une came en plastique spécial de type transparent, facilement façonnable aux ciseaux, de longueur de 480 mm, de largeur 65 mm. Elle est préalablement découpée et modifiée suivant le tracé imposé par le constructeur.

Cames auxiliaires : les 5 cames « A. B. C. D et E » excitent les 5 microrupteurs Correspondants « S1 S2 S3. S4 et S5 ».

Le jeu de ces cames auxiliaires (CX) réalisé en matière plastique, découpable et interchangeable, viennent s'insérer dans les logements circulaires (LC) disposés sur la surface extérieur du plateau porte diagramme T, et commandent suivant leurs profils, à des moment déterminés. L'ouverture ou la fermeture instantanée ou maintenue des 5 microrupteurs correspondants à S1, S2, S3, S4 et S5.

➤ **Description du rôle des 5 cames (cf. tableau ci-dessous) :**

Came	Rôle
Came A	autorise (si elle est appuyée) le déroulement du programme et arrête le programme si elle est relâchée
Came B	commande l'ouverture (si elle est appuyée) ou la fermeture (si elle est relâchée) le registre secondaire d'air recyclé
Came C	commande (si elle est appuyée) la fermeture de registre secondaire de l'extraction d'air humide
Came D	commande (si elle est appuyée) l'ouverture de registre secondaire de l'extraction d'air humide
Came E	commande la marche automatique des ventilateurs de la chambre

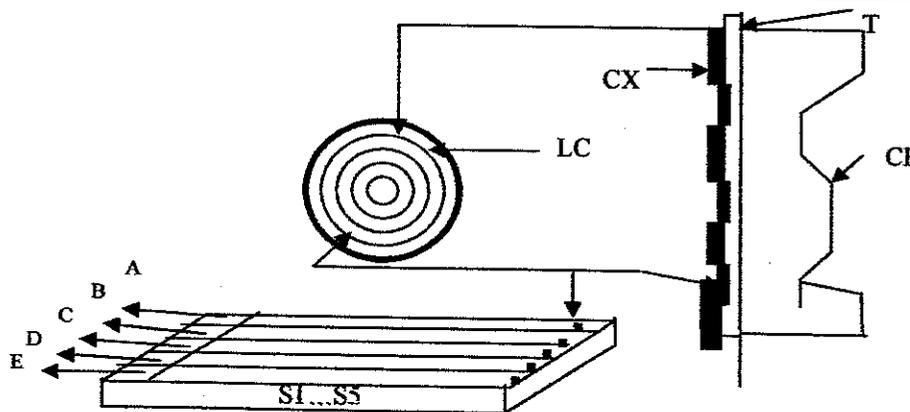


Figure.III.13.Le bloc programme et les cames auxiliaires.

d) Principe de fonctionnement du régulateur (cf.figure.III.14)

Le moteur synchrone M fait tourner le bloc programme dans le sens inverse des aiguilles d'une montre permettant ainsi la rotation de la came programmée qui fait défiler le programme par

l'intermédiaire d'un galet guide G, commandant l'asservissement mécanique, qui se déplace le long de la came CP en modifiant suivant le tracé rencontré, la position de l'index I du régulateur.

Un réglage d'apport permet d'assurer la concordance exacte entre le galet G et l'index I. D'autre part, les cames auxiliaires CX disposées sur le support T de la came CP tournent en synchronisme avec elle, et peuvent actionner jusqu'à 5 microrupteurs, permettant ainsi d'obtenir une signalisation complémentaire L1 et L2 ou éventuellement des commandes automatiques, en des points bien définis de la programmation.

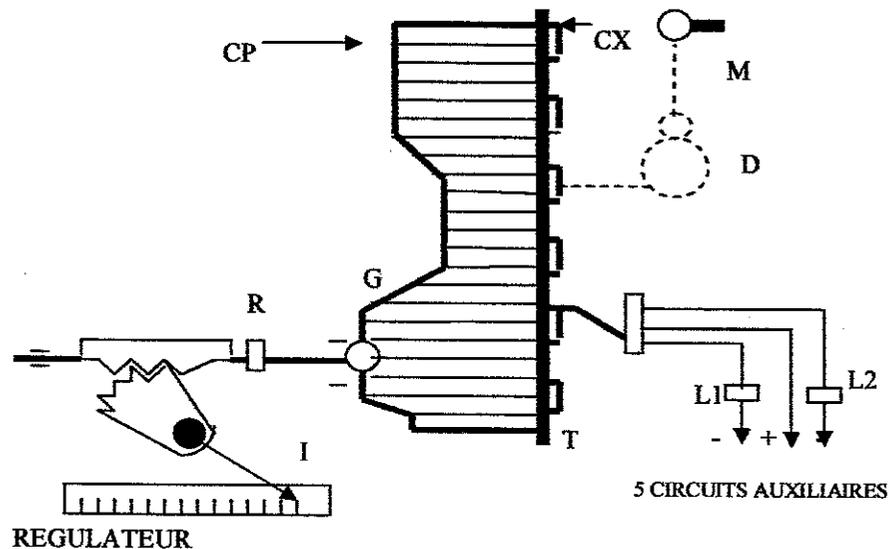


Figure. III.14. Schéma de principe de fonctionnement

III.4.2 Commentaire sur ce mode de régulation

Après étude et investigation sur site, concernant que ça soit l'efficacité ou bien la rentabilité de cette commande en exploitation, nous pouvons affirmer les constats suivants qui se résument plutôt en des inconvénients qu'en des avantages et dont les principaux sont :

- ⊕ Le top programme provoque très souvent des oscillations soutenues à l'échelle des servomécanismes, dont le nombre est très important, ce qui minimise vite leur durée de vie.
- ⊕ Le manque de souplesse et d'adaptation (amélioration, nouvelles fonctions, coexistence etc.) ;
- ⊕ La consommation importante d'énergie relative aux commande et technologie électromécanique pour chacun des Tops Programmes ;
- ⊕ l'encombrement dimensionnel de chaque instrument ;
- ⊕ Le temps élevé de traitement de l'information à cause de la commutation des relais ;
- ⊕ Manque de fiabilité en comparaison à la commande à technologie programmable, à cause de ses composants mécaniques ;
- ⊕ Nombre de cames très limité, donc non évolutif (P.D.R.) limité.
- ⊕ Rentabilité économique limitée en raison de l'apparition d'autres technologies.

Les régulateurs PID sont supposés favoriser la baisse d'une manière très sensible de la fréquence d'exécution répétitive de servomécanismes et d'augmenter, par conséquent, ainsi leur durée de vie. Mais cette substitution a besoin d'un préalable à savoir, une modélisation aussi fine que possible.

III.5 Conclusion

Nous avons identifié dans cette partie plusieurs contraintes techniques limitant un bon contrôle du procédé de séchage, tels la difficulté de mesurer la teneur en humidité du matériau, le grand nombre de pièces à sécher, la définition des programmes de séchage encore sous la

responsabilité des opérateurs, etc. Connaissant ces faits, il est reconnu, aussi bien dans le milieu de la recherche que par les industriels, qu'un contrôleur avancé est une solution avantageuse à explorer. Ces contrôleurs s'appuieraient sur des modèles mathématiques pour combler en partie les difficultés techniques identifiées.

Plusieurs années d'efforts ont passé. On comprend bien la position des industriels qui fait qu'ils ne sont pas associés à des programmes de recherche pour le développement de nouveaux contrôleurs de type avancé. Ils auraient de la difficulté à justifier des investissements dans la recherche sans avoir identifié au préalable une première recherche prometteuse avec un risque limité. Ainsi, les modèles mathématiques demeurent l'apanage du milieu scientifique avec quelques percées industrielles.

Malheureusement, ces contrôleurs n'existent toujours pas. Aussi peut-on conclure que deux barrières importantes au développement et à l'implantation de systèmes de contrôle-commande avancés demeurent toujours la difficulté de modéliser le procédé de séchage et la difficulté de mesurer la teneur en humidité.

Toutefois, ces barrières ne sont pas les seules. On se rend rapidement compte que la complexité du procédé ne se limite pas uniquement au séchoir. On l'observe dans la pratique du séchage où l'opérateur joue un grand rôle en prenant maintes décisions dans la gestion du procédé avant et après le séchage.

De plus, le nombre de variables mises en jeu est si grand qu'il est difficile de faire un lien direct entre un changement de pratique et l'amélioration du procédé. Ainsi, une autre barrière importante aux développements de nouvelles pratiques de séchage, provient du fait qu'il soit difficile d'évaluer rapidement et précisément les bénéfices financiers d'une nouvelle pratique.

Si on recueillait les données générées par le procédé, on obtiendrait de grandes bases de données « datawarehouse ». Il serait alors possible d'utiliser de nouveaux outils d'analyse mathématiques appelés analyse multivariée. Ces outils synthétisent l'information contenue dans l'ensemble des mesures sous forme de modèles grâce auxquels on peut prédire le comportement du système. L'approche statistique de ces méthodes promet une compatibilité avec le procédé de séchage.

Celles-ci servent à observer les améliorations au procédé en faisant varier certaines variables d'entrée du système selon une stratégie établie par la méthode. Après quelques expériences, on peut déduire une meilleure façon de sécher (c.f. [Kaf.74]).

Finalement, dans un tel contexte, nous aurons un meilleur contrôle du procédé et de sa qualité et nous pourrons aussi mettre en évidence la possibilité d'économie d'énergie dans le procédé de séchage.

En conclusion, ces pratiques de régulation du séchage sont nombreuses et largement appliquées mais aucune ne semble prévaloir. Ceci est probablement dû au fait de leur simplicité de leur réalisation et de leur fiabilité matérialisée par l'utilisation d'un minimum nécessaire d'un ensemble d'éléments fonctionnels. Le manque d'outils de mesure de qualité de produit final et de surveillance des coûts énergétiques pourrait également expliquer ce fait.

Chapitre IV**Modélisation des Connaissances
Imparfaites par les Sous-
Ensembles Flous.
Concepts Fondamentaux****IV.1. Introduction**

Si les processus commandés sont linéaires, ils peuvent être alors modélisés par un modèle mathématique. Le concepteur devra alors calculer les valeurs des paramètres de réglage du régulateur (gain, durées d'intégration et de dérivation) pour satisfaire aux exigences d'un cahier des charges (temps de montée, dépassement). Le système réglé sera robuste s'il est peu sensible aux perturbations.

Certains processus sont par nature difficilement modélisables (thermique, chimique), variables dans le temps ou encore ne peuvent être correctement représentés par un modèle linéaire. Dans ce cas, les paramètres de réglage du régulateur ne seront pas optimaux et le système pourra ne pas être correctement contrôlé.

Dans l'approche « logique floue », on ne se préoccupe pas d'une modélisation mathématique du processus mais, par contre, on suppose le processus non régulé bien connu par un opérateur humain, l'objectif est toutefois de l'automatiser. On parle alors de connaissance par un « expert » qui sait ce qu'il faut faire pour que ça marche dans tous les cas de figure.

Dans ce chapitre nous allons essayer de détailler les approches principales de la théorie de la logique floue destinées au traitement et l'évaluation des caractérisation symboliques. Nous y exposons les propriétés fondamentales des sous-ensembles flous et d'autres notions utilisées pour la représentation des connaissances.

IV.2. La logique floue a déjà 60 ans ...

Pressenti par le philosophe Max Black dès 1937, le concept de la logique floue fut réellement introduit en 1965 par Lotfi Zadeh, un professeur à l'université de Berkeley (Californie), (USA) [Zad.65]. Ce dernier, poussé par une pénurie de programmeurs, était à la recherche de méthodes pouvant réduire les coûts de développement des logiciels.

Sa "Fuzzy Set Theory" n'eut pas un succès immédiat. Elle fut développée surtout en Europe et au Japon. Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique.

À la fin des années 1980, les travaux scientifiques aboutissant au concept d'une logique « non classique », la logique floue, d'une part, et à son adaptation à la modélisation et à la commande des processus non linéaires, d'autre part. Ainsi se sont ouvertes de nouvelles perspectives dans la commande des procédés.

L'intérêt de la logique floue réside dans son aptitude à manipuler des grandeurs imprécises utilisées notamment dans le langage humain. Le nombre de plus en plus important de congrès internationaux montre l'intérêt des chercheurs, ingénieurs et industriels pour la logique floue.

La logique floue est fondée sur la théorie des ensembles classiques qu'elle a étendue aux ensembles flous. Le but de la logique floue est de parvenir à traiter des connaissances par nature

imparfaites, du fait d'un manque de précision dans l'expression d'une dimension, ou de l'impossibilité de chiffrer une notion: incertitudes, imprécisions et « incomplétudes » (absence d'un certain nombre de renseignements) caractérisent cette logique. La solution proposée sera de préserver les imperfections dans le traitement logique, jusqu'à un certain stade, jusqu'à ce qu'on dispose d'une représentation manipulable de façon automatique.

IV.3. Les ensembles flous, [Bou.95]

IV.3.1. Raisonnement en logique floue

Le raisonnement de la logique classique ne s'applique pas à la logique floue. En effet, en logique classique, des propositions telles que « p » ou « q » ne peuvent avoir que deux valeurs de vérité : le vrai ou le faux. Des opérateurs dont les principaux sont la conjonction (ET), la disjonction (OU), la négation (NON), et la règle de déduction ci-après : si « p » implique « q » vrai, et « p » vrai, alors q vrai (prémisse vraie : modus ponens), si « p » implique « q » vrai, et « q » faux, alors « p » faux (conclusion fautive : modus tollens) constituent les fondements de la *logique classique*.

Mais, en logique floue, l'incertain est présent. Il faut donc traiter trois valeurs possibles : le vrai, le faux et l'incertain. Certains auteurs ont proposé de donner à l'incertain une valeur intermédiaire (logiques ternaires) standard, mais l'école de Lotfi A. Zadeh a proposé des règles de raisonnement en logique floue plus subtiles : donner à l'incertain une quantification floue. La logique floue définit des implications floues et un modus ponens généralisé

En logique binaire, la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ caractérisant l'appartenance d'un élément x , de l'univers de discours X à un ensemble classique A prend uniquement les valeurs 0 et 1 :

$$\begin{aligned} \mu_A(x) : X &\rightarrow \{0, 1\}; \\ x &\rightarrow \mu_A(x) = 1 \quad \text{si } x \in A; \\ &\mu_A(x) = 0 \quad \text{si } x \notin A. \end{aligned}$$

Un ensemble flou peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble classique. Il a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre et autoriser des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre ou encore à appartenir partiellement à chacune (degré fort pour une classe et degré faible pour une autre). Dans la théorie des ensembles flous, les valeurs de la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ sont comprises dans l'intervalle $[0, 1]$:

$$\begin{aligned} \mu(x) : X &\rightarrow [0, 1]; \\ x &\rightarrow \mu_A(x). \end{aligned}$$

Dans le cas particulier où $\mu_A(x)$ ne prend que des valeurs égales à 0 ou 1, le sous-ensemble flou A est un sous-ensemble classique de X . Par conséquent, le sous-ensemble classique est un cas particulier de sous-ensemble flou [Bou.95].

Un ensemble flou A est défini par un ensemble de paires ordonnées $(A(x), x)$:

$$A = \{(\mu_A(x), x) / x \in X\};$$

Lorsque l'univers X est discret, l'ensemble flou A est noté :

$$A = \sum_i \mu_A(x_i) / x_i;$$

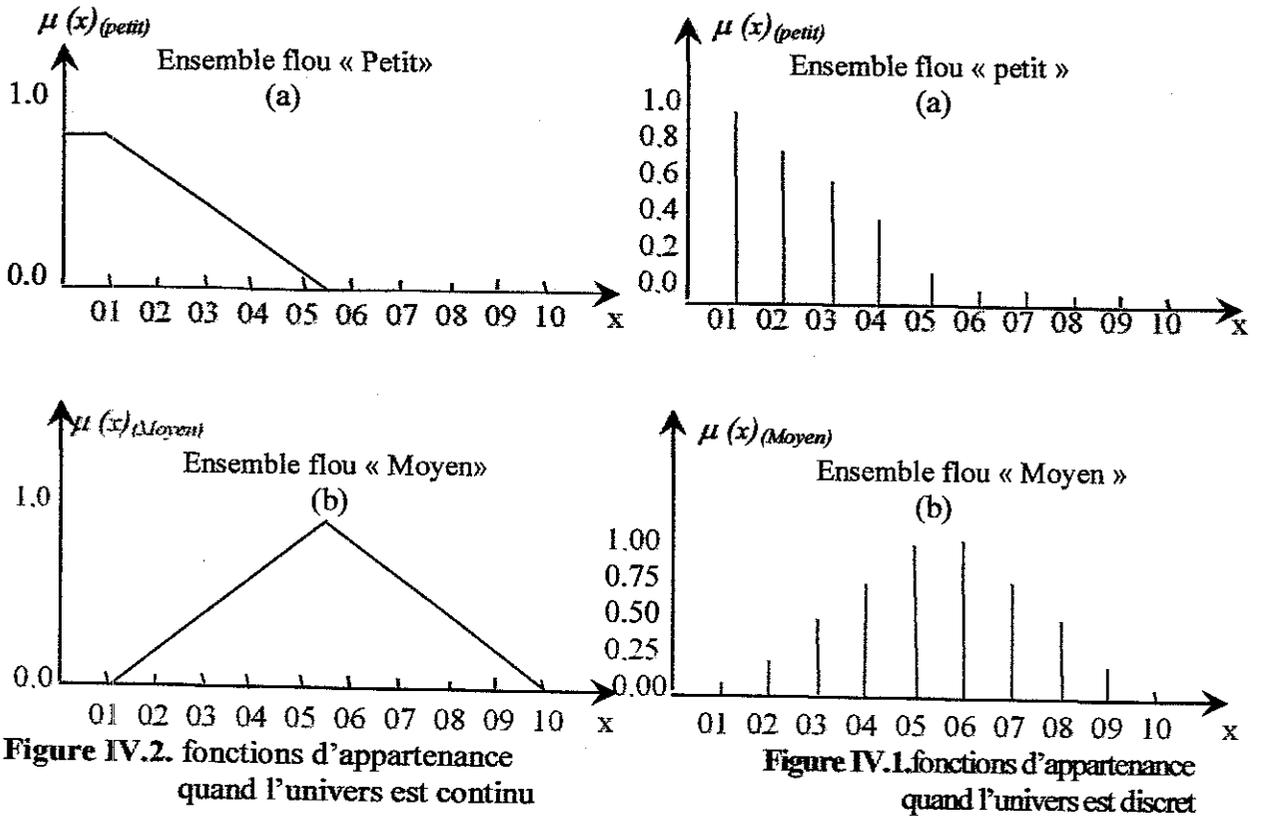
(le symbole '/' ne fait pas référence à la division mais est utilisé pour séparer la fonction d'appartenance avec l'élément qui lui est associé)

Soit par exemple l'univers X de discours défini par : $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$;

La figure IV.1. illustre la représentation des ensembles flous «petit» (a) et «moyen» (b) dont les paires ordonnées sont telles que :

$$\text{petit} = 1/1 + 0.8/2 + 0.6/3 + 0.4/4 + 0.2/5 + 0/6 + 0/7 + 0/8 + 0/9 + 0/10;$$

$$\text{moyen} = 0/1 + 0.25/2 + 0.5/3 + 0.75/4 + 1/5 + 1/6 + 0.75/7 + 0.5/8 + 0.25/9 + 0/10;$$



De façon identique, si X est continu : $A = \int \mu_A(x) / x$.

La figure IV.2 illustre à nouveau les sous-ensembles flous «petit» (a) et «moyen» (b) définis à l'aide de triangles. D'autres fonctions peuvent être utilisées comme les fonctions gaussiennes, en cloche ou les sigmoïdes.

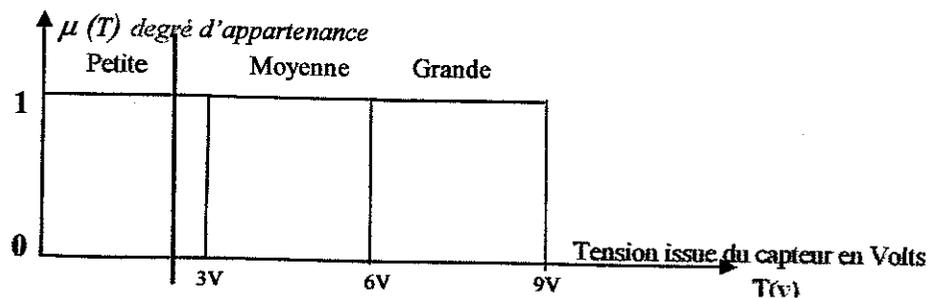
En aucun cas il ne s'agit d'un manque d'information pour une décision à prendre, mais d'une représentation qui prend en compte l'incertitude que l'on a du modèle à explorer.

La théorie des ensembles flous permet de définir toutes les opérations classiques. Elle englobe la théorie des ensembles classiques.

On se propose dans la suite de détailler les étapes permettant, à partir des données fournies par un ou plusieurs capteurs, d'élaborer un signal de commande compréhensible par une interface de puissance (0-10Volt par exemple) [Fuz.05].

La figure ci-dessous (cf. Figure.IV.3.) représente la plage de variation d'un capteur (de température par exemple). Le signal de sortie peut varier de 0 à 10Volts, mais on constate qu'à partir de 9 Volts se produit une saturation. On va décider de partitionner la plage de variation utile (0-9V) en 3 zones qui seront dénommées : petite (0-3V), moyenne (3V à 6V), et grande (6V à 9V).

Si la tension est de 2V, elle est alors dans la classe « petite » et bien sûr ni « moyenne » ni « grande ».



Le degré d'appartenance de la valeur 2 v à la classe « petite » est de 1 et 0 pour les 2 autres.

On retrouve là une logique binaire où l'état d'un comparateur ne peut être que «0» ou «1».

L'inconvénient de cette représentation est que la valeur 2.95V appartient à la classe « petite » alors que la valeur 3.05V appartient à la classe « moyenne » et pourtant les valeurs sont proches.

Ceci est dû à la définition des 3 sous-ensembles classiques «petite», «moyenne» et «grande» qui ont une « frontière » nette d'où cette discontinuité.

Si le résultat de la mesure est légèrement bruité (cas très fréquent, évidemment), on pourra basculer d'un coté à l'autre de la « frontière ».

La notion de sous-ensemble flou permet d'éviter cette *discontinuité* brutale. Cette opération s'appelle « la fuzzification ». La sortie du capteur est appelée variable «linguistique» puisqu'elle pourra prendre les valeurs *linguistiques* « petite », « moyenne » ou « grande », mais on va modifier comme indiqué ci-dessous (cf. Figure IV.4.) les « frontières » entre ces valeurs *linguistiques*, c'est-à-dire les formes des fonctions d'appartenance.

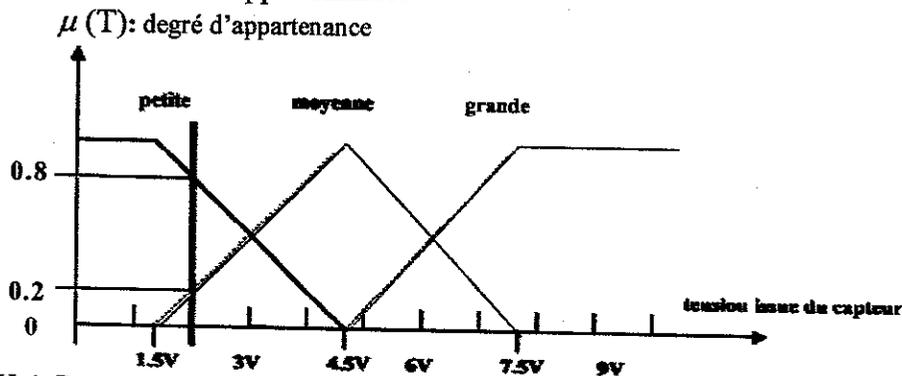


Figure IV.4. Représentation des degrés d'appartenance avec 3 ensembles flous pour le capteur.

Dans cette représentation la valeur de tension 2V sera à la fois « petite » et « moyenne »; de plus, on va préciser de combien. On définit alors un *degré d'appartenance* μ à chacune de ces classes

$$\mu_{\text{petite}} = 0.8 \text{ et } \mu_{\text{moyenne}} = 0.2 ;$$

On peut dire que l'ordre de grandeur de la tension issue du capteur est pris en compte par les valeurs linguistiques, puis la valeur précise est contenue dans les degrés d'appartenance (on parle aussi de *mesure d'appartenance* ou de *degré de certitude*).

Remarques:

- Les profils des frontières peuvent être variés : triangle, trapèze, sigmoïde, courbe de Gauss.
- Il n'y a rien de *flou* dans cette représentation, une même mesure peut appartenir à plusieurs classes avec un degré d'appartenance *précis* dans chaque classe.
- La valeur de la tension issue du capteur est ici considérée comme précise comme en automatique classique (on l'appelle singleton).
- C'est le rôle de l'expert que de définir les valeurs linguistiques de la variable.

IV.3.2. Définitions et Caractéristiques des sous-ensembles flous, cf. [Bou.95]

Soient A et B deux ensembles flous et x un élément de l'univers X :

- La hauteur : du sous-ensemble flou A de X la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance i.e. le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à A

$$\text{Haut}(A) = \max \{ \mu_A(x), x \in X \}; \quad \text{ou bien : } \text{Haut}(A) = \text{Sup}_{x \in X} f_A(x)$$

- La coupe de niveau : Etant donné le sous-ensemble flou A, on choisit un seuil (niveau) α entre 0 et 1, et on définit une coupe de niveau :

$$\alpha\text{-coupe}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) \geq \alpha \};$$

- Le support du sous ensemble A de X c'est-à-dire l'ensemble des éléments X qui

appartiennent, au moins un peu, à A

$$\text{Supp}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) > 0 \};$$

- **Le noyau** : de A est l'ensemble des éléments de X pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut la valeur de 1 :

$$\text{noyau}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) = 1 \};$$

- **L'égalité** : Deux sous-ensembles flous A et B de X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de X :

$$A = B \Leftrightarrow \{ \forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \}.$$

Les opérations d'intersection, d'union et complémentation de sous-ensembles flous habituellement employées *peuvent être remplacées* par d'autres opérations construites à l'aide d'opérateurs différents, du minimum, du maximum et de la complémentation à « 1 » [Bou.95]. Ces opérateurs ont été introduits par [Lin.65], on fait appel à eux lorsque les opérations habituelles ne s'avèrent pas satisfaisantes, par exemple en logique floue ou en commande de processus.

La norme triangulaire (T-norme) est une fonction T définie dans [0,1] et qui vérifie pour, u, v et w de [0,1], les propriétés suivantes :

$$T(u, 1) = u \text{ (élément neutre 1)}$$

$$T(u, v) \leq T(w, t) \text{ (} \forall u \leq w, v \leq t \text{) (isotonie)}$$

$$T(u, v) = T(v, u) \text{ (commutativité)}$$

$$T(T(u, v), w) = T(u, T(v, w)) \text{ (associativité)}$$

⊙ L'opérateur T = min.

Toute T-norme peut servir à définir l'intersection de sous-ensembles flous :

On définit une opération \cap_T qui, étant donné deux sous-ensembles flous A et B de X, leur fait correspondre un troisième sous-ensemble flou $C = A \cap_T B$ de fonction d'appartenance définie par :

$$\forall x \in X, f_C(x) = T(f_A(x), f_B(x)).$$

La conorme triangulaire (S-norme) est une fonction S définie dans [0,1] qui vérifie pour tous u, v, et w de [0,1], les propriétés suivantes :

$$S(u, 0) = u; \text{ (élément neutre 0)}$$

$$S(u, v) \leq S(w, t) \text{ (} \forall u \leq w, v \leq t \text{), (isotonie);}$$

$$S(a, b) = S(b, a); \text{ (commutativité)}$$

$$S(S(u, v), w) = S(u, S(v, w)) \text{ (associativité)}$$

Là également, T-conorme peut servir à définir l'union de deux sous-ensembles flous.

⊙ L'opérateur T = max.

IV.3.3. Les opérations sur les ensembles flous

Les opérations importantes dans la théorie des ensembles classiques sont l'union, l'intersection et la complémentation. Ces opérations sont également définies en logique floue grâce aux fonctions d'appartenance (cf. figure IV.5.). Les formulations utilisées pour l'intersection et l'union sont respectivement des normes triangulaires (T-norme) et des conormes (S-norme).

Soient A et B deux sous-ensembles flous ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance :

L'intersection de A et B est un ensemble flou $A \cap B$ dont la fonction d'appartenance est définie selon les auteurs [Jag.95] :

$$\text{Zadeh : } \mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (3-1)$$

Lukasiewicz : $\mu_{A \cap B} = \max[0, \mu_A + \mu_B - 1]$ (3-2)

L'union de A et B est un ensemble flou $A \cup B$ tel que :

Zadeh : $\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$; (3-3)

Lukasiewicz : $\mu_{A \cup B} = \min[1, \mu_A + \mu_B]$; (3-4)

Min et max sont les opérateurs de minimisation ou de maximisation.

Le complément d'un ensemble flou A est un ensemble flou A^c ou \bar{A} dont la fonction d'appartenance μ_{A^c} vérifie alors selon les auteurs :

Zadeh : $\mu_{A^c} = 1 - \mu_A$ (3-5)

Sugeno : $\mu_{A^c} = \frac{1 - \mu_A}{1 + \lambda * \mu_A}$ $\lambda > -1$ (3-6)

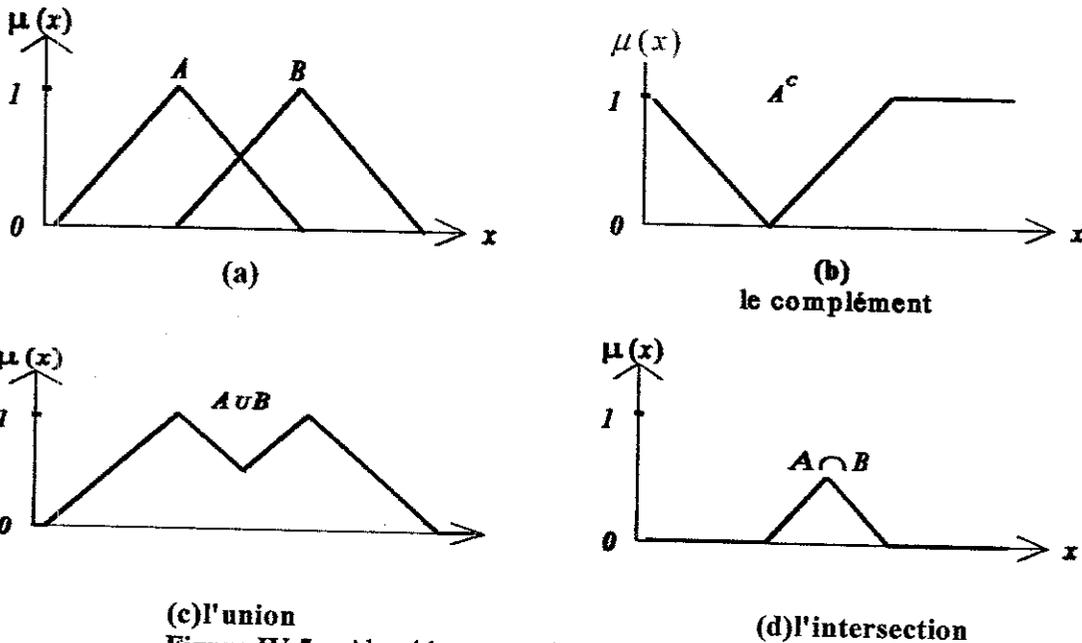


Figure IV.5. : Algorithme pour l'implémentation de deux fonctions d'appartenance (a) : l'union (max), l'intersection (min) et la complémentation (Zadeh).

IV.3.4. Notions de règles linguistiques

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent généralement la connaissance humaine sous forme de règles du type heuristique dont la syntaxe est : **si** <condition> **alors** <action>. La prémisse de la règle (l'antécédent) est constituée des conditions à satisfaire pour que la conclusion de la règle (la conséquence) soit réalisée.

Par exemple : **Si** la température extérieure est « élevée », **alors** la puissance est « faible »

La forme générale de cette règle, notée $A \rightarrow B$ est : **si** x est A **alors** y est B

Les variables d'entrée (x) et de sortie (y) sont la température extérieure et la puissance. «Elevée (A)» et « faible (B)» sont les labels linguistiques correspondant à deux ensembles flous.

Tagagi et Sugeno proposent une forme particulière de règle puisque les conclusions ne sont pas des ensembles flous mais des fonctions numériques dépendant des variables d'entrée [Tak.85]. Dans le cas d'une règle mono-entrée et mono-sortie, la forme générale est :

si x est A **alors** y est $f(x)$

Par exemple : « **si** la vitesse est grande, **alors** la force est $k * (\text{vitesse})^2$ ».

IV.3.5. Raisonnement flou

Le raisonnement flou est basé sur l'utilisation du modus ponens généralisé, défini selon la procédure suivante [Zad.73] :

Observation : x est A'
 Règle : si x est A alors y est B (notation : $A \rightarrow B$)
 Conclusion : y est B'

Les variables linguistiques sont x et y . A , A' , B et B' sont des labels linguistiques. La conclusion B' sera d'autant plus proche de B que la prémisse A' sera proche de A .

Le mécanisme permettant de passer de l'observation A' à la conclusion B' est appelé l'inférence floue. L'expression de la fonction d'appartenance de B' , $\mu_{B'}(y)$, dépend des opérateurs logiques utilisés (T-norme et S-norme) :

$$\mu_{B'}(y) = S_x [T [\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)]]. \quad (3-7)$$

Par exemple : $\mu_{B'}(y) = \max_x [\min [\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)]]$

La fonction d'appartenance $\mu_{A'}$ caractérise l'observation. L'opérateur $\mu_{R(x,y)}$ est l'implication floue qui évalue le degré de vérité de la relation floue $R = A \rightarrow B$. Les opérateurs les plus utilisés en commande floue sont les implications de Mamdani et Larsen (en fait des T-normes) :

$$\text{Mamdani : } \mu_R(x, y) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3-8)$$

$$\text{Larsen : } \mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (3-9)$$

IV.4. La commande floue [Jag.95]

IV.4.1. Généralités

IV.4.1.1. Historique

La commande floue est un domaine qui a été abordé très tôt par Zadeh [Zad.72]. La première application expérimentale, la régulation d'une machine à vapeur, a été réalisée en Angleterre par Mamdani en 1974 [Mam.74]. Le succès de cette première expérimentation a donné lieu à d'autres applications en Europe, telle que la réalisation industrielle d'un four à ciment à voie humide au Danemark [Ost.93].

Contrairement au Japon, les pays européens ont ensuite délaissé la commande floue. La première application dans ce pays, la conduite d'installations d'assainissement application dans ce pays, la conduite d'installations d'assainissement d'eau par la compagnie Fuji Electric, date seulement de 1983 mais de nombreuses applications ont depuis vu le jour. La mise en application massive du flou au Japon a contribué au regain d'intérêt de l'Europe pour la commande floue. Les domaines d'application sont nombreux [Yen.95] : transports (ABS, contrôle d'altitude d'une navette spatiale, conditionnement d'air d'un tunnel routier...), procédés industriels (usine de traitement des eaux...), produits grand public (produits d'électroménager...) ...

IV.4.1.2. Principe

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus médiatisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système.

Les régulateurs flous utilisent généralement une expertise exprimée sous forme de règles linguistiques. La forme générique pour un régulateur à deux entrées et une sortie est la suivante :

Si $\{x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } A_2\}$ alors $\{y \text{ est } B\}$;

La prémisse de la règle est constituée de x_1 et x_2 qui sont les variables d'observation du régulateur tandis que A_1 et A_2 sont des labels linguistiques. La conclusion de la règle est composée de la variable de commande « y » et d'un label linguistique « B ».

En vertu des définitions citées ci-dessus, définissant « e » comme l'écart entre « la température intérieure » et « la consigne » et « Δe » la variation de la température intérieure entre deux instants consécutifs, ainsi l'exemple de règle relatif à un régulateur du type Proportionnel Intégral peut être défini comme suit [Gli.91] :

Si { e est Petit Négatif et Δe vaut Zéro } **Alors** { Δy est Petit Positif } ;

La figure IV.6. représente la partition floue de la variable « e ». Cette partition correspond au découpage de l'univers de discours en sous-ensembles flous.

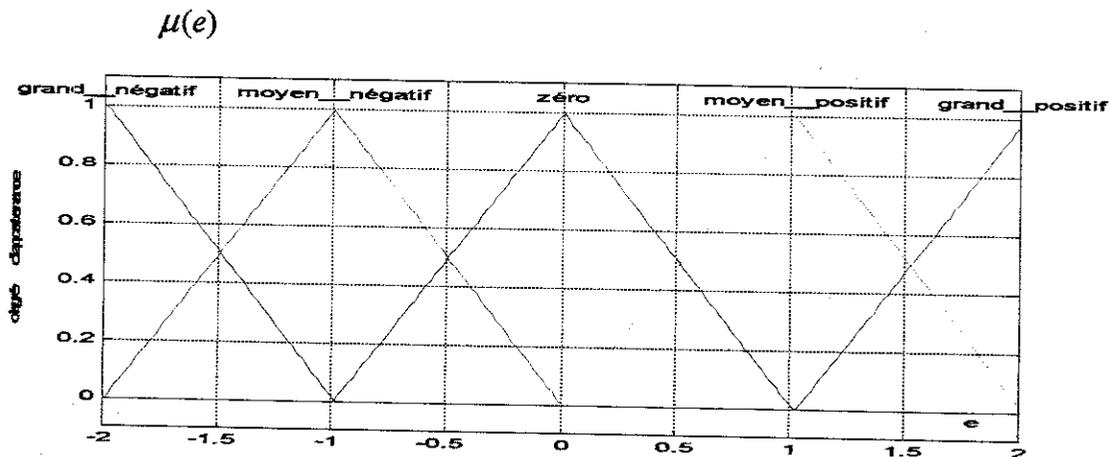


Figure IV.6. : Exemple de partition floue relative à la variable

IV.4.1.3. Propriétés

Plusieurs chercheurs ont démontré que les systèmes de commande floue peuvent être considérés comme des approximateurs universels [Wan.94]. Ce qui signifie que, pour toute fonction continue $W = f(V_1, V_2, \dots, V_n)$ et pour un niveau d'approximation fixé réel positif ε , il est possible de construire un système fini d'inférence floue (SIF) sous forme de règles qui approxime, donc il approche f à ε près :

(R1) SI V_1 est A_{11} et ... V_n est A_{1n} ALORS W est B_1 ;

(R2) SI V_1 est A_{21} et ... V_n est A_{2n} ALORS W est B_2, \dots

Ou bien ce qui revient à dire : $\forall x \in X \quad |SIF(x) - f(x)| < \varepsilon$

Pour cette raison, il est possible de définir des lois de commande non linéaires. De plus, Galichet a démontré qu'il existe un régulateur flou équivalent à tout régulateur classique [GAL.93]. Les régulateurs flous peuvent donc être au moins aussi performants que les régulateurs classiques.

Les avantages de la logique floue sont les suivants : il n'est pas nécessaire d'avoir un modèle mathématique du système à commander, la connaissance issue de l'expertise humaine ou de l'expérience peut être prise en compte et la conception est possible même dans le cas de systèmes complexes.

En revanche, il n'existe pas de directive *précise* pour concevoir une stratégie de réglage et un nombre important de paramètres (nombre de règles, fonctions d'appartenance...) doit être défini. Cette dernière doit être élaborée par tâtonnement à l'aide de tests sur l'installation à régler [Büh.94].

IV.5. Structure générale d'un contrôleur flou

La structure générale représentant les éléments fonctionnels d'un contrôleur flou est illustrée par la figure ci-dessous (cf. Figure.IV.7.) :

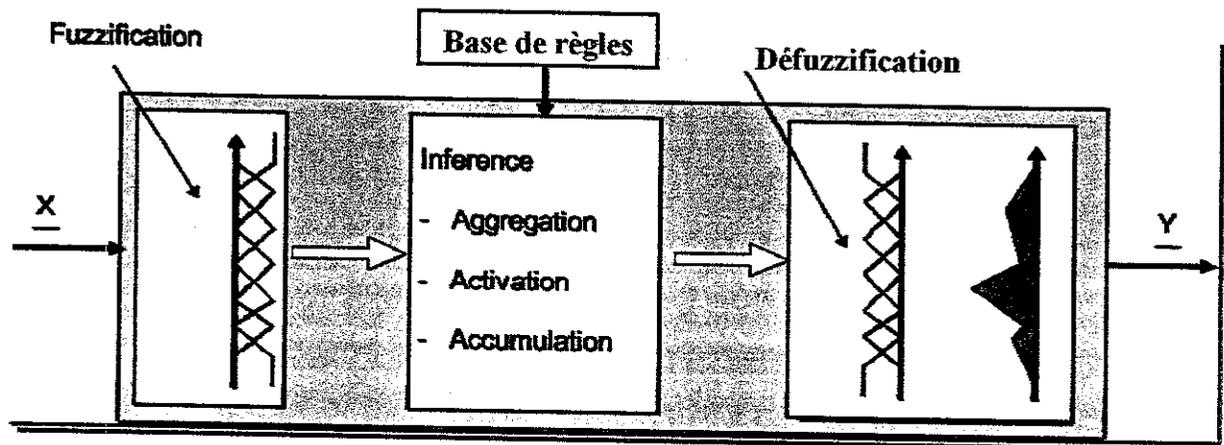


Figure IV.7. Structure d'éléments fonctionnels d'un contrôleur flou.

Un contrôleur flou peut être regardé comme un système expert mais particulièrement simplifié que ce dernier, fonctionnant à partir d'une représentation des connaissances basées sur les ensembles flous (cf. fig.IV.8.). Ses particularités sont, d'une part que les règles fournissent directement une conclusion sans avoir besoin de s'enchaîner, d'autre part que les observations sont fournies par des capteurs et sont donc généralement numériques et relativement précises.

La base de connaissances contient les définitions des termes utilisés dans la commande et les règles caractérisant la cible de la commande et décrivant la conduite de l'expert. Un module d'interface avec la composante floue établit une représentation adéquate des connaissances, en utilisant généralement une discrétisation de l'univers de définition des variables ou une normalisation dans l'intervalle $[0,1]$ et il définit les caractéristiques floues des variables correspondant à des qualifications linguistiques. Le module d'interface avec la composante non-floue détermine une action précise à partir de descriptions floues des variables de sorties.

Chaque état du système à commander passe par le filtre de l'interface avec le flou avant d'être traité par le module de raisonnement à partir des connaissances de la base. Le résultat flou ainsi obtenu passe par le second filtre, celui de l'interface avec le non-flou, qui fournit une commande précise, non-floue, directement applicable au système à commander. Cette dernière étape n'est habituellement pas réalisée dans un système expert [Bou.95].

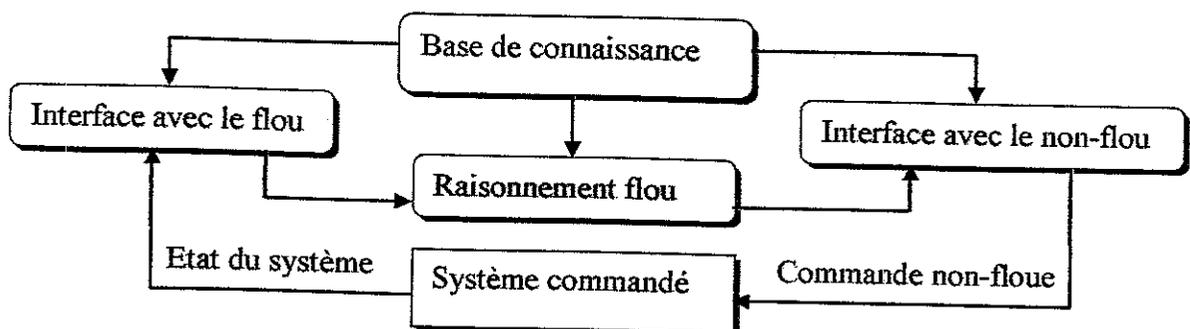


Figure IV.8. Configuration générale d'un régulateur flou.

IV.5.1. Différentes configurations d'un correcteur flou [IEC TC65/WG7/TF897]

☞ Dans ce correcteur flou, les paramètres d'entrée destinés à l'opération de fuzzification peuvent être l'écart de réglage, l'intégrale ou la vitesse de variation de celui-ci (cf. Figure IV.9.). Il est bien entendu que la ou les grandeurs de sorties du correcteur devront subir un traitement adéquat en vue de leur exploitation suivante.

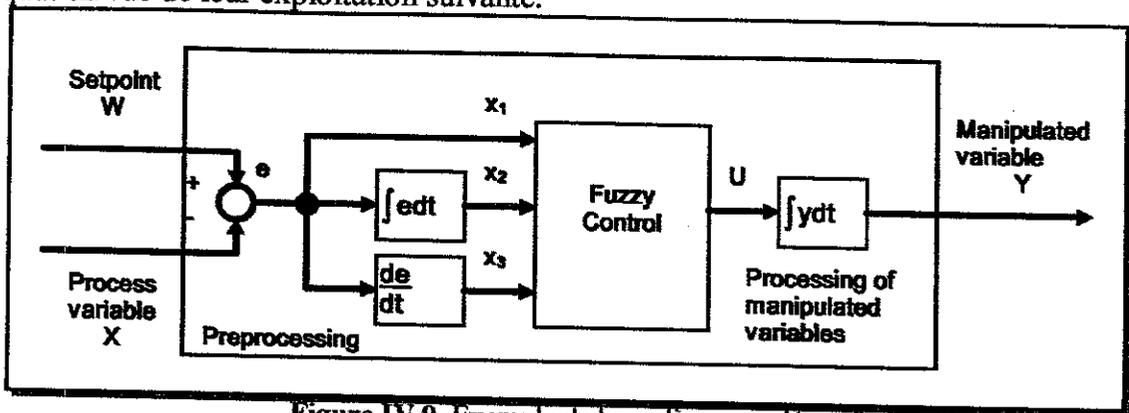


Figure IV.9. Exemple de base d'un contrôleur flou

☞ Pour cet exemple, il est question d'une régulation de principe classique en feedback où seul l'écart de réglage est pris en considération cf. Figure IV.10.

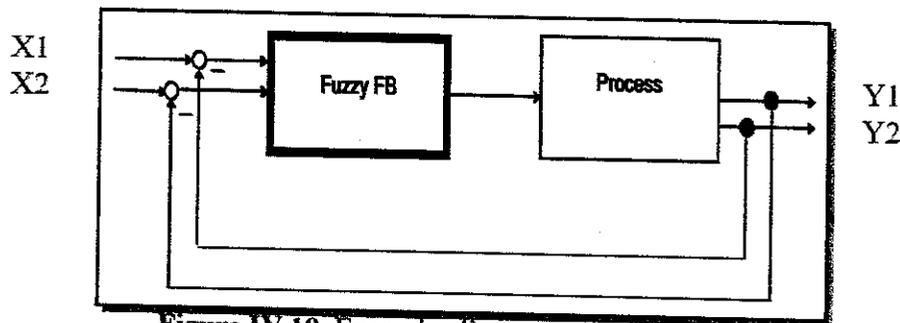


Figure IV.10. Exemple d'un correcteur flou direct

☞ Sur la figure ci-dessous, l'erreur de réglage joue le rôle de variable d'entrée pour les deux contrôleurs classique et flou. La spécificité de cette forme de conduite c'est l'anticipation grâce aux deux signaux de commande délivrés par les deux régulateurs cf. Figure IV.11..

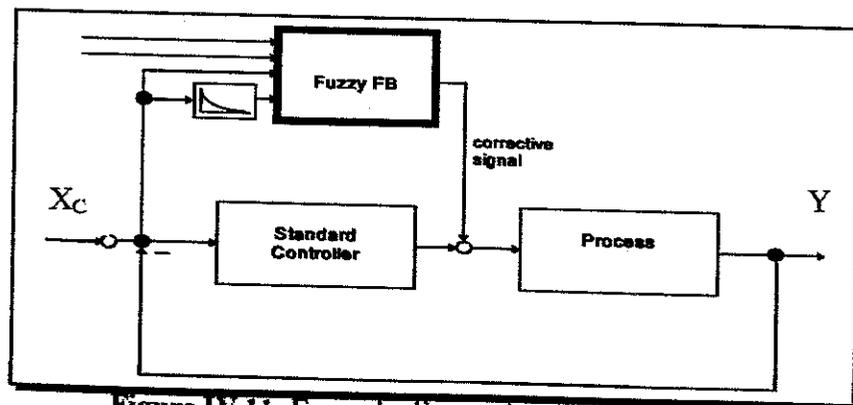


Figure IV.11. Exemple d'un pré-contrôle (anticipation)

☞ Enfin, l'exemple ci-dessus illustre le cas où on procède à une commande adaptative des paramètres d'un régulateur du type PID classique à l'aide d'un correcteur flou cf. Figure IV.12.

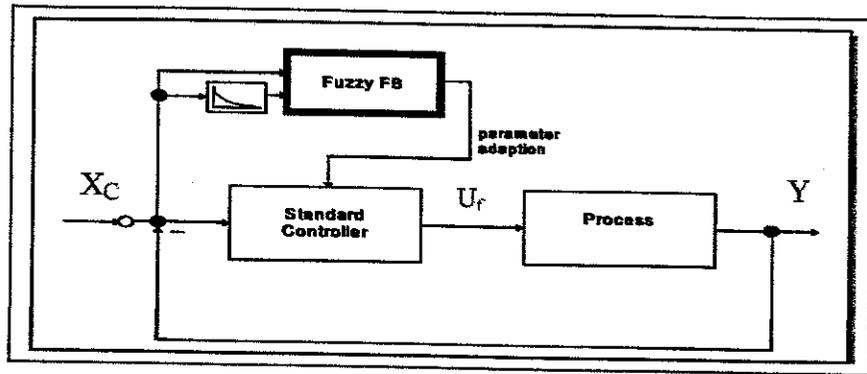


Figure IV.12.. Exemple d'un réglage flou d'adaptation de paramètres d'un PID conventionnel

La détermination de la commande par un régulateur flou s'effectue en trois étapes : la fuzzification, l'inférence et l'agrégation des règles puis, la défuzzification.

La fuzzification est le mécanisme réalisant l'interface entre une représentation numérique des entrées (les variables x et y) et une représentation floue. Cette étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque entrée aux différents sous-ensembles flous ($x : A1, A2$ et $y : B1, B2$).

L'inférence floue repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication (*min* ou *prod*) permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle « i » à partir des fonctions d'appartenance liées à la prémisse ($\mu_{A_i}(x)$ et $\mu_{B_i}(y)$) et à la conclusion ($\mu_{C_i}(z)$) avec « z » la sortie du régulateur).

L'inférence floue détermine pour la partie conclusion de chaque règle « i » une fonction d'appartenance $\mu_{C_i}(z)$. L'agrégation des n règles s'effectue à l'aide d'une conorme triangulaire (i.e. l'opérateur *max*) :

$$\mu_{C'}(z) = S_{i=1...n} [\mu_{C_i}(z)] \tag{5-1}$$

La défuzzification consiste à calculer une valeur numérique de la sortie, représentative de la valeur floue définie par $\mu_{C'}(z)$ [Ber.92]. Donc on cherche à déduire une action de commande, du résultat agrégé que l'on vient d'obtenir c'est-à-dire une caractérisation précise de Z qui représente au mieux la caractérisation floue. Pour ce faire, plusieurs méthodes sont disponibles. On utilise le plus souvent la méthode du *centre de gravité*. Cette méthode, de loin la plus coûteuse en puissance de calcul (cf. [Mok, Mar.98], page :100-103), rallie aujourd'hui tous les suffrages et donne les meilleurs résultats :

$$Z = \frac{\sum_k \mu_{C'}(z_k) * (z_k)}{\sum_k \mu_{C'}(z_k)} \tag{5-2}$$

avec $\mu_{C'}(Z_k)$ degré d'appartenance de l'élément Z_k à l'ensemble flou C' .

Lorsque la conclusion de chaque règle « i » est une valeur numérique Z_i , la sortie est calculée par la méthode de la moyenne pondérée :

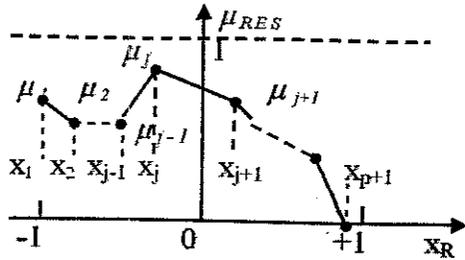
$$Z = \frac{\sum_{i=1...n} w_i * Z_i}{\sum_{i=1...n} w_i} \tag{5-3}$$

avec : w_i degré d'activation de la règle i
 n nombre de règles.

Il faut noter que la détermination de Z nécessite une envergure de calcul assez importante surtout pour l'exécution en temps réel.

Lorsque la fonction d'appartenance est composée par morceaux de droites comme c'est en général le cas lors du réglage par logique floue, il est possible de faire les intégrations

analytiquement. Avec les coordonnées x_j et μ_j des points d'intersection des «P» segments de droites (cf. fig. IV.13), l'abscisse du centre de gravité peut être calculée par l'expression suivante [Büh.94] :



$$X_R = \frac{\sum_{j=1}^p (x_{j+1} - x_j) [(2x_{j+1} + x_j)\mu_{j+1} + (2x_j + x_{j+1})\mu_j]}{3 \cdot \sum_{j=1}^p (x_{j+1} - x_j)(\mu_j + \mu_{j+1})} \quad (5-4)$$

Figure. VI.13. Coordonnées des points d'intersection des segments de droites de la fonction d'appartenance résultante (de sortie).

Pendant, la détermination des coordonnées x_j , μ_j des points d'intersection qui peut être faite en temps réel avant l'élaboration de la relation (5-4), nécessite un temps de calcul non négligeable.

IV.6. Les différents systèmes d'inférence floue

Dans les points précédents, nous avons vu la "fuzzyfication" des entrées et des sorties et l'établissement des règles liant les entrées aux sorties. Ainsi il nous reste un dernier problème à résoudre : Pour un état donné des entrées, plusieurs règles peuvent être validées simultanément et fournir des consignes différentes pour les sorties.

Il faut donc disposer d'une méthode de composition des règles pour obtenir la valeur finale des sorties. La composition des règles doit tenir compte de toutes les règles qui sont validées au prorata de leur degré de validité.

Le système d'inférence floue est composé de la base de règle, de la base de données (les paramètres des fonctions d'appartenance) et du raisonnement flou. Il existe au moins 3 types de composition des règles (cf. figure. VI.14. ci-dessous) : Il s'agit en fait d'appliquer le principe suivant déjà énoncé : Plus la condition d'une règle sur les entrées est vraie, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée

Dans la méthode de Mamdani, les prémisses et les conclusions des règles sont floues [Mam.75]. Cette méthode repose sur l'utilisation de l'opérateur *min* pour l'inférence floue et de l'opérateur *max* pour l'agrégation des règles. La défuzzification est généralement effectuée par la méthode du *centre de gravité*. Une variante de la méthode de Mamdani consiste à remplacer l'opérateur *min* de l'inférence floue par l'opérateur *prod* (produit).

Dans la méthode de Tagagi-Sugeno, les conclusions des règles sont des valeurs numériques calculées à partir des entrées [Tak.85]. L'inférence floue est réalisée avec les opérateurs *min* ou *prod*. La valeur finale est obtenue en effectuant une *moyenne pondérée* des conclusions.

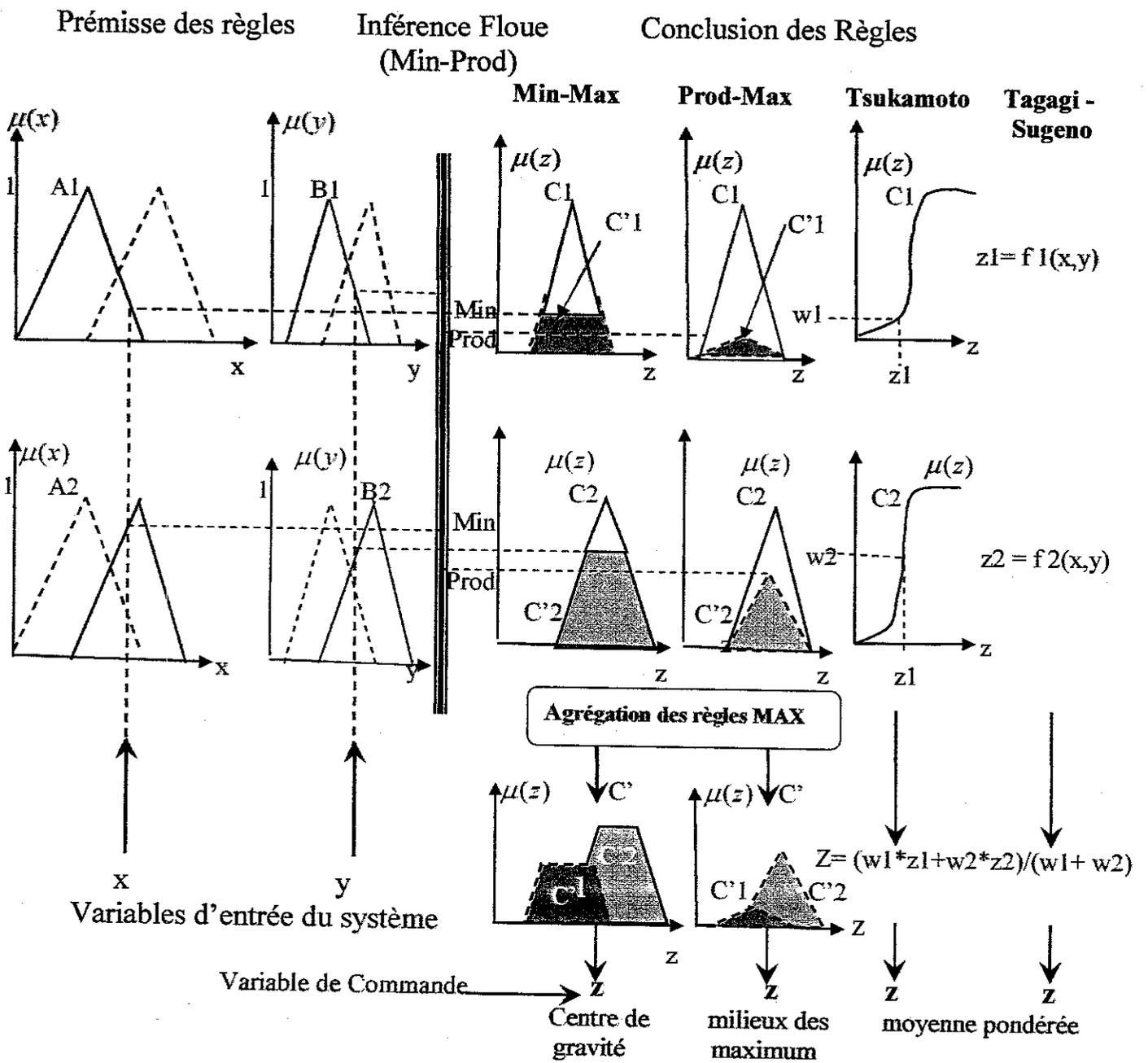


Figure IV.14.. Les différentes méthodes d'inférence et de défuzzification

Pour situer de telles applications, nous allons nous référer à un problème de réglage de tension.

IV.7. Opération de fuzzification

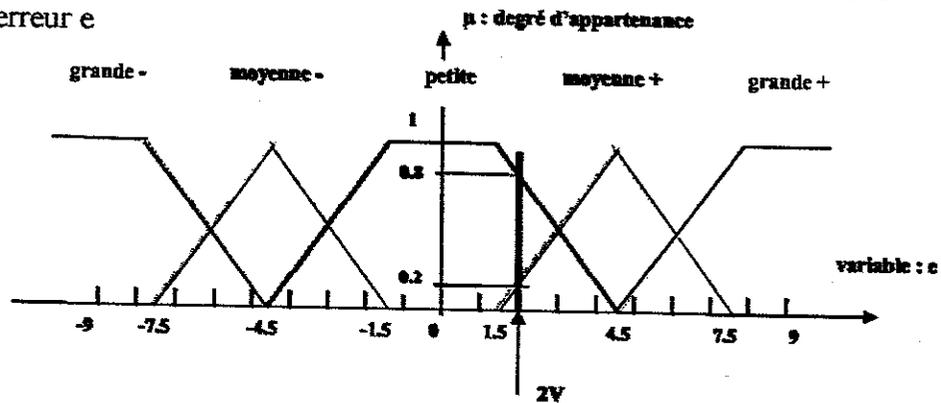
La fuzzification est une opération de quantification "floue" des paramètres d'entrées / Sorties du système à l'étude.

La grandeur d'entrée du contrôleur doit d'abord être *fuzzifiée*, c'est-à-dire que l'on va fixer les valeurs linguistiques ainsi que la forme des fonctions d'appartenance.

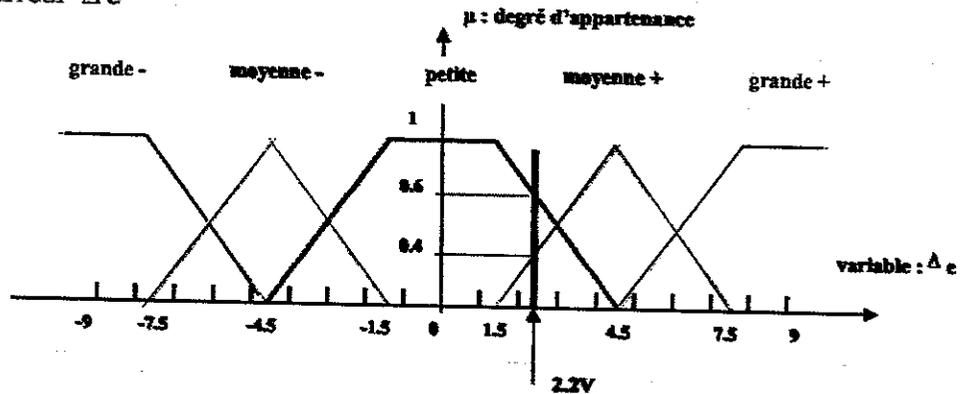
Cette opération doit être faite également sur la variable de sortie. Bien sûr cette sortie fuzzifiée n'est pas exploitable pour attaquer l'interface de puissance. Il faudra donc avoir en tête de faire une opération de « *défuzzification* » pour résoudre ce problème.

On va prendre un exemple où l'on va fuzzifier l'erreur (notée e), entrée du régulateur, mais aussi la variation de l'erreur (notée $\sim e$) et la sortie (notée s). Les valeurs de e de $\sim e$ sont mises à jour à chaque période d'échantillonnage. On passe pour cela par un convertisseur analogique numérique.

L'erreur e



Variation de l'erreur Δe



SORTIE S

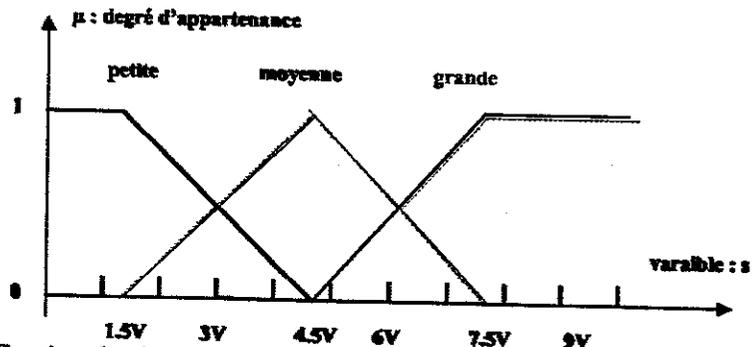


Figure IV.15. Fuzzification des 2 variables d'entrée et de la variable de sortie

L'entrée « e » a été *partitionnée* en 5 valeurs linguistiques ainsi que « $\sim e$ ». Elles peuvent être positives ou négatives.

La sortie « s » a été *partitionnée* en 3 valeurs linguistiques ; elle pourra n'être que positive (cas de la figure) dans le cas où la partie puissance est commandée par une tension (0, 10V) par exemple.

On a gradué les axes donnant la variation des variables en Volt pour faciliter la compréhension, mais en pratique les tests seront faits sur les valeurs échantillonnées des entrées (on passe par un CAN)

IV.8. Base de règles d'inférence

Le rôle de l'expert est ici présent car c'est lui qui va fixer les règles de la commande qui vont porter uniquement sur les valeurs linguistiques des variables.

Soit par exemple la liste de règles suivantes (qui résultent de la connaissance de l'expert) :

- R1 : SI (e) est petite ET ($\sim e$) est petite ALORS (s) est petite ;
- R2 : SI (e) est petite ET ($\sim e$) est moyenne + ALORS (s) est petite ;
- R3 : SI (e) est moyenne + ET ($\sim e$) est petite ALORS (s) est petite ;
- R4 : SI (e) est moyenne + ET ($\sim e$) est moyenne + ALORS (s) est moyenne ;
- R5 : SI (e) est grande + ET ($\sim e$) est moyenne + ALORS (s) est moyenne

Le tableau ci-dessous (Tableau IV.01.) représente la base de règles en donnant les valeurs de la sortie pour les différentes valeurs linguistiques de e et $\sim e$:

Tableau IV.01

$\sim e$	e grande -	moyenne -	petite	moyenne +	grande +
grande -		
moyenne -		
petite	(R1) s : petite	(R3) s : petite	...
moyenne +	(R2) s : petite	(R4) s : moyenne	(R5) s : moyenne
grande +		

Remarques:

- «SI (e) est petite» : constitue une *prémisse* de la règle
- «ET»: est appelé opérateur de *conjonction*
- «ALORS (s) est petite» : est appelé *implication* (conclusion) de la règle
- La liste des règles est appelée base d'inférence (inférence: opération logique par laquelle on admet une proposition en vertu de sa liaison avec d'autres propositions tenues pour vraies). On parle aussi de moteur d'inférence. Il n'est pas nécessaire que toutes les cases du tableau soient remplies.
- On peut trouver les règles énoncées critiquables, elles ne sont données qu'à titre d'exemples et doivent être adaptées en fonction de chaque processus.

IV.8.1. Mise en oeuvre de la base de règles

Supposons qu'à un instant « t » on ait les données suivantes : $e = 2 \text{ V}$ et $\sim e = 2.2 \text{ V}$;

Ces valeurs vont constituer des *faits* et à ce titre activer la base de règles. Il est facile de voir à partir de la figure donnant la fuzzification de «e» et « $\sim e$ » que les règles R1, R2, R3, R4 vont être actives puisque «e» et « $\sim e$ » sont à la fois petite et moyenne + (cf. Tableau IV.01). Il s'agit ici des valeurs *linguistiques* des variables.

Mais l'examen des figures montre aussi que l'on peut en déduire les degrés d'appartenance à chacune de ces classes à savoir :

- Pour « e » on a : $\mu_{\text{petite}} = 0.8$ et $\mu_{\text{moyenne +}} = 0.2$;
- Pour « $\sim e$ » on a : $\mu_{\text{petite}} = 0.6$ et $\mu_{\text{moyenne +}} = 0.4$.

On va donc étudier maintenant le rôle de chaque règle activée et voir concrètement comment on traduit les opérations de conjonction (ET) et d'implication (ALORS).

Pour traduire le ET (*c'est-à-dire la conjonction des prémisses*), on peut utiliser la fonction MIN : on prendra la valeur minimale des 2 degrés d'appartenance des prémisses. La signification physique de ce choix est de conserver l'information la plus sûre.

Le résultat est un nouveau degré d'appartenance au sous ensemble flou de la sortie. Ainsi pour R_1 , on a :

Le MIN de 0.8 et 0.6 est 0.6, donc pour (s) : $\mu_{\text{petite}} = 0.6$;

On fait ensuite la même chose pour toutes les règles activées et on obtient les résultats suivants pour la variable linguistique de sortie (s) :

- Pour R_1 : $\mu_{\text{petite}} = 0.6$; Pour R_2 : $\mu_{\text{petite}} = 0.4$;
- Pour R_3 : $\mu_{\text{petite}} = 0.2$; Pour R_4 : $\mu_{\text{moyenne}} = 0.2$;

L'opération n'est pas terminée car les 4 règles étant activées en même temps, il faut faire ce que l'on appelle l'agrégation des règles (l'assemblage)

Les règles R_1 , R_2 et R_3 concernent la même valeur linguistique «petite» de la variable de sortie alors que R_4 porte sur la valeur «moyenne». On utilise ici l'opérateur MAX, c'est-à-dire que pour chaque valeur linguistique de sortie concernée on va prendre la valeur maximum des degrés d'appartenance.

Le résultat de l'agrégation des règles donne donc la variable s «petite» avec un degré d'appartenance de 0.6 en même temps que «moyenne» avec un degré d'appartenance de 0.2.

A ce stade, on a donc la sortie définie sous forme linguistique avec des degrés d'appartenance précis. Il faut maintenant passer à une grandeur qui, elle, sera interprétable par l'interface de commande.

IV.9. Défuzzification

La figure ci-dessus (cf. Figure.IV.16.) indique comment on interprète l'agrégation des règles.

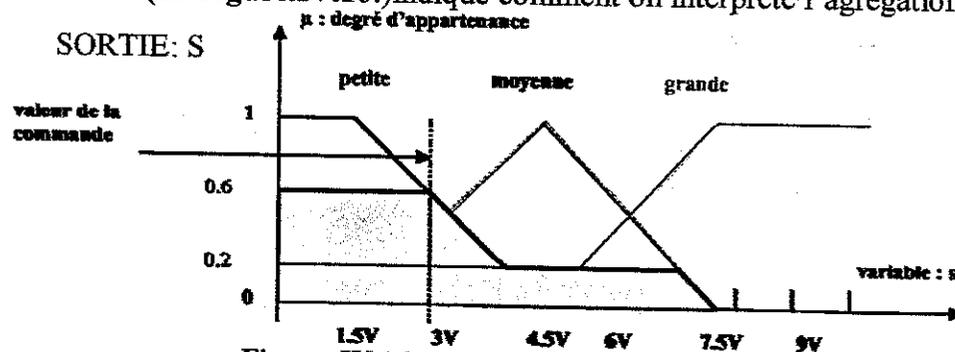


Figure IV.16. Agrégation des règles

Le sous ensemble «petite» est limité par le degré d'appartenance à 0.6 et le sous ensemble «moyenne» par 0.2 (on prend le MIN entre la fonction d'appartenance de la valeur linguistique de la sortie concernée et le le degré d'appartenance μ trouvé par l'agrégation des règles). On obtient ainsi toute la surface grisée. Pour obtenir le signal de commande à envoyer à l'interface, on utilise le plus souvent la règle «du centre de masse» c'est-à-dire que l'on calcule le barycentre de la surface pour obtenir la valeur de la commande.

IV.10. Implémentation du correcteur flou : [Ton.97]

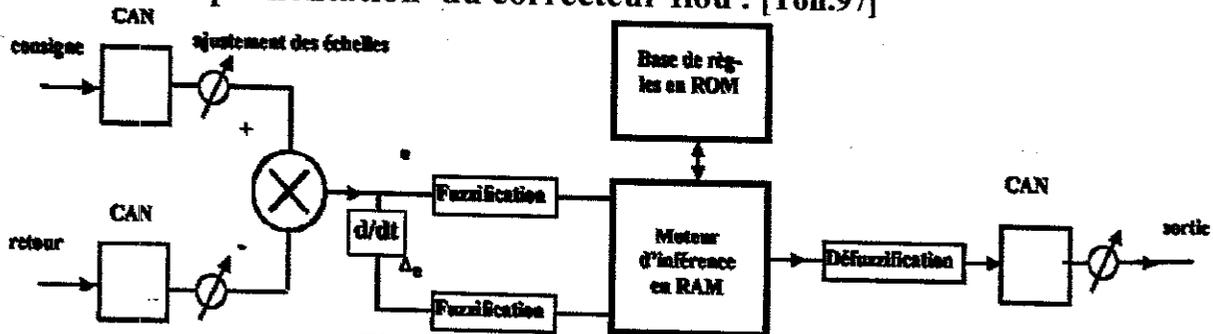


Figure IV.17. Configuration d'un correcteur flou.

La figure.IV.17. illustre la configuration d'un contrôleur flou dans son environnement.

Les grandeurs réelles consigne et retour sont numérisées avec des convertisseurs CAN puis l'erreur (éventuellement la variation de l'erreur) est fuzzifiée. La base de règles qui sera stockée en ROM sera activée et le moteur d'inférence permettra d'élaborer une sortie qui sera ensuite défuzzifiée et convertie en signal analogique.

IV.10.1. Conversion et traitement des paramètres mesurés

Souvent, les grandeurs mesurées d'un système à régler sont de type analogique, parfois aussi digitales. Pour les grandeurs analogiques, il faut d'abord prévoir une conversion analogique/numérique (CAN).

Les convertisseurs CAN sont jumelés avec un multiplexeur. Ils reçoivent les signaux analogiques provenant des chaînes de mesures. Lorsque ces signaux sont des tensions à haut niveau, ils sont appliqués directement au convertisseur analogique numérique (CAN) ; par contre s'ils sont de faible niveau, il faut les amplifier préalablement. La conversion CAN n'est pas instantanée.

La période de scrutation varie d'une voie (grandeur mesurée) à l'autre. D'une à dix secondes pour les mesures de pressions, elles passent de 10 à 30 secondes pour les mesures de débits de 0.5 à 5 minutes pour les températures....

Les informations recueillies sont généralement filtrées analogiquement pour supprimer les parasites à fréquence élevée. Les tensions engendrées par les capteurs sont liées, par des lois différentes et compliquées avec les grandeurs mesurées. C'est le cas pour les mesures de températures, de débits (le passage des unes aux autres s'opère par des interpolations linéaires ou polynomiales).

Pour les signaux de surveillance, le traitement se réduit souvent à la comparaison des mesures avec des seuils admissibles. Toutefois, les alarmes sont déclenchées, en général, que lorsqu'un dépassement est constaté au cours de deux ou de trois scrutations successives. Enfin, on supprime les battements de signaux d'alarme qui risque de se produire lorsqu'une grandeur évolue au voisinage d'un seuil, en introduisant une hypotension dans l'algorithme de comparaison.

On peut constater que dans son principe même le contrôleur à logique floue n'est pas linéaire.

En effet l'activation des règles d'inférence n'est pas un processus linéaire pas plus que la traduction mathématique que l'on en donne (algorithme MAX-MIN).

On a utilisé ici l'algorithme MIN-MAX (i.e. MIN pour la conjonction des prémisses et l'implication des règles, MAX pour l'agrégation des règles). Mais, il existe d'autres possibilités : on peut par exemple utiliser l'algorithme PROD-MAX (PROD pour la conjonction des prémisses et l'implication des règles, MAX pour l'agrégation des règles) c'est-à-dire que l'on fait le produit des degrés d'appartenance obtenu avec chaque règle pour définir le degré d'appartenance pour la sortie.

Il existe un autre type de contrôleur flou dit de type "Sugeno". Les prémisses des règles sont aussi linguistiques mais les conclusions sont élaborées directement sous une forme polynomiale avec des coefficients définis à l'avance. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il est possible d'introduire des algorithmes d'apprentissage pour adapter les coefficients. C'est ainsi qu'il existe des contrôleurs flous adaptatifs. La technologie des réseaux de neurones peut être utilisée pour l'apprentissage.

IV.11. Application de la logique floue

Parmi les applications de la logique floue dans la conduite de procédé, on peut citer :

- la régulation de température de certains procédés ;
- la gestion de batteries d'ascenseurs ;
- la transposition en flou du classique régulateur P.I.D. (proportionnel intégral différentiel), analogique, sujet au phénomène de saturation lorsque l'écart entre la consigne et le signal de contre-réaction est important (un P.I.D. analogique saturé se comporte comme un régulateur

tout ou rien dont l'amortissement est faible) ; en réalisation « flou », l'amortissement du P.I.D. est assuré même en cas d'écart important ;

- plusieurs prototypes de commande automatique et personnalisée de boîtes de vitesses d'automobiles ;
- le pilotage de rames de métro et d'hélicoptères.

IV.12. Conclusion

Nous avons vu tout au long de cette IV^{ème} partie que la logique floue repose sur des fondements théoriques établis dans de multiples publications internationales par des chercheurs de la plus haute compétence ; elle n'est pas isolée dans sa recherche, mais des liaisons ont été établies avec d'autres axes tel que l'automatique classique pour ne citer que cela.

En se référant à la structure générale des processus d'action, on constate que l'automatique linéaire traite efficacement des processus dynamiques linéaires que l'on peut décrire notamment par des équations différentielles, alors que la logique floue est dédiée aux processus que l'on ne sait décrire que par une expertise linguistique imprécise, donc elle a pour objectif la modélisation symbolique et la commande de processus dynamiques non linéaires. On remarque aussi qu'il est concevable d'introduire la notion de flou dans l'information de commande et ses critères, son traitement ainsi que le modèle. En revanche, il est habituel que l'information d'état provenant de capteurs soit non floue, de type numérique ou analogique. Il y a donc passage du flou au non-flou.

La transposition de cette structure au cas où l'information de commande, les critères et le modèle sont flous s'applique à la notion de bases de connaissances en intelligence artificielle dans la commande des processus.

La commande floue est plus rapide et plus efficace dès lors que la modélisation est très complexe ou incertaine et qu'elle peut être remplacée par ce que l'on pourrait appeler des témoignages d'experts, et que l'on ne dispose que d'informations imprécises. On constate aussi qu'elle est moins sensible aux perturbations, plus économe en énergie que la commande classique.

Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et est utilisée dans de nombreux produits "grand public" notamment au Japon. Ses applications touchent tous les domaines parce que elle s'efforce d'apporter des solutions à un problème-clef de toutes les réalisations pratiques : d'une part l'appréhension du comportement réel des procédés industriels est imparfaite en raison de leur très grande complexité, d'autre part leur représentation doit à la fois conserver suffisamment d'information pour estimer parfaitement les données réelles et la simplifier pour être manipulable efficacement. Sa mise en oeuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils de développement dont la puissance aujourd'hui, ne pose plus de problème pour l'implémentation de cette technologie.

On peut citer par exemple [Obs.94], [Sug. & al. 92] la famille des processeurs 68HC12 de Motorola et WARP (Weight Associative Rule Processor) de SGS-Thomson dont les principales caractéristiques:

- Nombre de règles traitées : 256 ;
- Nombre d'entrées : 16 ;
- Nombre de sorties : 16 ;
- Méthode de composition des règles : Centre de gravité ;
- Vitesse de traitement : 200 microsecondes pour 200 règles.

Enfin la logique floue ne doit en aucun cas être considérée comme une panacée qui apporterait des solutions à tout problème posé, mais comme un outil supplémentaire mis à la disposition de tout ingénieur ou chercheur qui doit s'en saisir si les objectifs de son sujet d'étude lui semblent adaptées à l'utilisation de cet outil et une alternative valable au réglage conventionnel

Chapitre V

Approche Floue pour la Conduite du Procédé de Séchage des Produits Céramiques

V.1. Introduction

Commander un processus implique la connaissance des différents paramètres qui peuvent influencer sur ce dernier et agir en conséquence dans le but de contraindre ce même système à atteindre l'objectif désiré. Malheureusement, cette connaissance est très souvent entachée d'incertitudes et d'imprécisions qui accompagnent toute démarche d'élaboration de modèles mathématique d'un système. L'existence d'un couplage entre les grandeurs du processus rend encore la conduite plus difficile : alors, peut-on dans ces conditions commander convenablement ce système? Ou bien, peut-on éviter les 'pièges' de la modélisation !?

On sait aussi que beaucoup de procédés peuvent être commandés de façon satisfaisante quant à la qualité du produit séché à l'aide de régulateurs PI ou PID si le point de fonctionnement est maintenu. Cependant, dans des installations complexes à plusieurs dizaines de régulateurs, il devient très ardu, voire impossible de maintenir en permanence le processus les régulateurs bien ajustés. En plus dans le cas [Ber, Imb.03] de changement de régime de grande amplitude, ou d'incident, il y a nécessité de reprise en manuel, donc recours à l'opérateur, les défauts pouvant être signalés mais non supprimés.

L'expérience montre que le réglage de ces PID reste très empirique et largement sous-optimal. Vu qu'un régulateur PID a plusieurs paramètres, n'est pas toujours facile à ajuster, surtout si la dynamique du procédé est très lente, ce qui est le cas de notre séchoir.

Les causes de cette situation résident dans la difficulté de traduire dans les modèles de commande les fortes variations des caractéristiques du produit ainsi que les couplages physiquement évidents entre les boucles, mais aussi dans l'absence d'une stratégie adaptée aux incidents possibles, pendant lesquels le comportement se modifie en permanence.

Par ailleurs, avec l'exigence croissante en efficacité dans la consommation d'énergie et de matières premières, la nécessité d'utiliser d'autres régulateurs plus complexes que les PID s'est imposée. De tels régulateurs, pouvant inclure des actions prédictives, des retours d'état, ou autres, peuvent souvent comporter plusieurs paramètres ajustables.

Il est également apparu au cours du développement de la théorie moderne de la commande automatique qu'un régulateur fixe ne peut pas conduire à un comportement acceptable du système dans toutes les situations [Sal.97]. En particulier, si le procédé à commander est à paramètres inconnus ou variables dans le temps, la synthèse d'un régulateur fixe répondant toujours aux spécifications désirées n'est pas chose évidente.

L'une des solutions préconisée en général est l'utilisation de commandes qui ajustent automatiquement, en temps réel le modèle du processus à commander par des algorithmes appropriés et de déterminer les paramètres ou la structure du régulateur numérique en fonction des variations de ceux du système, ceci relève du domaine de la commande adaptative.

Deux techniques particulières sont communément appelées méthodes avancées de régulation, s'inscrivent dans cette catégorie : la commande floue et celle à structure variable.

Les deux techniques sont nées au courant des années soixante, la première est basée sur les travaux du mathématicien Lotfi Zadeh [Zad.65], [Zad.73], [Zad.83] de l'Université de Berkeley,

et est basée sur la *théorie de sous-ensembles flous*. Les contrôleurs flous sont construits autour d'un organe de décision manipulant des concepts imprécis et subjectifs comme ceux du langage courant. Cette approche offre une insensibilité aux incertitudes sur les paramètres du processus et offre une issue originale pour le traitement des problèmes de la conduite des procédés.

Quant à la seconde méthode, elle a été élaborée par A.F. Philipov, mathématicien russe, et est caractérisée par des commutations autour d'une hypersurface de l'espace de phase appelée *surface de glissement*. Appliquée à des systèmes de commande appelés, *systèmes à structure variable (ssv)*, dont les paramètres des régulateurs varient par à coups, elle leur confère une stabilité et une précision supérieure à celle des régulateurs linéaires classiques (P.I.D). Mais cette dernière approche, comme d'autres d'ailleurs, reste tributaire de modèles mathématiques souvent complexes.

Il faut noter ici [Ber, Imb.03] que sur de telles installations, l'étude expérimentale du système non bouclé à partir de signaux de forme mathématique connue (échelons, séquences binaires pseudo-aléatoires) appliqués aux actionneurs ne fournit pas de renseignements suffisamment significatifs pour déterminer un modèle de comportement global. C'est une des raisons qui limite la validité des politiques de commande classique à un domaine autour d'un point de fonctionnement.

Dans le but de contourner toutes ces imperfections (complexité, imprécisions, incertitudes etc.), nous nous sommes orientés vers une stratégie de conduite par la logique floue basée principalement sur un modèle linguistique de l'installation étudiée.

Par conséquent, le problème qui nous intéresse ici est celui de la gestion de l'imprécision et de l'incertitude sur des informations qui peuvent être numériques ou symboliques. Un système d'inférence floue peut être vu comme un système multivariable. Même si l'esprit de la commande floue est de choisir ces paramètres par recours à "l'expertise humaine", une démarche logique est de se servir de cette expertise comme initialisation (introduction de connaissance a priori), mais de rajouter encore à cela, une étape d'optimisation supervisée. Un SIF est un système de nature locale (seules quelques règles sont activées pour un vecteur d'entrée donné) dans lequel la signification des paramètres est très forte.

Dans cette partie de l'étude nous traitons de l'application des principes de la logique floue à la réalisation d'un contrôleur de processus thermique se déroulant à l'échelle d'un séchoir à céramique. Nous nous intéressons donc à la commande de la température et de l'humidité dans l'enceinte du séchoir.

Ainsi, nous établissons, dans un premier lieu, le modèle symbolique du séchoir, suivi de dimensionnement du contrôleur. Il est simulé et validé ensuite le fonctionnement du contrôleur pour chacun des réglages dans l'environnement Delphi. La dernière partie de cette synthèse (cf.V.5.4.) concernera l'implémentation sous l'environnement Matlab et ce, en vue d'obtenir ne serait-ce qu'une idée sur le comportement dynamique du contrôleur en se basant sur des données de la littérature [Mar, Sla.88]. Enfin, nous proposons une mise en œuvre sur API pour la commande de l'installation.

V.2. Conception du correcteur à logique floue

V.2.1. Etude du système à régler et nécessité d'un correcteur flou, (cf. détails dans Chap. I)

La phase de séchage est très importante, car en entrant dans les chambres, le produit rouge est encore mou et doit éviter toute déformation. Il est nécessaire de prévoir un fonctionnement selon trois phases : ventilation des produits sans *apport calorifique* pendant un certain temps dit "temps d'attente", ventilation des produits avec apport calorifique variable jusqu'au séchage désiré en suivant des *profils d'hygrométrie et de température* et enfin, ventilation des produits avec *apport calorifique variable* pour préparer le produit en attente de cuisson.

La briqueterie possède un ensemble de 17 chambres de séchage. Chaque chambre contient 3960 briques et est équipée de ventilateurs de brassage assurant une circulation d'air, de vantelles

(registres) permettant l'admission, l'extraction ou le recyclage d'air chaud et de sondes de température et d'hygrométrie.

La mise au point d'un modèle physique statique s'est faite à partir d'une simulation reproduisant l'obtention du régime nominal du séchage, simulation calée sur les valeurs physiques données par le constructeur de l'installation du produit entrant et sortant à savoir température de l'air dans le manchon chauffant et dans la conduite d'extraction, hygrométrie de l'air à l'aspiration et à l'évacuation et dimensions du séchoir.

Le système constitué par les chambres de séchage présente plusieurs variables d'entrée et de sortie et n'est pas linéaire. Nous le considérerons par la suite comme un processus bivariable en envisageant un contrôle simultané des deux grandeurs : T°C et H% qui sont associées à des consignes évolutives dans le temps.

La logique floue permettant d'intégrer des données qualitatives dans la définition d'un contrôleur, elle correspond aussi à une algèbre des nombres définis non par leur valeur, mais par des intervalles avec des fonctions d'appartenance. Elle permet de prolonger des raisonnements quantitatifs dans des domaines où la connaissance est moins certaine, plus qualitative. Un de ses domaines privilégiés d'intervention est bien entendu le contrôle-commande de procédés. Le régulateur flou proposé est basé sur des règles établies à partir de notre connaissance du procédé, ainsi que d'informations qu'on a pu recueillir auprès d'experts et d'opérateurs de l'entreprise de produits rouges. Nous avons choisi d'utiliser cet outil pour contrôler simultanément la température et l'humidité en tenant compte de l'influence de l'une sur l'autre.

V.2.2. Configuration du contrôleur flou

V.2.2.1. Algorithme proposé

La configuration de notre contrôleur est un peu particulière du fait que nous avons appliqué un partitionnement très fin des grandeurs de réglages, la température et l'humidité et ce, pour avoir une meilleure précision. L'autre contrainte est le temps qui intervient en qualité de paramètre primordial dans cette application.

Le correcteur à logique floue va nous permettre de tenir compte de l'interaction humidité-température tout en respectant les consignes du process, ce qui nous incite à énoncer la loi de commande qui s'exprime comme suit :

$$\Delta U(k) = f(H_m, T_m, t_c) ;$$

Où $-U$, représente le vecteur des actions qui sont au nombre de trois, $R_{adm}, R_{ext}, R_{rec}$.

$-H_m, T_m, t_c$, sont les grandeurs mesurées de réglage, humidité, température et le temps respectivement.

L'approche d'élaboration d'un contrôleur à logique floue nécessite plusieurs étapes pour sa mise en œuvre qui peuvent être énumérées comme suit :

- Calcul du degré d'appartenance :

$$\Omega_i^T = \mu_i(T(k)) \wedge \mu_i(\Delta T(k)) ; \text{ Dans le cas de l'erreur et de sa dérivée pour T°C.}$$

$$\Omega_i^H = \mu_i(H(k)) \wedge \mu_i(\Delta H(k)). \text{ Idem, pour le cas de l'H\%.}$$

Pour notre cas alors : $\Omega_i^{T,H} = \mu_i(T(k)) \wedge \mu_i(H(k)) ;$

- Trouver l'ensemble flou de la sortie du contrôleur :

$$f_i(\Delta U(k)) = \Omega_i^T \wedge \mu_i(U(k)) ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Dans notre cas, on a :} \\ f_i(\Delta U(k)) = \Omega_i^H \wedge \mu_i(U(k)) \\ f_i(\Delta U(k)) = \Omega_i^{T,H} \wedge \mu_i(U(k)) \end{array} \right.$$

- Trouver la sortie du système :

$$f(\Delta U(k)) = \vee_i f_i(\Delta U(k)).$$

- calculer le 'crisp', ou le sous ensemble non flou, de la sortie en utilisant l'une des méthodes de défuzzification connues (mom, centroïd, som, lom et bisector (centre of area)).

V.2.2.2. Identification des variables d'entrée et de sortie

Cette étape consiste à identifier toutes les entrées et les sorties susceptibles d'influencer le comportement du système de séchage. Dans notre cas, il est facile de cerner les variables qui influent sur le système. Les deux variables à régler sont les paramètres essentiels pour le séchage i.e la température et l'humidité et comme grandeurs réglantes, il s'agit là des trois variables portant sur la quantité d'énergie fournie par chacun des organes d'action à savoir :

- Registre d'admission (R_{adm}),
- //.... d'extraction (R_{ext}),
- //.... de recyclage (R_{res}).

V.2.2.3. Univers des discours

Ce dernier est borné par le profil d'évolution des variables process, entre la variable minimale et maximale admise et de même cela va de soit pour les valeurs de commande. Souvent, il s'avère nécessaire d'introduire une subdivision beaucoup plus fine pour les différentes variables linguistiques, mais le surnombre n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du processus. Par contre, une telle action compliquerait la formulation des règles d'inférences [Bûh.94] et alourdira le procédé de conduite du processus.

V.2.2.4. Définition des fonctions d'appartenance

A chaque terme linguistique défini dans l'univers de discours flou est attribué une fonction d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie. Il s'agit plus particulièrement du choix du nombre des ensembles, de la forme et de la distribution de ces dites fonctions. Un nombre très élevé (i.e. $\geq 3-5$) se justifie uniquement dans le but d'avoir des effets non linéaires mais très prononcés. Mais ce choix aura pour conséquence une augmentation considérable des lois d'inférences et surtout le temps de traitement du processeur. On a introduit d'une part, pour les variables à régler (i.e. T°C et H%) les qualificatifs linguistiques suivants : «Basse, bonne et élevée », et d'autre part, pour les grandeurs réglantes les qualificatifs suivants:

- DP : diminuer peu,
- DF : diminuer fortement,
- M : maintenir,
- AP : augmenter peu,
- AF : augmenter fortement,
- Z : 'Zéro' : aucune action sur les organes de commande (état permanent).

Ces fonctions d'appartenance seront utilisées avec une distribution uniforme.

V.2.2.5. Prise en charge du paramètre temps du déroulement du processus

Entre la 1^{ère} heure à la 16^{ième} heure de séchage, on agit sur les registres d'admission et d'extraction, tandis qu'entre la 16^{ième} et la 22^{ième} heure, on agit sur les registres d'admission et de recyclage.

V.2.2.6. Conception du moteur d'inférence

Les différents choix qui interviennent dans la construction d'un moteur d'inférence floue sont les fonctions d'appartenance des caractérisations des variables, l'implication floue, l'opérateur de modus ponens [Bou.95].

A ce niveau, on est amené à mettre au point un ensemble de règles qui modéliserait le comportement du système. Dans ce cas, elles vont exprimer la relation de «Cause à effet» entre les paramètres d'entrée et de sortie et formellement, elles s'écrivent comme suit :

- R1 : Si v_1 est π_{11} et v_2 est π_{12} alors w est β_1 ou
- R1 : Si v_1 est π_{21} et v_2 est π_{22} alors w est β_2 ou

Dans lesquelles $\pi_{11}, \pi_{21}, \dots$ (respectivement $\pi_{12}, \pi_{22}, \dots$) sont des sous ensembles flous de x_1 (respectivement de x_2) et représentant une partition floue des valeurs possibles prises par v_1 (respectivement v_2), et β_1, β_2, \dots sont des sous ensembles flous de y et représentant des valeurs possibles prises par w .

V.2.2.7. Architecture de la boucle de régulation floue

Le contrôleur flou fournit le signal de commande U_{cm} , il reçoit en entrée les informations tels que les valeurs de référence et les mesures de la température et de l'humidité fournies par des capteurs à la sortie du séchoir. Les informations sont traitées par le correcteur flou ce qui permet à ce dernier de fournir des commandes sur les organes d'action. La figure ci-dessous illustre l'architecture de conduite par le contrôleur à logique floue.

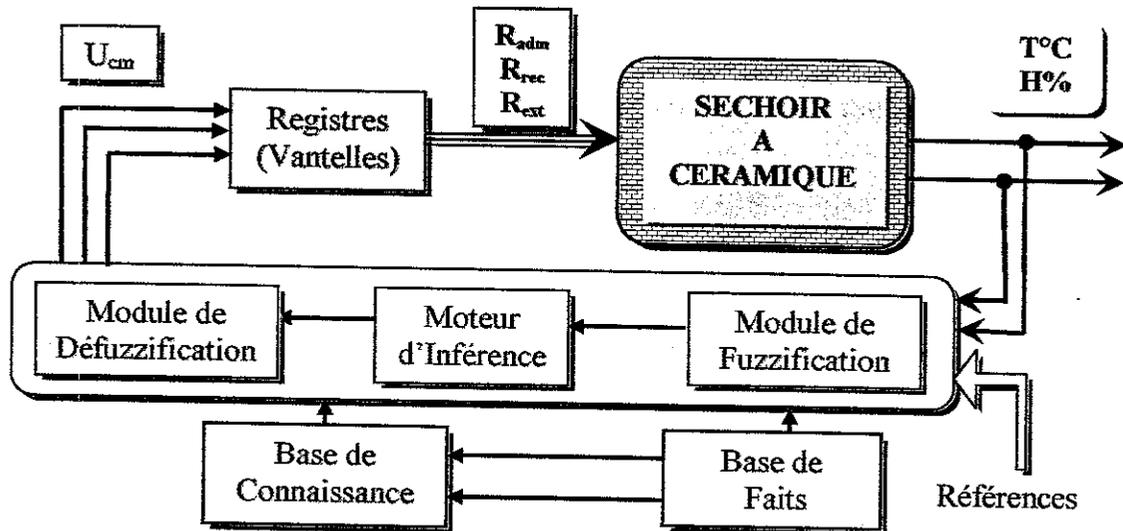


Figure V.1. Structure de base du contrôleur flou.

- Les grandeurs réglantes sont représentées par le vecteur de commande agissant par des actions appropriées sur les registres, soit par :
 - ◆ L'ouverture ou la fermeture du registre d'admission : R_{adm} ,
 - ◆ -----//-----//-----//-----//-----d'extraction : R_{ext} ,
 - ◆ -----//-----//-----//-----//-----de recyclage : R_{rec} .
- Les grandeurs à régler sont représentées par le vecteur des deux paramètres process suivants :
 - La température du produit à la sortie de l'installation ;
 - L'humidité -----//-----//-----//-----//---

V.3. Construction du correcteur flou

On distingue les trois parties essentielles suivantes en vue d'élaboration d'un correcteur :

V.3.1. Module de fuzzification

La première étape du traitement d'un problème par la logique floue consisterait donc à modéliser chacune des entrées du système par des courbes donnant les degrés d'appartenance à différents états identifiés pour ces entrées. Cette étape de quantification "floue" des variables se résume en la définition des différentes bornes des sous-ensembles d'appartenance. Elles sont déterminées expérimentalement, car elles sont liées au déroulement du processus à étudier.

La fuzzification donc, est la transformation d'une grandeur physique (réelle) en une grandeur linguistique (valeur floue).

La détermination [Bou.95] des fonctions d'appartenance fait partie de la phase d'acquisition de connaissance. Ces fonctions sont formées de figures géométriques de distribution symétriques, équidistantes avec chevauchement. L'expérience montre que la forme des courbes utilisées (trapèzes, courbes paraboliques, forme en cloche...) influe relativement peu sur le résultat. Il est donc raisonnable dans la majorité des cas, de considérer des fonctions triangulaires ou trapézoïdales, qui simplifient leur traitement et permettent la mise en œuvre d'algorithmes rapides pour le modus ponens.

On remarque que [Rai.97] les courbes se recouvrent à moitié. Ce chevauchement est tout à fait souhaitable et il montre que lorsque les valeurs changent, elles ne passent pas brutalement d'une catégorie à une autre, mais d'une manière graduelle. Ce chevauchement sera en outre une garantie de réglage très rapide et une stabilité des asservissements basés sur la logique floue.

Ceci dit, pour la définition des variables process nous adoptons les fonctions suivantes pour :

- ♦ Les entrées :
 - La forme triangulaire pour l'humidité,
 - ----//--- trapézoïdale pour la température.
- ♦ Les sorties :
 - La forme trapézoïdale pour les registres d'admission, de recyclage et d'extraction

Exemple de fuzzification des variables process du séchoir :

La fuzzification de la variable d'entrée température à la 1^{ère} heure du cycle de séchage est représentée par la figure.V.2 dans l'étendue [28 – 29,295]°C.

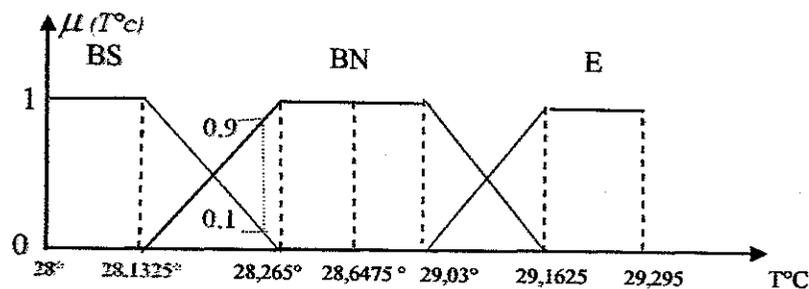


Figure V.2 Distribution de la fonction d'appartenance associée à la variable de conduite T°C sous forme trapézoïdale.

La fuzzification de la variable d'entrée humidité à la 1^{ère} heure du cycle de séchage est illustrée par la figure.V.3 dans l'étendue [25,7492 – 25,89]%. En ce qui concerne les grandeurs de sortie,

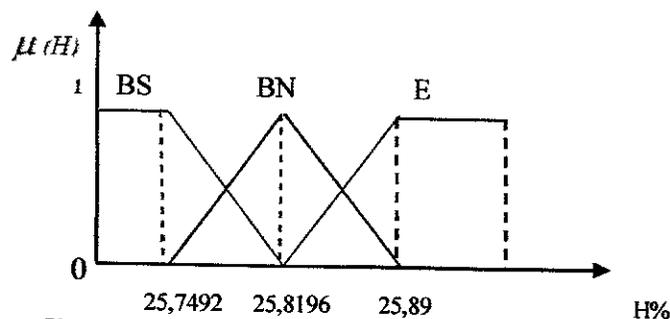


Figure V.3 Distribution de la fonction d'appartenance de la variable H% sous forme triangulaire

elles ont été symbolisées par une trapèze sur une plage de 0 à 10 (cf.fig.V4), représentant ainsi en pourcentage d'ouverture ou de fermeture des différentes vannes et ce, en réponse à une sollicitation du correcteur flou lors d'un dépassement quelconque de seuil des grandeurs d'entrée.

lie les différentes règles est réalisé par l'agrégation de ces règles, opération qui doit aboutir à une seule valeur de la variable de sortie, se fait par l'application de l'opérateur Max.

b) Matrice des lois d'inférences

Le découpage des intervalles selon la désignation standard des ensembles flous a été défini sur la base des données recueillies à l'usine et sur le modèle élaboré dans le chapitre I, ainsi :

Elevée ⇒ E ; *Basse* ⇒ BS ; *Bonne* ⇒ BN ; *Augmenter* ⇒ A ; *Diminuer* ⇒ D ;
Peu ⇒ P ; *Fort* ⇒ F ; *Maintenir* ⇒ M ; 'Zéro' ⇒ Z (état permanent).

La matrice des lois d'inférences représentant les valeurs mesurées des grandeurs d'entrées et celles de commande ainsi que la période de séchage, est illustrée par le tableau V1 ci-dessous.

Tableau V1. Matrice des lois d'inférence : Variation des commandes en fonction des mesures de T°C et H% du séchoir à céramique.

Temps en Heures de Séchage	N° règle	MESURES		COMMANDES		
		T _m °C	H _m %	R _{adm}	R _{ext}	R _{rec}
de 01 à 16	01	BS	BS	AP	DP	Z
	02	BS	BN	AP	DP	Z
	03	BS	E	M	AF	Z
	04	BN	BS	M	DF	Z
	05	BN	BN	M	M	Z
	06	BN	E	DP	DP	Z
	07	E	BS	DP	DP	Z
	08	E	BN	DP	DP	Z
	09	E	E	DP	DP	Z
de 16 à 22	10	BS	BS	AP	Z	DP
	11	BS	BN	AP	Z	DP
	12	BS	E	AP	Z	DP
	13	BN	BS	AP	Z	DP
	14	BN	BN	M	Z	M
	15	BN	E	M	Z	AP
	16	E	BS	AP	Z	DP
	17	E	BN	AP	Z	DP
	18	E	E	AP	Z	DP

V.3.3 Procédé de défuzzification

La défuzzification est [Bou.95] une procédure consistant en la recherche d'un élément de X qui représente au mieux le sous-ensemble flou, c'est à dire d'un sous ensemble de X réduit à un singleton ou bien encore l'élément crisp basé sur la connaissance de la valeur floue de la variable de sortie Z si :

$$Z = defuzzifier(f(Z)) ;$$

Où, f(Z) est l'ensemble flou Z et est le 'crisp' de sortie, avec 'defuzzifier' l'opérateur de défuzzification.

Donc, ce bloc convertit les sorties floues du moteur d'inférence en valeurs réelles numériques.

Comme opérateur de défuzzification, nous avons opté pour la méthode des barycentres [Zad.65], [Mam.75]. Elle calcule le centre de gravité de la surface obtenue après l'étape d'inférence et le projette sur l'axe horizontal. On réalise ainsi la moyenne de toutes les valeurs de la variables de sortie, chacune pondérée par son degré d'appartenance i.e. la commande à

appliquer est la valeur de l'abscisse du centre de gravité x^*_R de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{res}(x)$ (cf. figure V.5. ci-dessous et Chap. IV figure.13). Donc, cette méthode est plus précise, car toutes les valeurs de l'univers de discours interviennent plus ou moins fortement suivant le degré d'appartenance.

Comme résultat de défuzzification prenons l'exemple dans le cas où on est dans le premier cycle de séchage. La figure V.5. résume la réalisation de deux variables de commande à savoir, les registres d'admission et d'extraction, obtenue suite au déclenchement des deux premières règles :

- R1 : Si (T°C *basse* ET H% *basse*) Alors (*dimp* Rext ET *augp* Rad) Ou
- R2 : Si (T°C *basse* ET H% *bonne*) Alors (*dimp* Rext ET *augp* Rad).

La détermination de l'abscisse du centre de gravité x^*_R nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel [Mok, Mar.98]. Les fonctions d'appartenance résultantes obtenues sont composées par morceaux de droites, comme c'est en général le cas lors du réglage par la logique floue. Avec les coordonnées x_j et μ_j des points d'intersection des p segments de droites, l'abscisse du centre de gravité peut être calculée par la relation suivante [Bûh.94] :

$$x^*_R = \frac{\sum_{j=1}^p (x_{j+1} - x_j) [(2x_{j+1} + x_j)\mu_{j+1} + (2x_j + x_{j+1})\mu_j]}{3 \cdot \sum_{j=1}^p (x_{j+1} - x_j)(\mu_j + \mu_{j+1})}$$

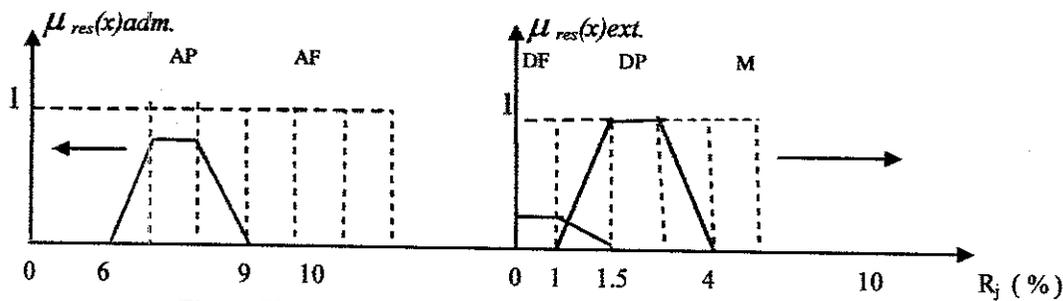


Figure.V.5. Défuzzification des deux registres Rad et Rext pour la 1^{ère} heure.

Les valeurs de défuzzification calculées par le contrôleur flou sont des valeurs de correction qu'il faut appliquer sur les registres d'admission, d'extraction ou de recyclage. Ainsi, pour chaque heure de séchage pour chaque chambre, le correcteur flou procède à une comparaison des grandeurs mesurées (i.e. T°C, H%) dans l'enceinte du séchoir à leurs valeurs de référence calculées au fur à mesure par simulation du comportement global du séchoir (cf. chapitre I et II). Tout écartement des paramètres de leurs coordonnées de référence incite le contrôleur à déclencher de nouvelles commandes les obligeant ainsi à suivre leurs trajectoires de consigne prédéfinies.

Enfin, on va pouvoir constater lors de la validation, que la commande floue conduit, dans les conditions de fonctionnement normales (i.e. point de fonctionnement et paramètres de process invariants), à des performances équivalentes, si ce n'est meilleures, à celles de la commande conventionnelle.

En général il est reconnu que la robustesse des partitions floues vis à vis des différentes sources d'erreurs est très appréciable en comparaison avec les partitions booléennes [Ped.93].

V.4. Implémentation de l'algorithme de conduite

Les moyens matériels les plus récents utilisés pour automatiser le fonctionnement des procédés à feu continu font largement appel aux microprocesseurs. Toutefois, on peut remarquer que ceux-ci sont généralement utilisés pour gérer l'information (télétransmission, gestion de l'affichage, interfaces avec les opérateurs, etc.), les algorithmes de commande proprement dits étant le plus souvent du type P.I.D. [Naj, Mur.83]. Il est étonnant de constater que les possibilités de calcul des microprocesseurs ne sont pas plus souvent exploitées pour implanter des algorithmes de commande plus performants. Plusieurs raisons peuvent être invoquées en vue d'expliquer cet état des choses. Toutefois, dans plusieurs applications, l'adoption d'algorithmes plus évolués de type intelligent comme c'est le cas des correcteurs à logique floue doit forcément conduire à des améliorations notables des performances des procédés industriels.

On constate régulièrement que très peu de stratégies de contrôle trouvent des applications immédiates dans le monde très réticent de l'industrie, car la mise en œuvre est très laborieuse (i.e. temps et difficultés liés à l'outil industriel).

Dans le même but, il existe à l'étape actuelle plusieurs outils de développement très efficaces.

La plupart de ces programmes tournent sur les plateformes les plus diverses. Les fonctions, les lois et les méthodes d'inférences et les procédés de défuzzification peuvent être imposés d'une façon interactive puis compilés. Il est aussi possible de modifier les programmes pendant la mise au point sur l'installation. Les liaisons PC-procédé sont réalisées par des cartes interfaces. Il existe même des processeurs dédiés à la logique floue. Ces moyens permettent dans la plupart du temps d'intervenir en temps réel sur les fonctions ou les lois d'inférence sans stopper l'installation, ce qui permet de déterminer une stratégie de commande fiable.

V.4.1 Implémentation et simulation du correcteur flou sous l'environnement Delphi

Les raisons de ce choix sont essentiellement la convivialité du langage et sa simplicité.

L'objectif de cette mise en œuvre n'étant pas l'obtention d'un outil professionnel mais beaucoup plus le test de faisabilité de cette approche.

Dans cette partie, nous allons décrire le mode de fonctionnement de l'application réalisée, ainsi que l'environnement de son développement et les structures de données utilisées pour son implémentation.

V.4.1.1. Schéma d'implémentation en tant que simulateur (cf. figure V.6, ci dessous)

Ce simulateur comporte un module d'introduction de données utilisant des menus. Utilisé sur micro-ordinateur, il permet la simulation d'un cycle de 22 heures. Les résultats de simulation sont disponibles par affichage à l'écran sous forme de graphiques d'évolution ou fichiers-tableaux des paramètres tels que :

- la température et l'humidité au courant de tout le cycle ;
- les débits d'air et de fumées ainsi que d'autres paramètres du bilan énergétique.

Le simulateur fournit également le bilan énergétique à la fin de la période de chauffe. Ce bilan s'établit comme sur le tableau II.05 (cf. chapitre II), où on constate l'importance du rejet énergétique dans les différentes fumées. La température de la charge suit de très près la consigne.

Les mesures provenant du processus sont traduites en degré d'appartenance à une ou plusieurs classes (BA, BN, E etc.) et à l'aide de la matrice des lois d'inférence, le programme actionne une ou plusieurs commandes. La valeur définitive de la commande est ensuite calculée par la méthode des barycentres. Comme les commandes sont des écarts, sauf en cas d'incidents graves sur la ligne de production où, la température ou l'humidité peut quitter sa plage de variation, car le contrôleur n'est pas programmé à gérer ce type d'aléas.

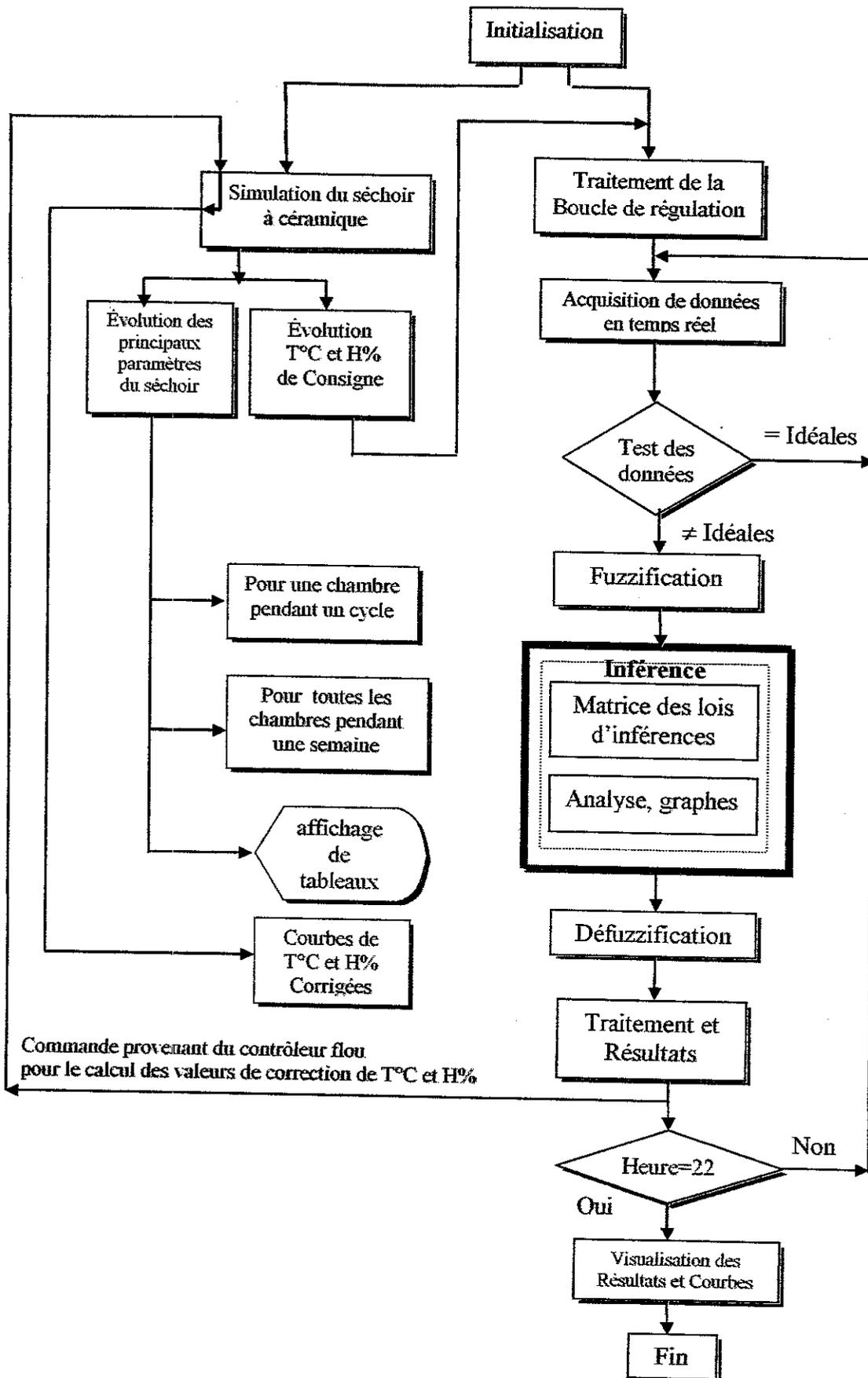


Figure V.7. Organigramme Principal de la Conduite et de Simulation du Séchoir à Céramique.

V.4.1.6. Résultats de simulation et validation du modèle symbolique avec celui simulé

Les profils de T°C et H% obtenus illustrent la réaction efficace du régulateur flou en qualité d'organe de couplage entre les deux grandeurs en les faisant varier simultanément lorsqu'il y a variation de la quantité d'énergie apportée par les fumées sans provoquer pour autant, un comportement de saturation pouvant être fatal aux organe d'action dont le nombre s'élève à 51.

Ainsi, le contrôleur implémenté nous a permis d'avoir une conduite stable non résolue par les régulateurs classiques (cf. chapitre .II) déjà existants et ce, en prenant en considération le phénomène extrêmement contraignant à savoir, l'interaction entre la température et l'humidité.

V.4.2. Implémentation sous l'environnement Matlab

Matlab est un produit développé par la société MathWorks. Conçu à la base pour être un environnement de calcul scientifique et de visualisation de données, c'est aujourd'hui un langage de programmation complet possédant les fonctionnalités des approches récentes de l'orienté objet, basé sur des hiérarchies des classes, et événementielle du graphisme dans un environnement de développement intervenant dans presque tous les domaines de la pratique scientifique de l'ingénierie et ce, en manipulation interpréteur ou compilateur.

V.4.2.1. Elaboration des règles d'inférence et des fonctions d'appartenance des variables

Il s'agit à présent, pour l'implémentation, de définir le contrôleur flou en faisant appel à l'éditeur graphique où la composition des opérations 'min-max' sera utilisée. En pratique elle est de loin la plus usitée du fait de sa simplicité de mise en œuvre du moment qu'elle se résume à la comparaison et des affectations. Cela demande beaucoup moins de temps machine lors de son exécution en temps réel sur un système programmé. Pour les mêmes raisons, l'implication 'min' sera utilisée et la méthode d'agrégation sera celle du 'max'.

Les règles sont généralement écrites sous forme d'un tableau matriciel (cf. Tableau V.1) représentant en fait une loi surfacique de déroulement de processus de séchage, définie à partir des variables T°C et H%.

Chaque conclusion C(i,j) (i.e. matrice des lois d'inférence) correspond à un point de la surface. Le reste de la surface est calculée localement par interpolation des quatre points les plus proches. Le maillage de la surface est d'autant plus fin que le nombre de règles est plus élevé.

Les variables de sortie i.e. les différents registres sont des combinaisons des conclusions C(i,j) de chacune des 18 règles adoptée

Cette étape achevée, il nous est possible de vérifier le fonctionnement de notre correcteur flou à l'aide de des fonctions de visualisation des surfaces ou des règles

V.4.2.2. Représentation dans l'espace d'état tridimensionnel des lois d'inférence (surfaiques)

Nous allons faire appel à une représentation de la fonction $R_j = f(T^{\circ}c, H\%)$ dans l'espace d'état tridimensionnel avec les coordonnées : registres, température et humidité. Cela devrait nous donner une meilleure idée sur l'allure de leurs caractéristiques prises séparément surtout si elles ont des formes complexes. On notera ici que la projection spatiale est plus difficile à imaginer.

En effet, il faut noter que les lois surfaiques, de pratiquement tous les registres, sont voûtées et

convergent aux extrémités à T°C = 60° et H% = 0 pour Rext, et T°C = 55° et H%= 80% pour Rad cf. figure V.16. par exemple vers des valeurs minimales de ces deux commande.

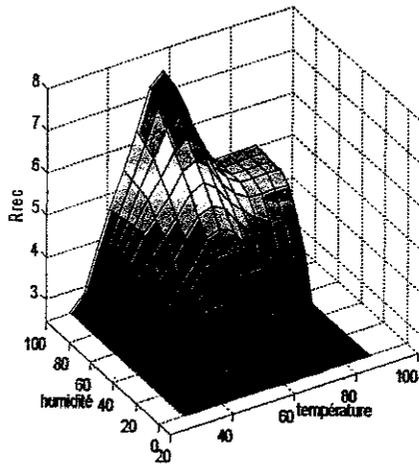


Figure V.16. Représentation de la loi surfacique dans l'espace d'état de la commande Rec

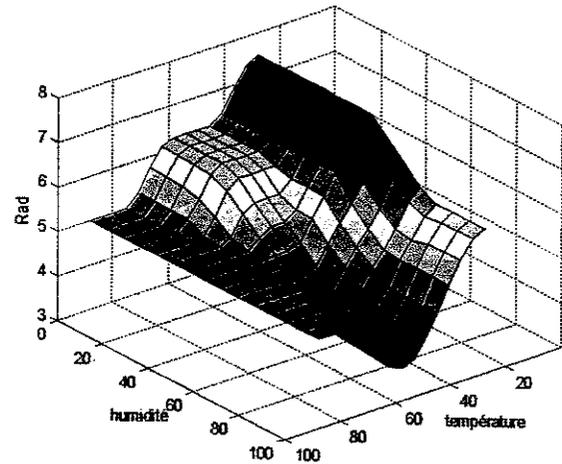


Figure V.15. Représentation de la loi surfacique dans l'espace d'état de la commande Rad

On constate l'annulation des commandes lorsque les deux entrées ($T^{\circ}C$, $H\%$) sont nulles en opposition ce qui correspond à $T^{\circ}C = \max$, si $H\% = 0$; et $H\% = \max$, si $T^{\circ}C = 28$ cf. **figure V.15**.

Il est à remarquer le fait que les sorties ne présentent pas de très fortes discontinuités au moment de l'évolution des grandeurs d'entrées sauf pour la commande relative au registre d'admission (Rad), ce qui nous rassure sur le fait que le contrôleur élabore des commandes souples et non agressives pour les différents organes d'action dont le nombre est de 51.

Il est à souligner de plus, que les commandes R_j sont beaucoup plus importantes lorsque les deux entrées (i.e. $H\%$ et $T^{\circ}C$) sont importantes surtout, pour ce qui est de l'opération relative au recyclage cf. **figure V.15**

Il y a lieu de noter l'existence d'extréma absolus sur chaque surface, en particulier celle de la **figure V.16**, qui indique clairement que le taux d'extraction est minimum aux points ($T^{\circ}C = 60$; $H\% = 0$).

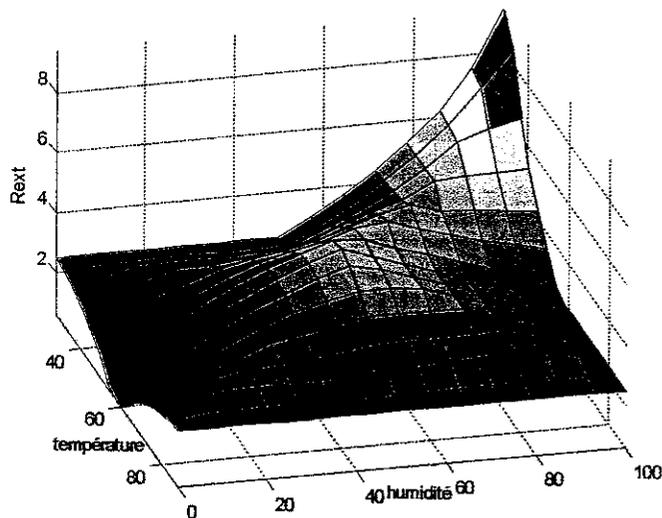


Figure V.17. Représentation de la loi surfacique dans l'espace d'état pour la commande Rext.

V.4.2.3. Test du contrôleur par application des lois d'inférence

Le test des règles d'inférence s'est fait par l'attribution de différentes valeurs aux grandeurs d'entrée (i.e. $T^{\circ}C$ et $H\%$) et la vérification des valeurs prises par les différentes commandes R_j .

Les illustrations graphiques ci-après nous permettent d'explorer les différentes caractéristiques qui font apparaître les liaisons fortes existantes entre les différentes grandeurs. Celles-ci devront nous permettre d'avoir une image très explicite bien évidemment sur l'interaction de ces mêmes grandeurs ainsi et surtout en ce qui concerne le déroulement du procédé quant à la description symbolique que nous avons préconisé.

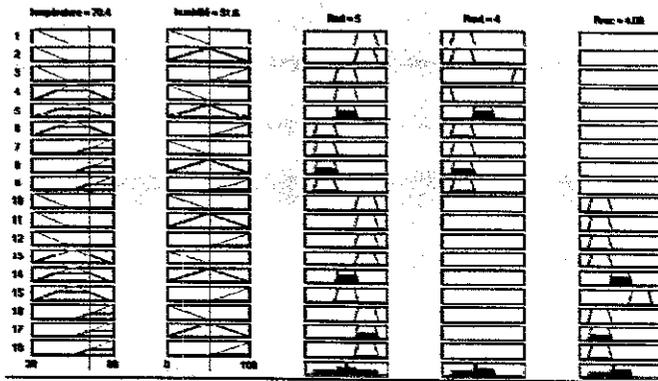


Figure V.18. Les lois d'inférence implémentées.

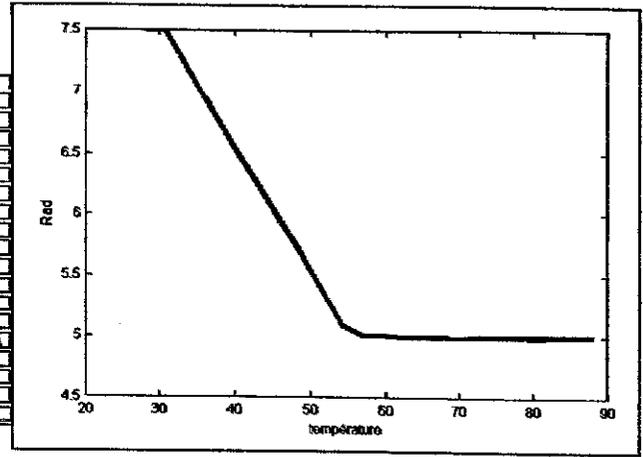


Figure V.19. la commande Rad vis-à-vis de la T°C

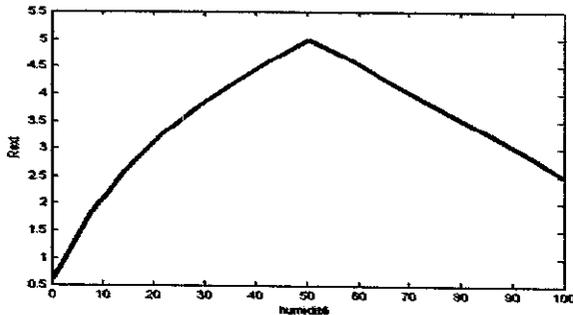


Figure V.22. La commande Rext vis-à-vis de H%

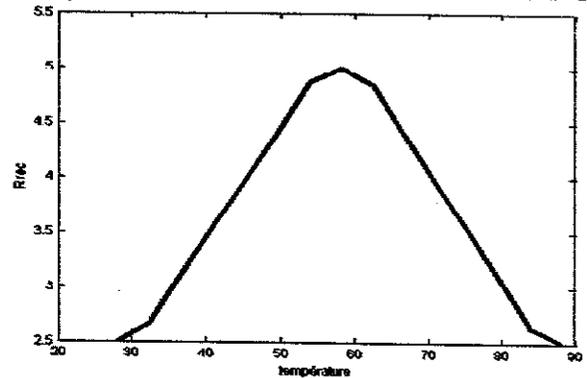


Figure V.20. la commande Rec vis-à-vis de la T°C

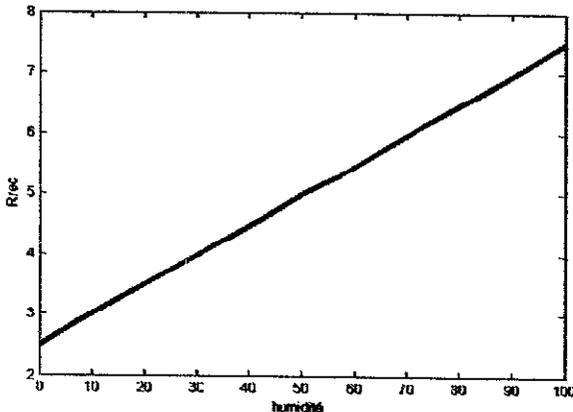


Figure V.23. La commande Rec vis-à-vis de H%

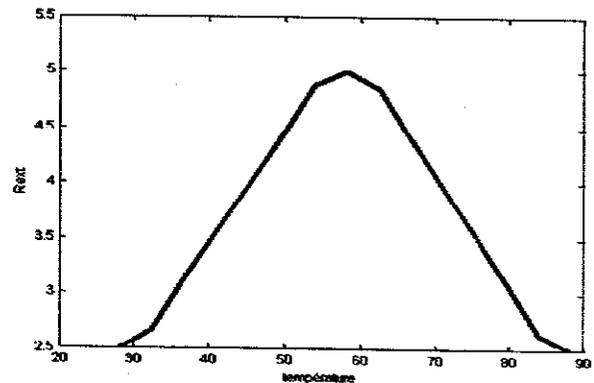


Figure V.21. La commande Rext = f(T°C)

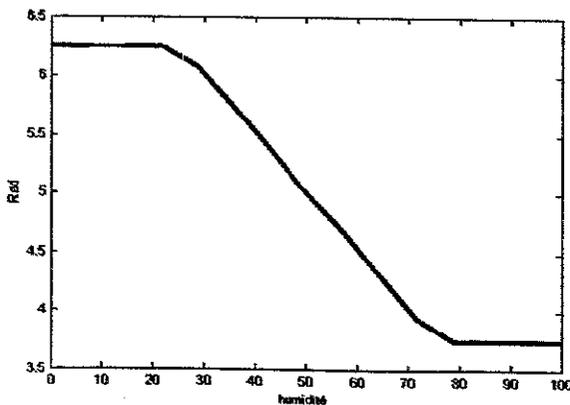


Figure V.24. La commande Rad vis-à-vis de H%

Le schéma ci-dessous (figure V.25.)

Sur ce système, dont les caractéristiques sont ci-dessus, lorsqu'on applique la méthode d'inférence max-min [Bôh.94], nous pouvons constater que sur certaines parmi elles, il existe une forte non-linéarité due, à l'influence réciproque des deux variables d'entrée i.e. T°C et H%. cf. figures V.20, V.21 et V.23.

illustre une partie (i.e. rien que les 9 règles) de l'implémentation des différentes règles d'inférence élaborées lors de la configuration du contrôleur à logique floue sur la base de la matrice des lois traitées tout à fait au début de cette partie de l'étude.

Cette structure permet de visualiser les différentes étapes de calcul, conduisant à partir des deux variables numériques d'observation i.e. T°C et H% à la variable numérique de sortie R_j (vantelles).

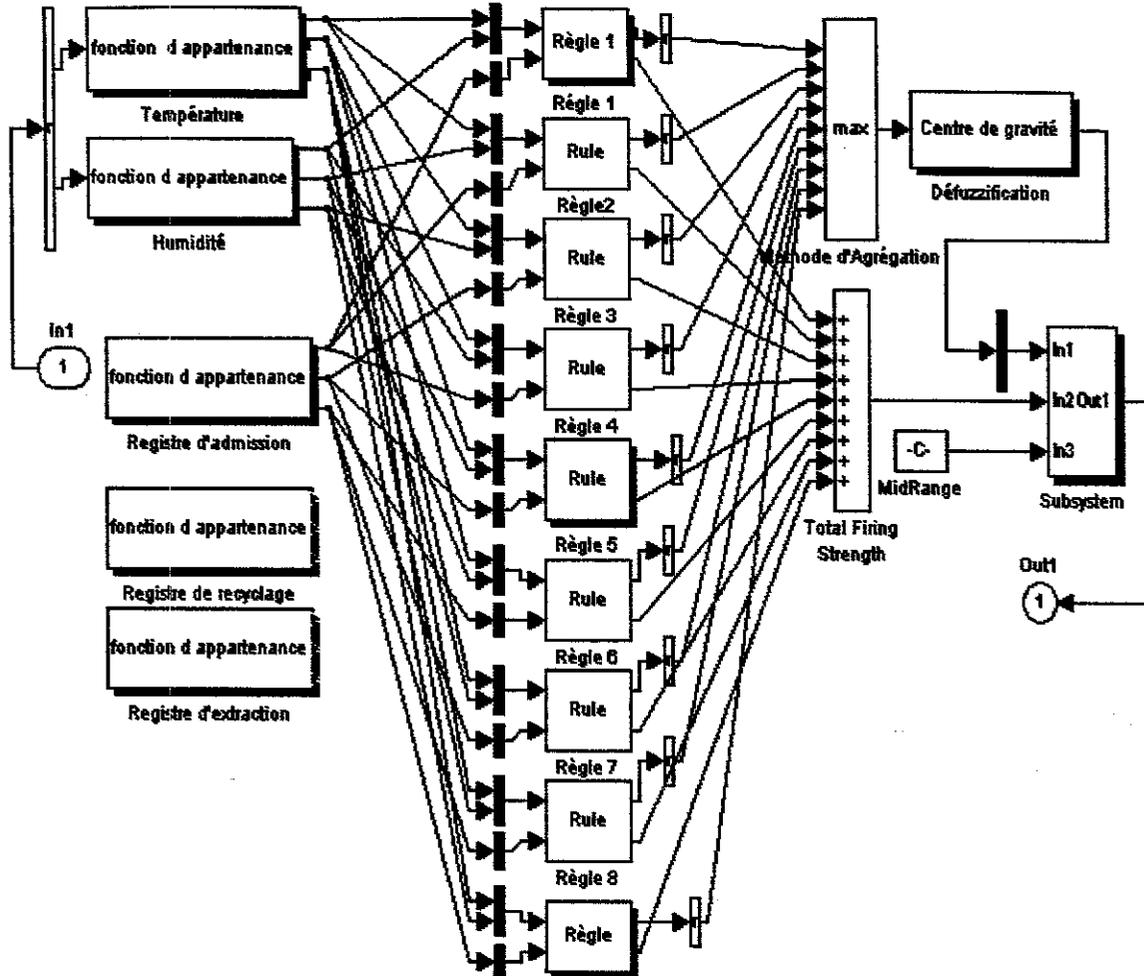


Figure V.25. Schéma de la structure connexionniste du système d'inférence floue

V.4.2.4. Simulation du correcteur sur le plan dynamique

Arrivés presque au terme de ce chapitre, nous n'avons pas pu nous empêcher de tenter une étude sur le plan dynamique, d'ailleurs ce n'était nullement notre objectif, pour avoir ne serait-ce qu'une certaine idée aussi simple soit-elle sur la réaction du processus dans les conditions que nous lui avons imposés. Alors, la recherche bibliographique sur le sujet nous a permis sur des données de la littérature, d'avancer un modèle du séchoir sous forme d'une représentation externe du 2^{ème} ordre élaboré par Marsov (cf. [Mar, Sla.88]). Ce modèle traite les deux paramètres i.e. la T°C et l'H% sur deux canaux différents et indépendants et ce, en fonction de l'apport de chaleur comme paramètre principal d'entrée. Donc, nous avons décidé, par simulation numérique, à étudier le système en considérant rien que la grandeur T°C, de par son importance dans le déroulement du processus. Nous avons également privilégié la variable de commande Rad (i.e. vantelle d'admission), car ses actions sont les seules capables de provoquer des perturbations substantielles dans l'amenée de chaleur vers le séchoir. De plus, ce paramètre est également la commande la plus sollicitée tout au long du processus, par rapport aux autres vantelles i.e. le Rext (extraction) et Rrec (recyclage) qui sont verrouillées chacune une fois sur deux.

L'avantage considérable d'un contrôleur à logique floue est sa robustesse ; elle est particulièrement remarquable lorsqu'il s'agit d'un système intrinsèquement instable. Elle peut être vérifiée en modifiant l'un des paramètres du même système.

La simulation va porter donc, sur le comportement du régulateur dans différents cas de figures tel que, son comportement en asservissement et en régulation et ce, en vue de tester son aptitude à absorber les erreurs du réglage dues principalement à d'éventuels défauts de modélisation.

V.4.2.4.1. Etude en mode de régulation

Dans ce cas, nous traitons la capacité du processus à rejeter les perturbations appliquées sur l'entrée et sur la sortie. D'abord nous appliquerons une perturbation sur l'entrée seule. Cet état de fait est équivalent au comportement d'organes d'action tels que les registres. Ensuite, une autre perturbation est activée, seule également, mais cette fois-ci sur la sortie. Nous calculerons dans les deux cas les réponses du système et bien entendu, l'erreur de poursuite et la commande floue engendrée sur le séchoir. Les résultats de ce traitement sont illustrés par la **figure V.26**.

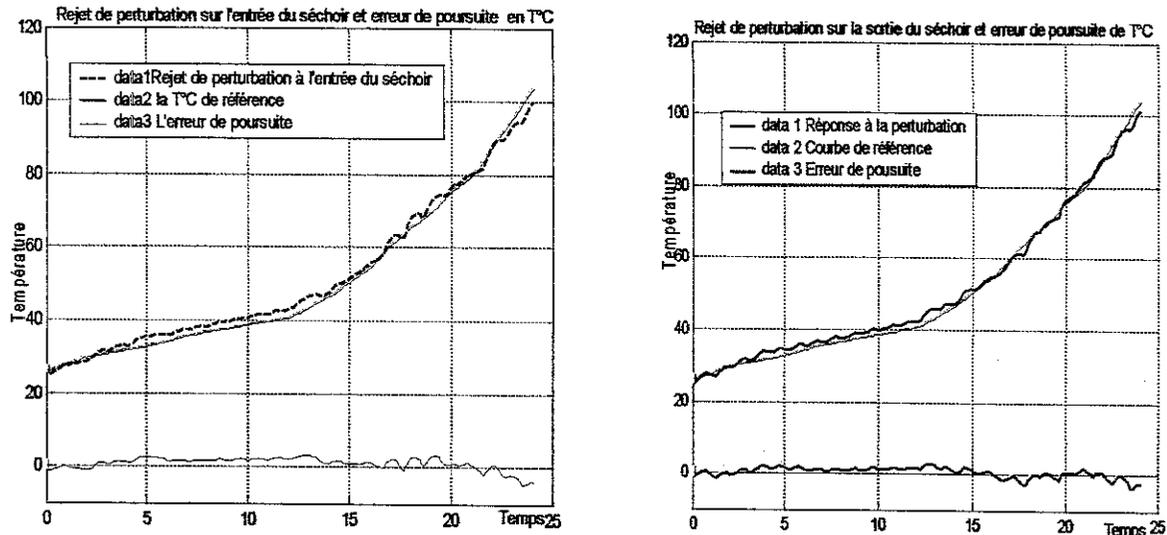


Figure V.26. Comportement de la grandeur de sortie (T°C) suite à des perturbations sur l'entrée (à gauche) et sur la sortie (à droite) et la comparaison avec la référence. L'erreur de poursuite est visualisée dans les deux cas.

V.4.2.4.2. Etude en mode asservissement

Le mode asservissement consistera dans le test du processus dans sa capacité à poursuivre la grandeur de référence dans toute sa plage de variation i.e. T°C.

Les résultats de cette opération sont illustrés par la **figure V.27**.

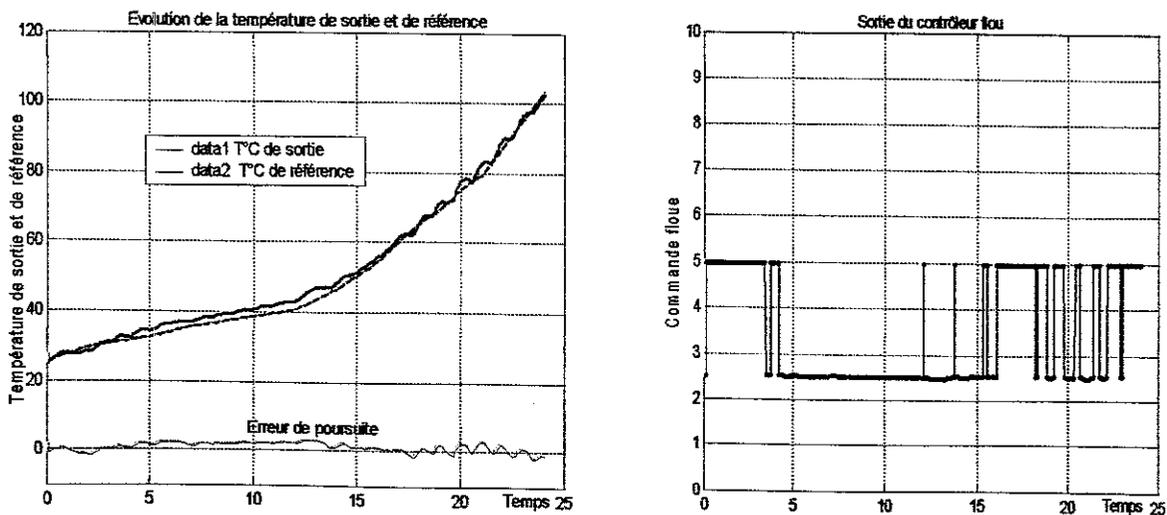


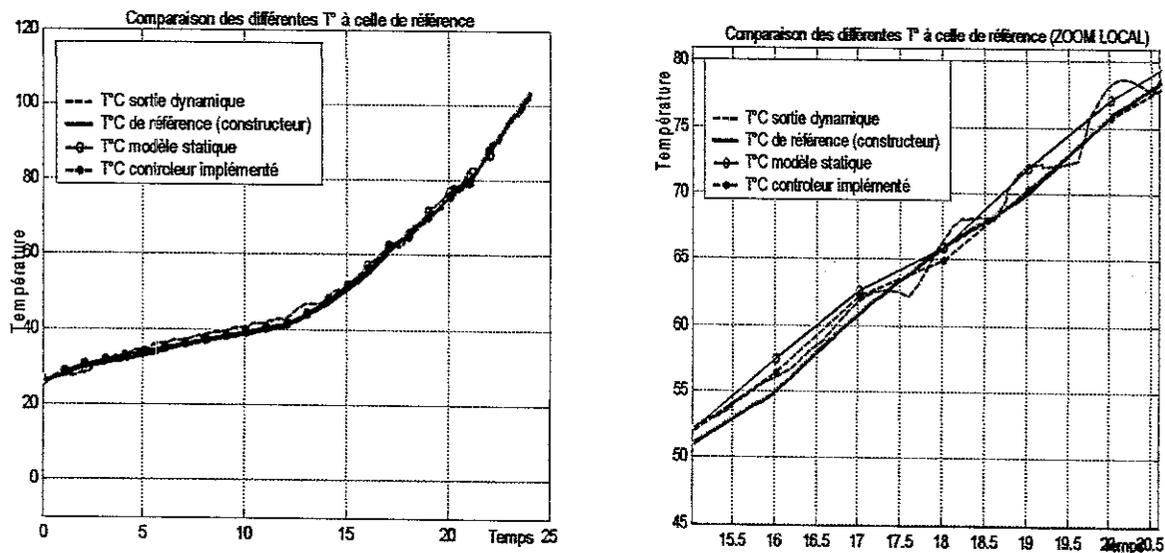
Figure V.27. Comportement de la grandeur de sortie (T°C) **Figure V.28.** La commande générée par le contrôleur flou.

L'observation des différentes réactions du processus dans les cas envisagés (cf. figures V.26,27,28), nous confirme que la conduite du système reste globalement correcte, malgré qu'il oscille très légèrement, tantôt au dessus, tantôt au dessous de la position de consigne (courbe du constructeur, cf. figure.I.06.). Mais ces oscillations provoquées par les perturbations sont vite atténuées surtout en fin de parcours de la réponse. Cet état de fait peut être amputé à l'imperfection du modèle sur lequel nous avons effectué le test ou carrément au fait de ne pas avoir tenu compte de l'interaction très forte qui existe entre les deux principaux paramètres i.e. T°C et H%. Enfin nous signalons qu'en aucun moment, la commande n'a été saturée (cf. figure.V.28) et par conséquent, le système n'a atteint des états d'instabilité prononcés. Ceci confirme encore la réputation de robustesse des correcteurs à logique floue.

V.5. Validation globale des différentes réponses

Dans le but de valider l'approche développée, nous avons commencé d'abord par vérifier la capacité de la description floue du système à exprimer correctement les réponses spécifiques considérées du séchoir comme primordiales en l'occurrence la T°C et H% représentées bien évidemment par le modèle de référence obtenu au chapitre I.

Les résultats de conduite de chacun des modèles dans les mêmes conditions ont été ensuite comparés au modèle expérimental du constructeur considéré comme la référence idéale (cf. chapitres I et II). D'après les courbes précédemment citées et celles ci-dessous, nous pouvons constater que le contrôleur a éliminé à chaque fois les effets de perturbation et a assuré une garantie de comportement

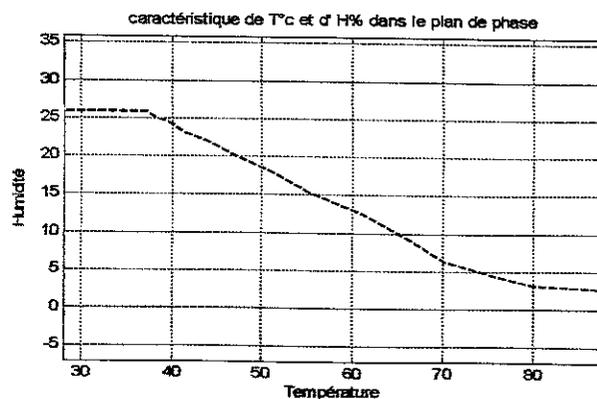


FigureV.29. Comparaison des réponses du contrôleur flou implémenté, modèle statique et dynamique par rapport à la référence du constructeur (cf. 'Zoom local').

qualitatif du système même si le modèle de base est supposé imparfait.

Avant de clore cette analyse de comportement, nous devons souligner le fait que la face dynamique du test nous a permis d'apprécier encore plus l'aptitude du système à reproduire les caractéristiques principales et à absorber les erreurs de correction.

Ceci, par conséquent, confirme l'efficacité des correcteurs flous sur une l'applications telle nous avons entre les mains.



FigureV.30.Caractéristique de T°C et d' H% dans le plan de phase

V.6. Implémentation et Conduite préconisées par un API

Après le traitement des parties décrites précédemment, on doit aboutir à l'étape de l'implémentation matérielle de conduite. Pour se faire, il existe aujourd'hui une multitude d'outils de développement très fiables aussi bien au niveau du soft qu'au niveau du hard. Nous pensons aussi que l'informatisation du procédé de séchage doit être intensive en ayant recours aux automates, qu'ils soient centralisés ou en réseau. Ces configurations sont totalement ouvertes, et donnent une souplesse de paramétrage totale.

Nous préconisons la possibilité de gérer l'ensemble par un automate programmable qui peut piloter plusieurs entrées/sorties TOR (p.ex. commande de ventilateurs de brassage d'air) et entrées analogiques et intègre un bloc de logique floue programmable dans lequel notre algorithme de conduite sera implémenté et ce, en communiquant avec un PC.

Celui-ci (i.e. le PC) permettra l'affichage par chambre de la température, l'hygrométrie, le temps de fonctionnement et la position des registres, de modifier le temps d'attente, les profils de température et d'hygrométrie.

Une commande de la température et de l'hygrométrie, effectué en logique floue, permet la gestion des vanelles. Cet asservissement présentant une structure identique pour les 17 chambres, les informations d'entrées (température, hygrométrie et temps de fonctionnement) sont multiplexées. A la suite d'une demande d'asservissement d'une chambre, le temps de fonctionnement est déterminé ainsi que les valeurs de consignes de température et d'hygrométrie ; après mesure de la température et de l'hygrométrie dans la chambre considérée, le calcul des écarts de température et d'hygrométrie est effectué et entré dans le bloc flou intégré dans l'automate. La valeur calculée par le bloc correspond à la variation souhaitée de débit d'air dans les registres. La figure V.31 nous donne un aperçu très significatif et global sur l'implémentation que nous préconisons.

La position de ces derniers est obtenue par calcul en s'appuyant sur l'état et le temps d'ouverture et de fermeture. Le signal de variation de position est alors démultiplexé afin d'assurer le pilotage des '51' vanelles des différentes chambres. Chaque chambre peut être sollicitée par l'automate par exemple toutes les minutes ou plus, vu que le système est très lent.

Dans un premier temps, les mesures devant être recueillies sur le procédé sont traitées pour mettre à jour les paramètres du modèle symbolique du procédé ; dans un deuxième temps, cette information est utilisée pour élaborer au mieux les signaux de commande.

Les incidents graves ne sont pas pris en charge. Par exemple, si la T°C est *autour* de la valeur de 28°C à la 1^{ère} heure, elle ne peut être en dehors de ce diapason, autrement ceci sera considéré comme un incident grave. Nous pouvons citer aussi l'arrêt brutal de ventilateurs etc.

La programmation de l'automate doit être aussi structurée pour le fonctionnement séquentiel des ventilateurs et pour la gestion des moteurs des registres.

Le temps de séchage peut être très réduit, en assurant ainsi un gain de productivité, car les opérations manuelles de réglages et de vérifications seront supprimées tout en obtenant une meilleure régularité et répétabilité des cycles. Tout ceci doit garantir la fabrication de produits présentant une grande constance au niveau des performances et des caractéristiques apportant encore plus de sécurité pour l'utilisateur et une meilleure productivité pour l'exploitant.

L'automatisation des chambres de séchage une fois réalisée, peut être suivie par la mise en oeuvre d'automatismes d'empilement et de dépilement, de découpe et de préparation de mélange.

C'est dans ce cadre que nous proposons la mise au point du fonctionnement des 17 chambres de séchage à l'aide d'un automatisme intégrant une régulation par logique floue.

V.6.1. Architecture du système de conduite du séchoir à céramique basée sur un A.P.I.

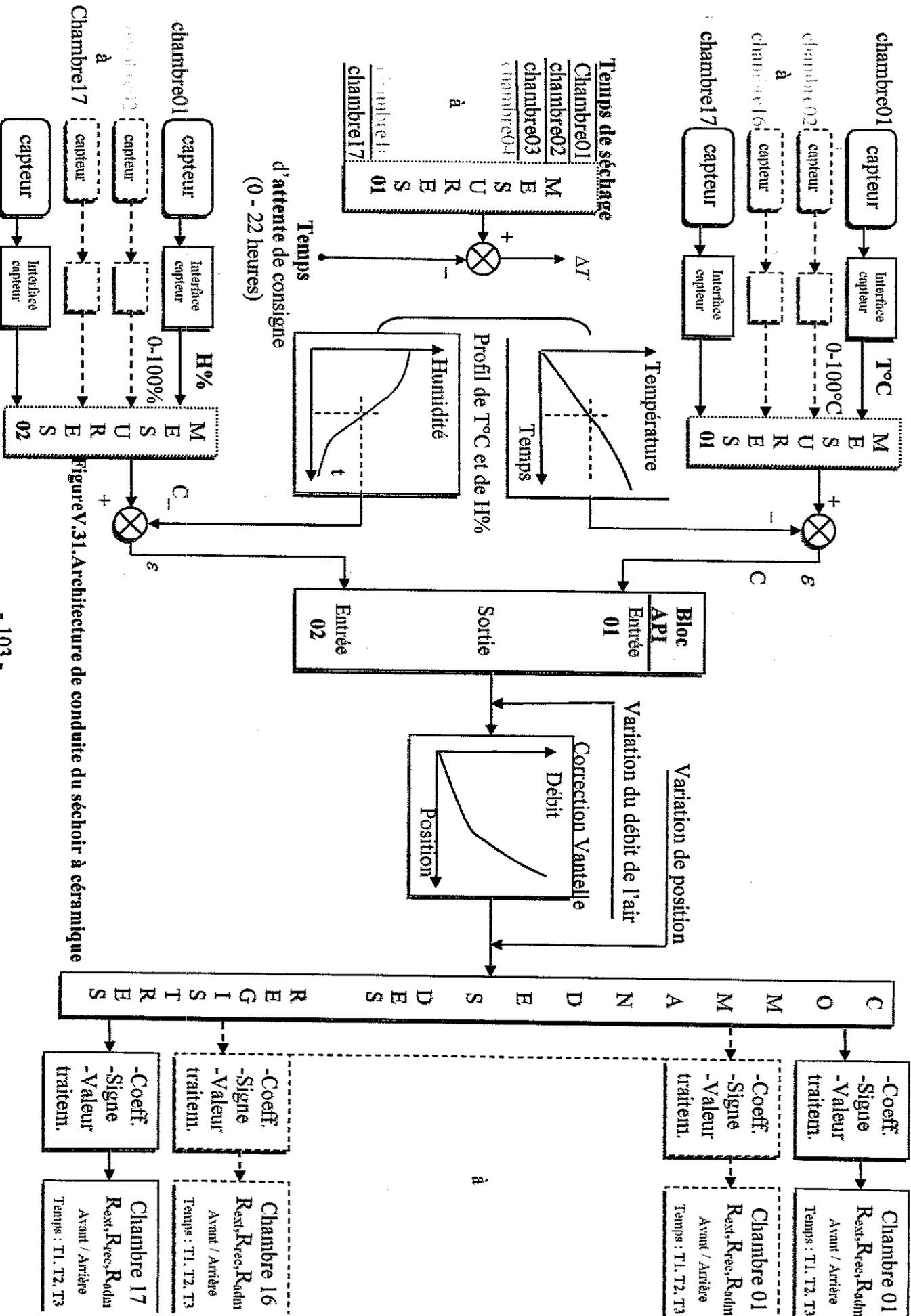


Figure V.31. Architecture de conduite du séchoir à céramique

V.6.2. Programmation du contrôleur flou en pseudo-langage sur API équipé d'un bloc fuzzy (cf. Annexes en fin du document).

V.7. Test final lors de mise en oeuvre sur l'installation

La mise en oeuvre des résultats de simulation sur le processus revêt une importance capitale lors de la conception d'un contrôle à logique floue pour le système à automatiser. Ainsi les fonctions et les lois d'inférence sont à modifier à l'aide d'essais systématiques mais avec des précautions, car il est très probable que, pendant les manipulations, apparaissent des états instables et même dangereux pour toute l'installation.

Des résultats de ce genre confirment l'inefficacité de la stratégie de conduite et il devient nécessaire de retourner à l'étape de choix de la structure du contrôleur à logique floue, voire même approfondir l'étude du système dans sa globalité

V.8. Conclusion

Nous avons observé que pour chaque heure du cycle de séchage de chaque chambre, le correcteur flou, effectue une comparaison entre les grandeurs mesurées réelles (T°C et H%) et leurs valeurs obtenues par la simulation des échanges de chaleur dans les chambres de séchage.

Dans le cas, où une anomalie se présente, le contrôleur flou élabore des correctifs afin de palier aux aléas de la conduite, par des signaux permettant de déclencher des actions subséquentes afin de régler l'anomalie, et par conséquent, ramener la valeur des grandeurs mesurées à leurs valeurs de référence.

Nous voudrions souligner que la représentation symbolique a été établie à partir de constatations sur site et particulièrement sur des problèmes rencontrés avec une fuzzyfication simple (3 descripteurs définis comme *-élevée, bonne, basse-* pour chaque grandeur mesurée, ainsi que *augmenter, maintenir ou diminuer peu ou fort* pour les grandeurs de commande. Le label *zéro* est réservé à l'état *permanant*.

L'algorithme peut être qualifié de « rustique » mais il tient compte des couplages (le chauffage agissant sur la température mais aussi sur l'hygrométrie) et travaille sur toute la plage de mesure.

Cette commande non linéaire présente la propriété importante de ramener le système à un point de fonctionnement stable à chaque fois qu'il y a un écartement des grandeurs de sortie (i.e. T°C et H%). Enfin, nous pouvons souligner que dans les deux cas, les résultats de simulation obtenus montrent que la stratégie de conduite adoptée donne des performances satisfaisantes, aussi bien lors d'une variation de grandeurs de consigne, que lors de variation de perturbation (cf. V.5.4).

La simulation numérique a permis de mettre au point le contrôleur flou et étudier son comportement dans différents cas de figure. Nous avons également montré comment le choix des paramètres flous influe sur les performances. L'objectif était aussi à la fois de tester le régulateur flou dans différentes conditions susceptibles d'être rencontrées dans la réalité, mais également d'étudier les conséquences des inévitables dysfonctionnements en terme de conduite.

Cependant, la validation définitive nécessite une phase expérimentale afin de confronter l'algorithme du régulateur flou à des conditions réelles.

Il apparaît nécessaire dans l'immédiat de tester l'intérêt quant au développement de tels outils. En outre, plusieurs campagnes de mesures sur différents cycles de séchage dans différents séchoirs industriels doivent être entreprises, dans le but de valider et d'améliorer le modèle et son application et ce, dans le cas où cette étude trouvera l'écho conséquent pour la suite de sa réalisation.

L'utilisation de la commande floue s'est avérée être une solution très intéressante car son principe de fonctionnement reste relativement simple, même pour des phénomènes complexes. Elle permet également d'intégrer facilement une notion imprécise telle que l'état thermique d'un séchoir. Le dernier avantage que nous avons effectivement constaté est son aptitude à définir systématiquement des lois non linéaires.

Conclusion Générale et Perspectives

1. Objectifs

A la fin de notre étude, nous nous permettons de rappeler les objectifs essentiels que nous nous sommes fixés au préalable et dont le contenu consistait en la modélisation et la conduite d'un séchoir industriel à céramique ayant une structure physique et une commande complexes.

Il convient de noter, que quelque soit le degré de sophistication d'un algorithme de commande, on ne peut espérer obtenir une commande satisfaisante que si l'information recueillie sur le processus est bien représentative de son fonctionnement.

On a vu tout au long du traitement des différents chapitres que la conduite d'une installation de process, telle que la nôtre repose sur le respect des caractéristiques attendues du produit fini mais aussi sur la minimisation des temps morts, des incidents, qui génèrent des pertes de production. On a vu également que l'absence de données vitales nécessaires à l'élaboration du modèle symbolique ou à la rigueur mathématique nuit, par conséquent, aux performances que permet d'atteindre la commande floue ou même classique. Tout ceci rend la conduite problématique notamment lors de changements des conditions d'exploitations qu'ils soient subis ou voulus. C'est là un des points délicats tant de la modélisation mathématique que de son application à la commande.

Cette approche a pour but, d'une part de réduire significativement la consommation de gaz et d'autre part d'améliorer considérablement le confort des opérateurs en diminuant très fortement le nombre d'alarmes et en gérant automatiquement les fluctuations de production.

Le développement de la micro-informatique a permis la création de nouveaux systèmes de régulation très élaborés. Paradoxalement, le niveau de sophistication atteint est très souvent un obstacle à leur développement. Il est indispensable que le régulateur soit simple puisque c'est l'utilisateur qui détermine finalement ses paramètres. Il doit également être fiable dans des conditions d'utilisation réelles et pas seulement dans le cadre d'une expérimentation de laboratoire. C'est dans un souci de simplicité que nous avons élaboré notre correcteur à logique floue.

Ce constat devra donner bien entendu au présent projet un intérêt bien plus fort puisqu'il débouche alors, sur une possibilité d'amélioration majeure de la qualité du produit et de sa conduite automatique.

2. Résultats et Commentaires

Il faut noter que notre algorithme symbolique de commande, établi en tenant compte des problèmes rencontrés sur site et des couplages entre les grandeurs de réglage dans le but de gérer la poursuite d'une trajectoire (dont les points varient en fonction du temps) et non un seul point de consigne (fonctionnement). Pour ce faire, cette trajectoire a été partitionnée finement en vue d'être le plus précis possible par rapport à la courbe de référence.

Dans un premier temps, Nous avons mis au point un modèle statique de transfert de masse et d'énergie, qu'on a validé par recoupement sur des données expérimentales (modèle de fonctionnement). Nous avons ensuite proposé une structure de contrôle-commande du procédé par un contrôleur flou pour la commande du séchoir et calculant ainsi les points de consigne, et enfin une implémentation sur API pour assurer la commande.

Le système de conduite a été testé partiellement sur un modèle dynamique emprunté de la littérature [Mar, Sla.88]. Les calculs de simulation et l'implémentation ont été exécutés à l'aide des outils Matlab et Delphi respectivement.

L'algorithme ainsi développé permet de définir :

- des ordres de commande d'ouverture et de fermeture des différents registres ;
- des différentes valeurs des grandeurs de processus.

De même, à partir de ces grandeurs le bilan définit les quantités optimales de chaleur qu'il faudra fournir au séchoir pour le traitement du produit céramique et ce, en tenant compte des conditions d'exploitation et de l'environnement de l'enceinte d'une chambre. Cet état de fait devra se traduire forcément par une amélioration de l'économie d'énergie et une durée de vie de l'installation.

Force est de constater, cependant, que nous avons manqué cruellement de données expérimentales et de relations supplémentaires permettant une estimation conséquente des échanges convectifs dans le séchoir à céramique en vue de l'élaboration d'une stratégie de conduite intégrant tous les aspects d'un comportement fiable de l'installation validé par une simulation en temps réel.

Ceci était initialement notre objectif, mais qui n'a pas abouti malheureusement.

En se basant sur les résultats de simulation obtenus dans le chapitre II, la stratégie de conduite adoptée a donné des performances satisfaisantes, aussi bien lors d'une variation des grandeurs de consigne, que lors d'une variation des grandeurs de perturbation. Ceci confirme que cette commande non-linéaire présente la propriété importante de ramener le système à un point de fonctionnement stable.

L'ensemble des résultats encourageants que nous venons d'obtenir mettent en évidence la capacité de la logique floue, de par ses différentes approches, à caractériser et surtout à traiter les imprécisions ainsi que les incertitudes relatives à une modélisation globale d'un procédé en compliquant davantage le choix et la réalisation d'une stratégie de conduite de tout système.

Ceci nous autorise également de confirmer l'intérêt de la logique floue en terme de simplicité et d'efficacité lorsqu'il s'agit de prendre en compte un phénomène aussi complexe tel que l'état thermique d'un séchoir.

La conséquence la plus importante de la démarche suivie a été l'adoption d'une commande floue pour l'aspect régulation. La régulation floue autour d'un point de fonctionnement avait déjà montré sa robustesse, mais cela ne réglait pas le problème des incidents de fonctionnement.

Enfin, cette commande que nous avons conçue, nous a permis sur le processus :

- d'améliorer la connaissance physique du système, et la détermination de ses limites du bon fonctionnement ;
- de définir une commande performante qui, outre son rôle de pilotage des actionneurs, remplace efficacement la commande classique existante;

d'une part, et montre sa capacité de :

- s'implanter sur un automate programmable donc a un bon support industriel ;
- être performante notamment quant à la robustesse ;
- utiliser peu de règles, ce qui facilite la réactivité, d'autres part.

3. Perspectives

L'objectif en perspective reste bien sûr, l'élaboration d'un modèle mathématique de connaissance qui tiendra compte, cette fois-ci de toutes les spécificités de cette installation, dans le but de la tester sur le plan dynamique et ce, en procédant à une identification *on line* pour caler le modèle élaboré au comportement réel de l'installation. Il est bien entendu que cet objectif est conditionné par une estimation précise du gradient de température et d'humidité dans la charge. Cette nécessité se fera sentir encore plus dans l'avenir avec l'adoption de *cycles* de séchage de plus en plus courts.

Par ailleurs, nous préconisons l'élaboration d'un algorithme de commande complémentaire, car l'algorithme symbolique supposé stabiliser le fonctionnement mais pas forcément aux valeurs exactement prescrites, même si l'expérimentation devrait montrer en principe qu'on est proche.

Cet algorithme additif devra être conçu sous forme de commutation vers un double algorithme Proportionnel Intégral lorsque les deux valeurs principales réglées (T°C & H%) sont entrées dans un "tube" prédéfini autour de leur valeur de référence.

Alors, l'approche sera hybride du moment qu'elle réalisera des commutations non seulement du point de vue régime mais aussi du point de vue déplacement du point de fonctionnement. Nous pouvons également noter aussi que cette étude réalisée sur un séchoir à chambres de la céramique lourde peut être adaptée aisément sur d'autres types de séchoirs à air chaud.

Enfin, nous nous sommes demandés quelles *applications cibles* seraient intéressantes pour ce type de processus industriel ?

Le développement d'un système de monitoring de la pratique complète du séchage serait, d'après nous, une voie intéressante à explorer. On entendrait ici recueillir toutes les données générées par les instruments de mesure de l'usine du séchage jusqu'à la cuisson et ce, en vue de constituer une base de connaissances. Par ce système de monitoring, il serait possible de caractériser toutes les dynamiques du procédé, et finalement, une commande globale et une supervision peuvent être envisagées. Enfin on peut définir des indices de productivité et de qualité qui permettront d'évaluer la valeur financière des améliorations apportées au procédé dans son ensemble. Il serait aussi possible d'identifier et de justifier d'autres pistes de recherche prometteuses.

Références Bibliographiques

Nous avons structuré la bibliographie selon trois grands thèmes à savoir :

- . Références sur des études théoriques et méthodologiques ;
- . Documentation et Références sur des Applications ;
- . Webgraphie et courriel.

Certains ouvrages se retrouvent ainsi cités à plusieurs reprises dans différents chapitres du mémoire, car ils traitent plusieurs sujets, d'autres au contraire sont plus ciblés sur une phase du développement ou sur un thème appliqué particulièrement visé.

I. Ouvrages sur des études théoriques et méthodologiques

- [Aiz, Kip.87] : L.G.Aizenberg, A.B.Kipnis, (1987) Automatisation des Processus de l'Industrie Légère. Edition Moscou. 1987.
- [Arb, Woh.79] : Kurt Arbenz & Alfred Wohlhauser (1979), Méthodes Mathématiques pour l'Ingénieur I : Analyse Numérique, Editions OPU.
- [Bon.80] : J.Y.Boniort (1980), Cours de Technologie Céramique Générale, le Séchage : Institut de Céramique Française, 6, Grande Rue -92 Sèvres, France.
- [Bor&all.98] : P.Borne, J.Rozeinoer, J.RDieulot, L.Dubois (1998): Introduction à la Commande Floue, Edition Technip, Paris.
- [Bou.78] : I.P.Bousslenko (1978) Simulation des systèmes complexes, Edition Nauka.Moscou.
- [Büh.94] : H.Bühler (1994) Réglage par logique floue, Presses Polytechniques et universitaires Romandes.
- [Bou.95] : B.Bouchon-Meunier. (1995) La Logique Floue et ses Application. Préfacé par le Pr.Lotfi Zadeh. Edition Addison Wesley France, SA.
- [Cha, Cav91] : A.Charreau, R.Cavaillé, 1991.Séchage, Calcul et Théorie, Techniques de L'Ingénieur, Article J2480.
- [Däs.69] : A.Dăscălescu. (1969). Le Séchage et ses Applications Industrielles. Dunod, Paris.
- [Feli, Kil.00] : O.Felisart&D.Kilnogy (2000)Informatisation des Procédés de Séchage et Cuisson Céramiques (conférence).L'Industrie Céramique et Verrière. N° 962 /09/11/ 2000.
- [Fuz.05] : Fuzzy logic toolbox, documentation du logiciel MATLAB, version profess. 2005
- [Hir.32] : M.Hirsch, (1932) La technique du séchage.2^{ème} édition.Berlin, Spring-Verlag.
- [Leo.88] : A.Leontiev, (1988), Théorie des Échanges de Chaleur et de Masse. Editions MIR
- [Lin.65] : C.H.Ling (1965) Representation of associative Functions, Publications Mathema.12
- [Kor.82] : J.G.Kornilov & M.P.Asmæv. (1982).Modélisation des Processus de l'Industrie Légère. Edition Moscou.
- [Kra.77] : E.Krause. (1977) .Manuel de Technologie de Céramique industrielle : Le séchage en Céramique, Principes & Techniques. Editions Septima, Paris.
- [Kra.80] : E.Krause.T.Paul, R.Zoller, (1980). Principes et Techniques de Construction de Fours Céramique. Editions SEPTIMA Paris.
- [Kri.59] : O.Krischer, K.Kröll. (1959).La Technique du Séchage Vol 1 et 2 Wiesbaden, Bauverlag, GMBH.
- [Lar.92] : L.Laret, (1992) La Simulation et la Commande des Systèmes Thermiques. Rencontre annuelle de la Société Française des Thermiciens, Sophia Antipolis92.
- [Lee.90] : C.C. Lee (1990) fuzzy logic in control system.IEEE.Trans.sys.M.& cyb.V.20,2.
- [Lik.55] : A.W. Lykov. (1955).Fondements théoriques et expérimentaux du séchage Berlin, Veb Verlag Technik.
- [Mam.74] : E.H.Mamdani. (1974).Application of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic

- Plant.Proc. IEEE, vol.121, n012. p.1585-1588
- [Mar, Sla.88]: V.I.Marsov, V.A. Slavoutski.(1988). Commande automatique de processus technologiques dans les unités de matériaux de construction. Editions Ctroizdat.
- [Muj.83]: A. Mujoumbar. (1983). Advanced in drying. Mc Graw Hill USA.
- [Nad, Pui.95]: J.-P.Nadeau, J.-R.Puiggali. (1995).Séchage, des processus physiques aux procédés industriels.
- [Naj, Mur.83]: K.Najim & G.Muratet. (1983). Pratique de la régulation numérique des processus industriels. Edition Masson.
- [Obs.94]: Observatoire Français des Techniques avancées, Logique floue, Masson, Paris.94
- [Pes.94]: B.Pescheux, (1994).Contribution à la conception de modèles flous et commande floue de systèmes thermiques. Thèse de Doctorat : Ecole des Mines de Paris.
- [Sal.54]: H. Salmang.(1954). La céramique, 3^eédition.Berlin/Göttingen/Heidelberg.Spr.Ver
- [Ton.97]: J-R Tong Tong (1997), La logique floue (Editions HERMES).
- [Yag.80]: R.R.Yager (1980). On a general Class of Fuzzy Connectives, Fuzzy Sets & Systems 4, pp.235-242.
- [Zad.83]: L.A.Zadeh, (1983).The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, Fuzzy sets and systems, vol. 11, No 3, pp. 199-228.
- [Zad.73]: L.A.Zadeh, (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and décision processes.IEEE Transactions on systems, Man & Cybernetics,volSMC
- [Zad.65]: L.A.Zadeh, (1965). Fuzzy sets, information and control, vol. 8, pp.

II. Documentation Technique et Références sur des Applications

- [Alp,04]: Documentation de la Société Alpina 2004, Via del lavaro. Zona PIP 14100 Asti Italy
- [Atg.00]: Gaz d'aujourd'hui n° 7, 8, 9. 2000, Rapport de la commission de l'ATG. Gestion des équipements thermiques dans l'industrie. Optimisation du bilan thermique.
- [Ber.97]: M.Bertrand, Chaînes de régulation types, Techniques de l'Ingénieur.Vol.SIart.R710
- [Ber, Imb.03]: M.Bertrand et G.Imbert, 2003. Simulation et Commande d'un séchoir Pilote. 4^{ème} conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services 23-25 avril 2003 Toulouse, Fr.
- [Bor. al.98]: P.Borne, et al. 1998. Introduction à la Commande Floue. Editions TECHNIP.
- [Bor, 91]: P.Borne, et al.1992.Modélisation et Identification des Processus tome1 et 2 Collection Automatique. Edition Technip 27, Rue Ginoux75737 Paris Cedex,15,92 .
- [Bou, Ham.04]: M.S.Boumedine, A.Hamdaoui, S.Aftis. S.Larbani, Conduite Floue des Transferts thermiques et de masse. Proceeding du CIMA'04, Boumerdès,30/11-2/12/04.
- [Bou,93]: M.S.Boumedine (93), Engineering de Conduite de Cimenteries.Thèse de Doctorat
- [Cha,87]: Chauvin(1987), Régulation : Top programme, CERIC, 1987.
- [Cer.04]: Documentation de la Société CERIC, 12 Rue Royale, 75008 Paris France.
- [Cho.94]: C.H.Chou, H.C.Lu (1994), *Heuristic self-tuning fuzzy controllers, fuzzy sets & Systems*61, 1994, p.249-264.
- [Cia.82]: P.G.Ciarlet, Introduction à l'Analyse Numérique Matricielle & l'Optimisation.Mas
- [Fek.96]: E.Feki, (1996), Contrôle des paramètres climatiques d'une serre expérimentale, l'ESS, Tunisie, (Thèse).
- [Fra.92]: B.Frala(1992), T. pascal facile sous Windows,Marabout,1992.
- [Gal.78]: D.Galara, (1978). Contribution à l'automatisation des séchoirs à tambour rotatif. Thèse Doct-Ingénieur. Université de Lille.
- [Gou, Bou.91]: A.Gourdin, M.Boumahrat.(1991).Méthodes Numériques Appliquées. Eds O.P.U.
- [Gue, 99]: H.Gueguen.Une méthode d'analyse par objectifs pour la conception de la commande des SAP, MSR'99, pp 173-182.
- [Hen.76]: J.-P.Hennebick, (Oct.1976). Etudes de fonctionnement d'un processus industriel, Apport d'une modélisation simplifiée. Journal l'Automatisme.

- [Her.82]: R.Herman. (1982), Computing with human face-New scientist, London. Reprinted in F.L.Smidth Review No 60, Copenhagen, Jan. 1983.
- [IEC TC65/WG 7/TF8.97]: International Electrotechnical Commission, Technical Committee . Industrial Process Measurement and Fuzzy Control Programming.
- [Kaf.74]: V.Kafarov (1974).Méthodes cybernétiques et technologie chimique. Mir, Moscou.
- [Kin, Mam.76]: P.J.King, E.H.Mamdani (1976), the Application of Fuzzy Control Systems of Industrial Processes, IEEE Transactions: Systems Man & cybernetics SMC3.
- [Lyb, Meu.89]: P.Lybaert, H.Meunier, Elaboration et Validation d'un simulateur de Fonctionnem. des Fours intermittents de Cuisson Céramique. Revue Indus.Céramique n°841/89
- [Mok, Mar.98]: M.Mokhtari, M.Marie (1998).Applications de Matlab 5 et 2/Contrôle des procédés Logique Floue, Réseaux de Neurones. Spring-verlag, France.
- [Mok, Mes.97]: M.Mokhtari, A.Mesbah (1997).Apprendre Matlab version 4 & 5 et Simulink.
- [Ost.79] : Jens-Jorgen.Ostergaard (1979), Fuzzy Logic Control, F.L.Smidth & co.A/S, Copenhagen, Danemark, unpublished manuscrit, 1979.
- [Ped.93]: W.Pedrycz. (1993).Fuzzy Control & Fuzzy Systems. 2^{ème}Edition).Research Studies Press ltd.
- [Pro.79]: T.J.Procyk, E.H.Mamdani (1979).A Linguistic Self-Organising Process Controller. Automatica 15, 1979, p.15-30.
- [Rai.97] : Rairo-Apii-Jesa, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Volume 31-n° 1/1997, page 307 à 319 et n° 1/1997, page 790 à 802 Editions Hermes, Afcet.
- [Rit.90]: T. Ritchie (1990). Digest de la Construction au Canada. Publication de l'I.R.C sur les Normes concernant les Briques CBD-169-Fet leur Fabrication.
- [Rog.75]: M.I.Rogovoï, M.N.Kondakov, M.N. Saganovski (1975), Calcul des Equipements Themothechniques des Unités de l'Industrie des Matériaux de Constru.Stroïzdat75.
- [Sal.97] : H.Salhi. (1997).Commande adaptative d'un aérotherme par calculateur.IEEA'97,2.
- [Ser, Fel.90] : P.J. Sereda et R.F. Feldman, (1990).Digest de la Construction au Canada. Publication de l'I.R.C sur les Normes Concernant L'Humidification et le Séchage des Matériaux poreux CBD-130-F.
- [Sug, al.92]: M.Sugeno, T.Terano, M.Mukaidono & S.Sigematsu (1992), Fuzzy Engineering towards Human Friendly Systems, Ohmsa, Tokyo-I.O.S. Press, Washington..
- [Sug.85]: M.Sugeno (1985), Industrial Application of Fuzzy Control, Elsevier Science Publisher B.V.-Netherlans.
- [Yag, Fil.94]: R.R. Yager, D.P.Filev (1994) Essentials of Fuzzy Modelling and Control, Wiley Intersciences.
- [Yas, Miy.85]: S.Yasunobu, S.Miyamoto, (1985), Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control, dans M.Sugeno (dir) *industrial application of fuzzy control,Elsevier science pub., North Holland, pp.1-18.*
- [Vid, Mel.78] : P.Vidal, C.Melin (1978). Instrumentation et Commande d'un Séchoir à Tambour Rotatif. Université de Lille et Compiègne, Centre d'automatique.

III. Webgraphie & Courriel

- <http://www.mathworks.fr/products/controldesign/modanal.shtml>.
- http://www.mathtools.net/MATLAB/Fuzzy_Logic/index.html.
- <http://www.gala.univ-perp.fr/~polit/ichap0.html>.
- <http://www.eru.uliaval.ca/ptt195225>.
- <http://www.mathworks.com/products/fuzzy>.
- <http://www.laas.fr/mosimo3/ACTES/C721.pdf>
- <http://www.ademe.fr/htdocs/pad0212.htm>. (Archives de thèses 2000).
- http://www.gmic.iulaval.ca/labios/lacom/Français/fr_séchage.htm.
- e-mail : alpina@alpinainindustriale.it
- e-mail : info@prismaautomation.com
- e-mail : seic-srl@libero.it

Annexes et Récapitulatif des résultats

Quelques extraits de programmes de différents chapitres

A/ Sous l'environnement Matlab

% Envoi des deux variables principales avec le temps à partir du 'workspace' comme excitation:
% le temps en heures:

T = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22];

% température de séchage en °C :

tempe = [28 30 31 32 33 34.5 36 37 38 39 40 41 44 47 51 55 61 66 70 76 80 88];

% Humidité :

humid = [26 26 26 26 26 26 26 26 25.1 24.9 24.3 23.4 22 20.2 18.1 15.5 12.6 9.3 6.4 4.4 3.2 2.8];

% le vecteur 'data' dans lequel on place les données dans le workspace:

% U = [tempe humid];

Récupération des courbes du contrôleur flou : Consigne et sortie en température

Load cs

temps = cs(1,:); %sortie

temperature_sortie = cs(2,:);

temperature_consigne = cs(3,:);

plot(temps,temperature_sortie,temps,temperature_consigne);

erreur_de_poursuite = temperature_sortie - temperature_consigne;

plot(temps,erreur_de_poursuite)

Variable de Commande (Sortie du régulateur flou) :

load cde;

temps = cs(1,:);

commande_floue = cde(3,:);

h = stairs(temps,commande_floue);

load cf

temps = cs(1,:);

sortie_contrleur_flou = cf(2,:);

plot(temps,sortie_contrleur_flou)

Calcul des lois surfaciques :

[humid,tempe] = meshgrid(humid,tempe);

mesh(T,tempe,humid),hold on

mesh(tempe)

mesh(humid),hold on

surf(T,tempe,humid)

Dimensionnement du séchoir

x= 1:1:24;

V1=[3816.6 2850 2247.2 1836.1 1538.1 1312.5 1136.1 994.4 878.4 781.8 700.2 630.4 570.2 517.7
471.7 431.0 394.9 362.2 333.7 307.6 284.0 262.5 0.0 0.0];

Q1=[43594.5 32553.5 25668.6 20972.4 17569.1 14992.0 12976.4 11358.8 10033.9 8929.9 7997.6
7200.9 6512.7 5913.5 5387.9 4923.3 4510.6 4142.1 3811.3 3513.2 3243.7 2998.9 0.0 0.0];

subplot(2,1,1) ; plot(x,Q1),

subplot(2,1,2) ; plot(x,V1),

%plot(x,Q1,x,V1)

Courbes de T°C et d'H% obtenues à partir du modèle du chapitre I

t = [1:1:22];

```

Température :T = [28.75 30.93 32.02 33.12 34.21 35.30 36.39 37.48 38.57 39.66 40.75 41.84
44.71 48.09 52.37 57.54 63.59 69.02 74.45 79.48 85.31 90.74];
plot(t,T), grid; xlabel('Temps de séchage de produits céramiques');
ylabel('Température de séchage de produits céramiques');
Humidité :
H=[25.8284 25.6873 25.6064 25.5237 25.4393 25.3553 25.2704 25.1850 25.0995 24.7195
23.5964 22.0846 20.1950 17.9177 15.2508 12.3187 8.87710 4.65100 2.80770 1.80580 1.65420
1.37450];
plot(t,H), grid; xlabel('Temps de séchage de produits céramiques');
ylabel('Humidité de séchage de produits céramiques en %');
Volume d'air chaud fourni à une chambre :
V1=[3816.6 2850 2247.2 1836.1 1538.1 1312.5 1136.1 994.4 878.4 781.8 700.2 630.4 570.2 517.7
471.7 431.0 394.9 362.2 333.7 307.6 284.0 262.5 0.0 0.0];
Quantité de chaleur fourni à une chambre
Q1=[43594.5 32553.5 25668.6 20972.4 17569.1 14992.0 12976.4 11358.8 10033.9 8929.9 7997.6
7200.9 6512.7 5913.5 5387.9 4923.3 4510.6 4142.1 3811.3 3513.2 3243.7 2998.9 0.0 0.0];
subplot(2,1,1)
plot(x,Q1),xlabel('variation de l apport en chaleur Q1 dans le cas d une chambre de séchage'),grid
subplot(2,1,2)
plot(x,V1),xlabel('variation du volume d air chaud V1 dans le cas d une chambre de séchage'),grid
plot(x,Q1,x,V1)
Débit de gaz fourni à une chambre
DI = [4.92 3.67 2.90 2.37 1.98 1.69 1.46 1.28 1.13 1.01 0.90 0.81 0.73 0.67 0.61 0.56 0.51 0.47
0.43 0.40 0.37 0.34 0.00 0.00];
Quantité d'air chaud pour développer la chaleur Qi de la ième chambre
LI = [3502.19 2615.20 2062.10 1684.83 1411.42 1204.39 1042.46 0912.41 0806.08 0717.39
0642.49 0578.48 0523.20 0475.07 0432.84 0395.52 0362.36 0332.76 0306.18 0282.24 0260.58
0240.92 0.00 0.00];
subplot(2,1,1), plot(x,DI), subplot(2,1,2), plot(x,LI)
Taux de variation de la position du registre du recyclage des fumées(RresI) dans le cas d'une chambre
x=[ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24];
RresI = [00 00 00 00 00 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 73 67 62 58 54 50 47 00 00];
Taux de variation de la position du registre d'extraction des fumées(RextI) dans le cas d'une chambre
RextI = [77 58 46 38 32 27 24 21 19 17 15 14 13 11 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Taux de variation de la position du registre d'admission des fumées(RadI) dans le cas d'une chambre
Radml = [71 53 42 34 28 24 21 18 16 14 13 12 11 10 09 08 07 07 06 06 05 05 00 00];
plot(x,Radml), subplot(2,1,1), plot(x,RresI), subplot(2,1,2), plot(x,RextI)
Traitement de la courbe de T°C du constructeur par fitting
% x = 1:1:22; % Heures de séchage
% ytc = [28 30 31 32 33 34.5 36 37 38 39 40 41 44 47 51 55 61 66 70 76 80 88];%valeurs
constructeur.
% plot(x,yc),hold on %graphe des valeurs initiales constructeur.
% p = polyfit(x,yc,4); % Approximation avec un polynôme d'ordre 4 au sens de la MMC.
% x1 = 1:1:22;
% polyn1 = polyval(p,x1); plot(x1,polyn1,'-')
% polyn = polyval(p,x), hold on ; % graphe d'évaluation du modèle d'ordre 4 sur
% toutes les composantes du vecteur X.
% plot(x,polyn,'-') % courbe du modèle choisi.
% err = ytc-polyn; %Erreur entre le polynôme et les valeurs initiales (constructeur)
% plot(x,err,'*'), hold on %graphe de l'erreur entre les deux ensembles de valeurs.
% disp('polynome de fitting est')
% p % paramètres du modèle d'approximation.

```

```

% var_err = num2str(std(err)^2); % variance de l'erreur qui doit tendre vers zéro.
% disp('la variance de l'erreur de fitting est');
% var_err
% R = (corrcoef(ytc,polyn))% Coefficient de corrélation entre les valeurs constructeur.
%et et celles du polynôme d'approximation.
% disp('le coefficient de corrélation'); R
% [P,S] = POLYFIT(X,Y,N) ; errorbar(ytc,err)
Traitement de la courbe d'H% du constructeur par fitting
% x = 1:1:22; % Heures de séchage
% yhc = [26 26 26 26 26 26 26 26 25.1 24.9 24.3 23.4 22 20.2 18.1 15.5 12.6 9.3 6.4 4.4 3.2
2.8];%valeurs constructeur.
% plot(x,yhc),hold on %graphe des valeurs initiales constructeur.
% p = polyfit(x,yhc,4); % Approximation avec un polynôme d'ordre 4 au sens de la MMC.
% polyn = polyval(p,x),hold on ; % graphe d'évaluation du modèle d'ordre 4 sur
% toutes les composantes du vecteur X.
% plot(x,polyn,'-') % courbe du modèle choisi.
% err = yhc-polyn; %Erreur entre le polynôme et les valeurs initiales (constructeur)
% plot(x,err,'*'), hold on %graphe de l'erreur entre les deux ensembles de valeurs.
% disp('polynôme de fitting est')
% p % paramètres du modèle d'approximation.
% var_err = num2str(std(err)^2); % variance de l'erreur qui doit tendre vers zéro.
% disp('la variance de l'erreur de fitting est');
% var_err
% R = (corrcoef(yhc,polyn))% Coefficient de corrélation entre les valeurs constructeur.
%et et celles du polynome d'approximation.
% disp('le coefficient de corrélation'); R
% errorbar(yhc,err)
Traitement de la courbe de T°C du modèle simulé par fitting
% x = 1:1:22; % Heures de séchage
% yts=[28.75 30.93 32.02 33.12 34.21 35.30 36.39 37.48 38.57 39.66 40.75 41.84 44.71 48.09
52.37 57.54 63.59 69.02 74.45 79.88 85.31 90.74];%valeurs constructeur.
% plot(x,yts),hold on %graphe des valeurs initiales constructeur.
% p = polyfit(x,yts,4); % Approximation avec un polynôme d'ordre 4 au sens de la MMC.
% polyn = polyval(p,x);hold on ;
% graphe d'évaluation du modèle d'ordre 4 sur toutes les composantes du vecteur X.
% plot(x,polyn,'-') % courbe du modèle choisi.
% err = yts-polyn; %Erreur entre le polynôme et les valeurs initiales (constructeur)
% % plot(x,err,'*'), hold on %graphe de l'erreur entre les deux ensembles de valeurs.
% disp('polynome de fitting est')
% p % paramètres du modèle d'approximation.
% var_err = num2str(std(err)^2); % variance de l'erreur qui doit tendre vers zéro.
% disp('la variance de l'erreur de fitting est');
% var_err
% R = (corrcoef(yts,polyn));% Coefficient de corrélation entre les valeurs constructeur.
% %et et celles du polynôme d'approximation.
% disp('le coefficient de corrélation');
R , errorbar(yts,err)

```

```

Traitement de la courbe de H% du modèle simulé par fitting
% x = 1:1:22; % Heures de séchage

```

```
% yhs = [25.8284 25.6873 25.6064 25.5237 25.4398 25.3553 25.2704 25.1850 25.0995 24.7195
23.5964 22.0846 20.1950 17.9177 15.2508 12.3187 8.8771 4.6510 2.8077 1.8058 1.6542
1.3745];%valeurs simulées.
```

```
% plot(x,yhs),hold on %graphe des valeurs initiales constructeur.
```

```
% p = polyfit(x,yhs,4); % Approximation avec un polynôme d'ordre 4 au sens de la MMC.
```

```
% polyn = polyval(p,x);,hold on ; % graphe d'évaluation du modèle d'ordre 4 sur
```

```
% % toutes les composantes du vecteur X.
```

```
% plot(x,polyn,'-') % courbe du modèle choisi.
```

```
% err = yhs-polyn; % Erreur entre le polynôme et les valeurs initiales (constructeur)
```

```
% % plot(x,err,'*'), hold on %graphe de l'erreur entre les deux ensembles de valeurs.
```

```
% disp('polynome de fitting est')
```

```
% p % paramètres du modèle d'approximation.
```

```
% var_err = num2str(std(err)^2); % variance de l'erreur qui doit tendre vers zéro.
```

```
% disp('la variance de l'erreur de fitting est'); var_err
```

```
% R = (corrcoef(yhs,polyn))% Coefficient de corrélation entre les valeurs d'H% du constructeur.
```

```
% et celles du polynôme d'approximation. ; disp('le coefficient de corrélation');
```

```
% R , errorbar(yhs,err)
```

COMPARAISON DES 2 POLYNÔMES REPRESENTANT T°C DU CONSTRUCTEUR ET T°C SIMULEE

```
% x = 1:1:22;
```

```
% NOTA BENE:les courbes réelles obtenues sont :
```

```
% (yts = -0.0011*x.^4 + 0.0552*x.^3 - 0.7827*x.^2 + 4.8515*x + 23.8805);
```

```
% (ytc = -0.00068*x.^4 + 0.037*x.^3 - 0.54*x.^2 + 3.7*x + 24;)
```

```
% LES COURBES FINALES OBTENUES SONT :
```

```
% yts = -0.0011*x.^4 + 0.0552*x.^3 - 0.7827*x.^2 + 5.27*x + 22.8805;
```

```
% ytc = -0.00068*x.^4 + 0.037*x.^3 - 0.54*x.^2 + 4.20*x + 22.1;
```

```
% plot(x,yts,'-',x,ytc,'*'), hold on
```

```
% err = yts - ytc; plot(x,err); errorbar(ytc,err)
```

```
% var_err = num2str(std(err)^2);% variance de l'erreur devant tendre vers zéro.
```

```
% disp('la variance de l'erreur de fitting est');
```

```
% var_err % 0.59443 ; R = (corrcoef(ytc,yts));
```

```
% disp('le coefficient de corrélation');
```

```
% R =1.0000 0.9996 ; 0.9996 1.0000.
```

COMPARAISON DES 2 POLYNÔMES REPRESENTANT H% DU CONSTRUCTEUR ET SIMULEE:

```
x = 1:1:22;
```

```
% (yhs = 0.0013*x.^4 - 0.0576*x.^3 + 0.6951*x.^2 - 2.9395*x + 28.9016;)
```

```
% (yhc = 0.00089*x.^4 - 0.04*x.^3 + 0.49*x.^2 - 2.1*x + 28;)
```

```
LES COURBES FINALES OBTENUES ET UTILISEES SONT :
```

```
yhs = 0.001317*x.^4 - 0.057*x.^3 + 0.6951*x.^2 - 3.02*x + 29.5;
```

```
yhc = 0.00089*x.^4 - 0.04*x.^3 + 0.49*x.^2 - 2.2*x + 28.4;
```

```
plot(x,yhs,'-',x,yhc,'*'), hold on
```

```
err = yhs - yhc; plot(x,err); errorbar(yhc,err)
```

```
var_err = num2str(std(err)^2);% variance de l'erreur devant tendre vers zéro.
```

```
disp('la variance de l'erreur de fitting est');
```

```
var_err ;R = (corrcoef(yhc,yhs));
```

```
disp('le coefficient de corrélation'); R
```

B/ Programmation du contrôleur flou en pseudo-langage sur API (cf. Chapitre V.3.3.1.)

```
FUNCTION_BLOCK Fuzzy_SECHOIR_A_CERAMIQUE
```

```
VAR_INPUT
```

```
temp: REAL;
```

```
humidity: REAL;
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```

register_adm: REAL;
register_ext : REAL;
register_rec: REAL;
END_VAR
FUZZIFY temp
  TERM basse:= (1,1)(25,1)(30,1)(54,0);
  TERM bonne:= (30,0)(54,1)(60,1)(84,0);
  TERM élevée:= (60,0)(84,1)(91,1)(115,1);
END_FUZZIFY
FUZZIFY humidity
  TERM basse := (-37,1)(1,1)(61,0);
  TERM bonne:= (1,0)(50,1)(100,0);
  TERM élevée:= (51,0)(100,1)(151,1);
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY register_adm
  TERM dimf := (-2.5,0)(-0.25,1)(1,1)(1.5,0);
  TERM dimp := (1,0)(1.5,1)(3.5,1)(4,0);
  TERM maint := (3.5,0)(4,1)(6,1)(6.5,0);
  TERM augmp := (6,0)(6.5,1)(8.5,1)(9,0);
  TERM augmf := (8.5,0)(9,1)(10,1)(12.3,0);
  TERM zéro := none
  ACCU : MAX;
  METHOD : COGS;
  DEFAULT := 0;
END_DEFUZZIFY
DEFUZZIFY register_ext
  TERM dimf := (-2.5,0)(-0.25,1)(1,1)(1.5,0);
  TERM dimp := (1,0)(1.5,1)(3.5,1)(4,0);
  TERM maint := (3.5,0)(4,1)(6,1)(6.5,0);
  TERM augmp := (6,0)(6.5,1)(8.5,1)(9,0);
  TERM augmf := (8.5,0)(9,1)(10,1)(12.3,0);
  ACCU : MAX;
  METHOD : COGS;
  DEFAULT := 0;
END_DEFUZZIFY
DEFUZZIFY register_rec
  TERM dimf := (-2.5,0)(-0.25,1)(1,1)(1.5,0);
  TERM dimp := (1,0)(1.5,1)(3.5,1)(4,0);
  TERM maint := (3.5,0)(4,1)(6,1)(6.5,0);
  TERM augmp := (6,0)(6.5,1)(8.5,1)(9,0);
  TERM augmf := (8.5,0)(9,1)(10,1)(12.3,0);
  ACCU : MAX;
  METHOD : COGS;
  DEFAULT := 0;
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK No1
  AND : MIN;
  RULE 1 : IF temp IS basse AND humidity IS basse THEN
    register_ext IS dimp AND register_adm IS augmp AND register_rec IS none;
  RULE 2 : IF temp IS basse AND humidity IS bonne THEN
    register_ext IS dimp AND register_adm IS augmp AND register_rec IS none;
  RULE 3 : IF temp IS basse AND humidity IS élevée THEN
    register_ext IS augmf AND register_adm IS maint AND register_rec IS none;
  RULE 4 : IF temp IS.....etc ( voir la matrice d'inférence);
  Etc..
END_RULEBLOCK
END_FUNCTION_BLOCK

```