

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de Master 2*

Spécialité : *Génie des Procédés des Matériaux*

**Thème**

**Analyse Energétique du Procédé de  
Séchage d'une Unité de Carreaux  
Céramiques**

**Présenté par : REKIBA REDHA**

**Encadré par: Pr D.TOUIL**

Blida, septembre 2019/2020

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma très chère mère.*

*À ma chère femme et mes adorables enfants*

*Tharaa ;Mohamed Abderraouf;Abderrahmene*

*Toute mafamille; ma belle famille*

*Et mes amis*

*A toute personne qui a contribué de près ou loin à*

*l'élaboration de ce travail.*

**REKIBA REDHA**

## Remerciements

je tiens tout d'abord à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

je voudrais exprimer mes vifs remerciements à mon professeur **Djamel Touil**, pour m'avoir encadré tout le long de ce travail, pour sa patience et ses encouragements, pour l'aide, ces conseils éclairés, et son soutien moral.

Je remercie les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de juger mon travail de fin d'études.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche et de le mener à terme.

***REKIBA REDHA***

## Table des matières

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Nomenclature

Introduction générale.....1

### Chapitre I : Présentation de l'unité céramique

Introduction.....2

1.1 Présentation de l'unité HIPPOCAMPE CERAMIQUE.....2

1.2 Matières premières utilisées.....2

1.2.1 Matières naturelles.....2

1.2.2 Matières synthétiques.....3

1.3 Descriptif de la ligne de production.....3

1.3.1 Broyage humide des matériaux.....4

1.3.2 Séchage et stockage de la poudre atomisée.....4

1.3.3 Atelier de pressage.....4

1.3.4 Atelier de séchage.....5

1.3.5 Emaillage.....5

1.3.6 Cuisson des carreaux céramiques.....6

1.3.7 Triage et sélection.....7

### Chapitre 2 : Procédé et Paramètres Opératoires du Sécheur Atomiseur

Introduction .....8

2.1 Description du Sécheur Atomiseur.....8

2.1.1 Principaux Equipements.....9

2.2 Procédé de fonctionnement du Cycle d'atomisation.....12

2.3 Paramètres Opératoires.....12

2.3.1 Spécifications et dimensions géométriques.....12

2.3.2 Conditions opératoires.....13

2.3.2.1 Paramètres opératoires collectées et relevées.....	13
2.3.2.2 Paramètres opératoires Design.....	14

### **Chapitre 3 : Modélisation du Procédé d'Atomisation de la Barbotine**

Introduction.....	15
3.1 Principe du Procédé d'atomisation.....	15
3.2 Modélisation de l'atomisation de la Barbotine céramiques.....	16
3.2.1 Représentation du Système de Séchage.....	16
3.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	17
3.2.3 Equations du modèle.....	18
3.2.3.1 Bilans massiques.....	18
3.2.3.2 Bilans thermiques.....	19
3.2.3.3 Efficacité thermique de séchage.....	20
3.2.3.4 Données de calcul du modèle.....	21
3.3 Résolution du modèle.....	22
3.4 Résultats et interprétations.....	22

### **Chapitre 4 : Résultats et Interprétations**

Introduction.....	24
4.1 Variables opératoires de décision.....	24
4.2 Influence des paramètres opératoires sur le rendement thermique.....	24
4.2.1 Effet de la température du gaz naturel.....	24
4.2.2 Effet de la température d'air de combustion.....	25
4.2.3 Effet de la température d'air ambiant sur le rendement.....	25
4.2.4 Effet de la température d'air de séchage.....	26
4.2.5 Effet de la température de barbotine.....	26
4.2.6 Effet du facteur d'air de combustion.....	27
4.2.7 Effet du rendement de combustion.....	27
4.2.8 Effet de l'humidité de l'air introduit de séchage.....	28
4.2.9 Effet de la teneur d'eau de la barbotine.....	28
Conclusion générale.....	29

## Liste des figures

Figure I.1 : Lieu d'implantation de l'unité HIPPOCAMPE 2.....	2
Figure I.2 : Stockage des matières Premières.....	3
Figure I.3 : Organigramme du processus de fabrication des carreaux céramiques.....	3
Figure I.4 : Sécheur Atomiseur.....	4
Figure I.5 : Stockage poudre atomisé.....	4
Figure I.6 : Presses hydrauliques.....	5
Figure I.7 : Séchoir horizontal.....	5
Figure I.8 : Four tunnel de cuisson.....	6
Figure II.1 : Schéma du Sécheur Atomiseur SACMI -ATM 52.....	9
Figure II.2 : Spécifications géométriques de l'Atomiseur.....	12
Figure III.1: Schéma de principe d'un Sécheur Atomiseur.....	15
Figure III.2: Buse de Pulvérisation.....	16
Figure III.3: Schéma représentatif de l'atomiseur sécheur.....	17
Figure III.4: Organigramme de résolution du modèle.....	23
Figure IV.1: Influence de la température du gaz naturel sur le rendement thermique.....	24
Figure IV.2: Influence de la température d'air de combustion sur le rendement.....	25
Figure IV.3: Influence de la température d'air ambiant sur le rendement thermique.....	25
Figure IV.4: Influence de la température d'air introduit de séchage sur le rendement.....	26
Figure IV.5: Influence de la température entrée barbotine sur le rendement thermique.....	26
Figure IV.6: Influence facteur d'air de combustion sur le rendement thermique.....	27
Figure IV.7: Influence de rendement de combustion sur le rendement thermique.....	27
Figure IV.8: Influence d'humidité de l'air de séchage sur le rendement thermique.....	28
Figure IV.8: Influence de la teneur d'eau de la barbotine sur le rendement thermique.....	28

## Liste des tableaux

Tableau II.1 : Dimensions géométriques du Sécheur atomiseur.....	13
Tableau II.2 : Conditions opératoires de l'atomiseur sécheur.....	13
Tableau II.3 : Dosage Barbotine.....	13
Tableau II.4 : Composition chimique des matériaux utilisés.....	14
Tableau II.5 : Analyse granulométrique de la barbotine.....	14
Tableau II.6 : Paramètres opératoires Design de l'atomiseur.....	14
Tableau III.1 : Valeurs des paramètres de calcul du modèle.....	21
Tableau III.2 : Comparaison des paramètres opératoires calculés et mesurés.....	22

## NOMENCLATURE

- $C_{p_{air}}$ : Capacité calorifique de l'air (kJ/kg.°C)
- $C_{p_B}$ : Capacité calorifique de la barbotine (kJ/kg.°C)
- $C_{p_{GC}}$ : Capacité calorifique des gaz de combustion (kJ/kg.°C)
- $C_{p_{GN}}$ : Capacité calorifique du gaz naturel (kJ/kg.°C)
- $h_{A1}$ : enthalpie spécifique de l'air chaud (kJ/kg)
- $h_{A2}$ : enthalpie spécifique de l'air refroidi humide (kJ/kg)
- $h_c$ : Coefficient de transfert de chaleur par convection (kJ/kg.°C)
- $\Delta h_v$ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ/kg eau)
- $M_{air}$ : Masse molaire du gaz naturel (g/mol)
- $M_{eau}$ : Masse molaire d'eau (g/mol)
- $M_{GN}$ : Masse molaire de l'air (g/mol)
- $m_{A0}$ : Débit d'air introduit (kg/s)
- $m_{A1}$ : Débit d'air chaud (kg/s)
- $m_{A2}$ : Débit refroidi humide (kg/s)
- $m_{AC}$ : Débit d'air combustion (kg/s)
- $m_{eau}$ : Débit d'eau évaporée (kg/s)
- $m_{AS}$ : Débit d'air sec (kg/s)
- $m_{B1}$ : Débit de barbotine humide (kg/s)
- $m_{B2}$ : Débit de barbotine séchée (kg/s)
- $m_{BS}$ : Débit de barbotine sèche (kg/s)
- $m_{GC}$ : Débit des gaz de combustion (kg/s)
- $m_{GN}$ : Débit du gaz naturel (kg/s)
- P: Pression atmosphérique (atm)

$P^s$ : Pression de saturation de l'eau (atm)

PCI: Pouvoir calorifique Inférieur du gaz naturel (kJ/kg)

$Q_{A0}$  : Chaleur véhiculée par l'air introduit (kJ/s)

$Q_{AC}$ : Chaleur véhiculée par l'air comburant de combustion (kJ/s)

$Q_{comb}$  : Puissance thermique totale de combustion (kW)

$Q_p$  : Pertes thermiques (kJ/s)

$Q_{GN}$  : Chaleur véhiculée par le combustible (kJ/s)

$T_A$ : Température de l'air de séchage (°C)

$T_{A0}$ : Température de l'air introduit (°C)

$T_{A1}$ : Température de l'air chaud de séchage (°C)

$T_{A2}$ : Température de l'air refroidi humide (°C)

$T_{AC}$ : Température l'air comburant (°C)

$T_B$ : Température de la barbotine (°C)

$T_{B1}$ : Température de la barbotine humide (°C)

$T_{B2}$ : Température de la barbotine séchée (°C)

$T_{GC}$ : Température des gaz de combustion (°C)

$T_{GN}$ : Température du Gaz naturel (°C)

$T_0$ : Température ambiante de référence (°C)

$V$ : Volume de l'atomiseur ( $m^3$ )

$V_{air}^{st}$  : Volume d'air stœchiométrique spécifique ( $Nm^3_{air}/Nm^3_{GN}$ )

$W_{A0}$ : Teneur d'eau dans l'air (%)

$W_{B1}$ : Teneur d'eau dans la barbotine (%)

$w_{GC}$  : Teneur d'eau dans les gaz de combustion

$X_{B1}$ : Teneur d'eau de la barbotine humide (kg d'eau/ kg de barbotine sèche)

$X_{B2}$ : Teneur d'eau de la barbotine séchée (kg d'eau/ kg de barbotine sèche)

$Y_{A1}$ : Humidité absolue de l'air chaud (kg d'eau/ kg d'air sec)

$Y_{A2}$ : Humidité absolue de l'air refroidi humide (kg d'eau/ kg d'air sec)

$\rho_{\text{air}}$ : Masse volumique de l'air aux CNTP (kg /Nm<sup>3</sup>)

$\rho_{\text{GN}}$ : Masse volumique du gaz naturel aux CNTP (kg /Nm<sup>3</sup>)

$\lambda$ : Facteur d'air

$\eta_C$ : Rendement de combustion

$\phi$ : Humidité relative de l'air introduit (%)

$\eta_T$ : Rendement thermique Atomiseur

## **Résumé :**

Un modèle de l'atomiseur sécheur d'une unité de céramiques est proposé sur la base des données recueillies sur une installation industrielle de séchage de la barbotine. Le modèle est de type génie chimique, basé sur les bilans massiques et thermiques. Le modèle moyennement validé, a permis d'étudier la sensibilité du rendement thermique du sécheur à différentes conditions opératoires. Les résultats montrent que le rendement de combustion, le facteur d'air, et sa température ont une influence significative sur le rendement énergétique du sécheur.

**Mots clés** : séchage, combustion, céramiques, bilan énergie, modélisation

**ملخص:** هذا النموذج رذاذ التجفيف لوحد الخزف (سيراميك) المقترح على أساس جمع البيانات من تركيبة صناعية لتجفيف خليط السائل لبلاط سيراميك, وهو نموذج من الهندسة الكيميائية الذي يعتمد على التوازنات الكتلية والحرارية و ذات توازن معتدل الذي يسمح بدراسة مدى تأثير الكفاءة الحرارية للمجفف ذات حالات مختلفة, النتائج تبين أن الكفاءة الاحتراق وعامل الهواء ودرجة الحرارة لها تأثير كبير على كفاءة الطاقة للمجفف.

A model of the atomizer dryer of a ceramic unit is proposed for an industrial facility dryer of the slip. The model is of chemical engineering type, based on mass and heat balances. The moderately validated model made it possible to study the sensitivity of the thermal efficiency of the dryer to different operating conditions. The results indicate that the combustion efficiency, air factor, and its temperature have a significant influence on the energy efficiency of the dryer.

**Keywords:** drying, combustion, ceramics, energy balance, modeling



## Introduction générale

L'industrie des briques et céramiques est un secteur consommateur d'énergie et une source émettrice de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et les imbrûlés), provenant des besoins en énergie calorifique pour la cuisson des briques et céramiques, de la production d'électricité consommée. La volonté affirmée de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans ce secteur, doit porter sur la maîtrise de l'énergie par des actions à entreprendre en faveur de l'accroissement de l'efficacité énergétique. Ce qui permet de préserver l'environnement et de prolonger la durée de vie des ressources fossiles au profit des générations futures

Si par le passé, les aspects liés à la marche des lignes de production ont relégué au second plan les préoccupations tendant à l'élimination des facteurs polluants et aux réductions des coûts en général, aujourd'hui dans un environnement concurrentiel, l'analyse énergétique devient essentielle pour déceler les améliorations potentielles et les économies qui en découlent. D'où la nécessité de passer par ce diagnostic en vue de maîtriser à tous les stades, les coûts de fabrication.

L'unité « HIPPOCAMPE CERAMIQUE » située à Chaiba- Bou Ismail, wilaya de Tipaza fait appel à un procédé et à des équipements complexes. Pour réduire ces coûts et améliorer la productivité, une gestion optimisée de l'énergie concrétisée par son utilisation rationnelle est devenue indispensable.

Ce travail a pour finalité la modélisation du procédé de séchage par atomisation du mélange de matières premières et d'eau qui constituent la barbotine céramique, en vue de permettre l'optimisation des conditions opératoires. L'approche retenue vise à satisfaire les objectifs d'économie d'énergie et de maîtrise de la qualité du produit.

La réalisation de cette étude s'articule autour des étapes suivantes :

- Modéliser le procédé de séchage atomisation de la barbotine céramique de l'unité
- Etudier la sensibilité du procédé et sa consommation spécifique d'énergie aux différents paramètres opératoires
- Identifier pour ce procédé, les mécanismes et les causes qui président à leur imperfection thermodynamique.

## Chapitre 1 : Présentation Générale de l'Unité Céramique : Cas d'étude

### Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et la description de l'unité Céramique dans laquelle nous avons effectué notre stage.

### 1.1. Présentation de l'unité HIPPOCAMPE CERAMIQUE

La société SARL HIPPOCAMPE créée en 1990, active dans le domaine de l'industrie céramique. Elle est implantée au niveau de la route de Chaiba- Bou Ismail wilaya de Tipaza (figure I.1), d'une superficie de 7 hectares dont 2.6 hectares couvertes (bâtiment de production). L'unité compte 330 employés permanents et elle possède une capacité de production réelle annuelle de 5200 000 m<sup>2</sup> de carreaux céramiques, soit une production de 256,4 tonnes/jour (à raison de 18 kg par m<sup>2</sup>).



Figure I.1. Lieu d'implantation de l'unité HIPPOCAMPE

### 1.2 Matières premières utilisées :

#### 1.2.1 Les matières naturelles

Elles sont constituées par les argiles provenant de carrière (Sidi Rached et Khemis Miliana) par les sables fins quartzueux de Boussaâda et par le feldspath provenant de la région de

Mkiradans la wilaya de Tizi Ouzou. Toutes ces matières sont stockées séparément à l'air libre pour assurer leur processus de préparation (figure I.2).



**Figure I.2 Stockage des matières Premières**

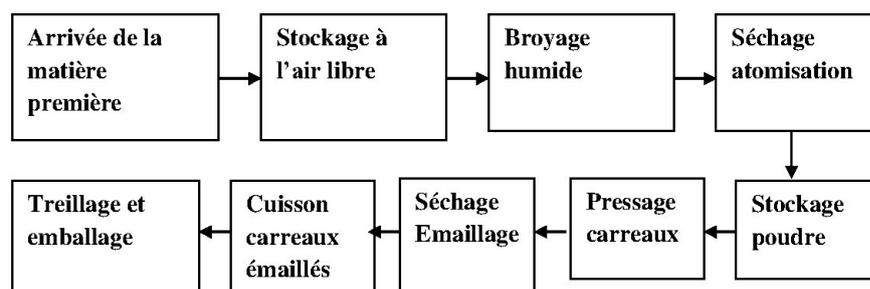
### 1.2.2 Matières synthétiques

Les matières synthétiques représentent les émaux, les oxydes colorants et les matières de sérigraphie.

- Les émaux : composés d'un mélange de frites (produit de fusion) et de kaolin, broyés en voie humide à une granulométrie inférieure à  $80 \mu\text{m}$ , ils sont appliqués sur le produit pour donner les carreaux faïence ou les carreaux sols
- Les oxydes colorants : produits obtenus à partir de minéraux naturels après broyage, ils sont appliqués sur les carreaux émaillés pour donner différentes décorations [1].

### 1.3 Descriptif de la ligne de production [1]

La ligne de productions se compose d'une série d'équipements reliés entre eux et destinés à la fabrication de carreaux céramiques émaillés. Ces équipements agencés en ateliers séparés se composent selon l'organigramme représenté en figure I.3.



**Figure I.3. Organigramme du processus de fabrication des carreaux céramiques**

### 1.3.1. Broyage humide des matériaux

Les matières premières sont mélangées dans des proportions diverses pour former ce qu'on appelle une composition de masse devant servir à une préparation de broyage en voie humide avec un apport de 38 à 40 % d'eau et d'un ajout flocculant approprié, donnant un produit visqueux de densité 1,6 tonne/m<sup>3</sup>.

### 1.3.2. Séchage et stockage de la poudre atomisée

Le produit appelé barbotine est ensuite envoyé par des pompes à membranes au niveau d'un atomiseur (figure I.4) au contact d'un air chaud de 450 à 500°C. Il se transforme en granulés avec une humidité de 4,5 à 6 %. Le produit appelé poudre arrive par le biais de transporteurs à bandes jusqu'aux silos de stockage installés à l'entrée du bâtiment de production. Elle est stockée au niveau de silos métalliques étanches pour une meilleure homogénéisation de son humidité (figure I.5). Les silos de stockage permettent une autonomie minimale de sept jours.



Figure I.4. Sécheur Atomiseur



Figure I.5 Stockage poudre atomisé

### 1-3.3. Atelier pressage

L'atelier pressage se compose de trois presses hydrauliques (figure I.6). La poudre avec une humidité de 5% en moyenne est chargée au niveau des moules de forme rectangulaire de dimension choisies est compactée avec une pression variant entre 180 et 300 bars en fonction du produit à fabriquer. Les carreaux crus ainsi obtenus, sont extraits des moules automatiquement et nettoyés par brosse et raclage pour les débarrasser des poussières excédentaires et des bords d'angles. Les carreaux crus doivent avoir une résistance à la flexion en cru suffisante pour supporter ces opérations d'extraction, de brosse et de manutention jusqu'à l'atelier séchage



**Figure I.6. Presses hydrauliques**

### **1-3.4 Atelier séchage**

Les carreaux crus entrent dans un séchoir horizontal à rouleaux (figure I.7) qui sont mis en mouvements (rotation) à l'aide de mécanismes électromécaniques. Les rouleaux acheminent les carreaux en rangées à travers le séchoir pour leur permettre de se débarrasser de leur humidité excédentaire au moyen d'un échange de chaleur rapide sous une température de 200 à 250°C pour abaisser leur humidité à moins de 1% et acquérir une résistance mécanique suffisante pour permettre leur manutention au niveau des ateliers situés en aval.



**Figure I.7. Séchoir horizontal**

### **1-3.5 Emaillage**

Les carreaux sortent du séchoir avec une température comprise entre 80 et 100°. Ils sont transportés jusqu'aux lignes d'émaillages où les carreaux avancent sur des courroies en mouvement pour subir toutes les opérations d'application d'engobes, d'émaillage et

d'application décoratives. Ils sont ensuite stockés dans des box composés de plateaux avec des rouleaux pour permettre leur chargement automatique.

### 1-3.6 Cuisson des carreaux céramiques

Les carreaux émaillés sont extraits des box de stockage et transportés sur des courroies en mouvement jusqu'à l'entrée du four (figure I.8). Ils sont ensuite arrangés en rangées sur toute la largeur du four et poussées sur les rouleaux en mouvement depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Le four se compose d'une zone de préchauffage où les carreaux sont débarrassés de leur humidité résiduelle et subissent la décarbonatation. Après la zone de préchauffage on passe à une zone, de cuisson où le carreau passe par un palier avec une température maximale. La réaction entre les différents minéraux contenus dans le mélange s'achève au niveau de cette zone. Après cette zone vient une zone de refroidissement forcé avec injection d'air frais à travers des trous existants aux niveaux de tubes métalliques. D'une température de cuisson variant entre 1100 et 1160°C, les carreaux descendent à une température de 600 à 650°C. Cette zone de refroidissement forcée est suivie par une zone de refroidissement lente qui doit permettre aux carreaux de passer très lentement le point de transformation allotropique du quartz (580°C) pour lui permettre de garder sa résistance mécanique. Après cette zone de refroidissement lente, les carreaux subissent un refroidissement rapide jusqu'à la sortie du four de manière à sortir avec une température qui permet sa manipulation manuelle.



**Figure I.8. Four tunnel de cuisson**

### **1-3.6 Triage et sélection**

A leur sortie du four les carreaux sont dirigés par un tapis en mouvement sur une ligne de transport à courroies en mouvements vers un poste de triage et de sélection où chaque carreau subit un contrôle visuel des aspects visibles du carreau, et sa planéité. Les carreaux présentant des irrégularités sont écartés ou classés dans une catégorie de qualité inférieure. Les carreaux entrant dans la catégorie premier choix sont dirigés vers une machine d'emballage qui est chargée de mettre en boîte les carreaux par paquet d'un mètre ou un mètre carré et demi. Les paquets ainsi formés, sont placés sur des palettes et scellés avec un film plastique et sertis avec des sangles métalliques pour faciliter leur chargement. Toutes les opérations décrites précédemment sont entièrement automatisées ; un personnel spécialisé surveille les différentes opérations à travers des pupitres des commandes et intervient quand il le faut à la suite du déclenchement des alarmes de chaque automate.

## Chapitre 2 Procédé et Paramètres Opératoires du Sécheur Atomiseur

### Introduction

Ce chapitre a pour but de décrire le principe de fonctionnement du sécheur atomiseur de l'unité céramique étudiée et de donner les paramètres opératoires de ce procédé, collectés et relevés in-Situ.

### 2.1 Description du Sécheur Atomiseur [2]

L'installation pour la préparation des poudres céramiques par atomisation et séchage de la barbotine avec de l'air chaud produit, et permet grâce à un procédé en continu, d'obtenir des poudres à granulométrie et à humidité définies, à les presser pour la production de carreaux ou de vaisselle.

Le réglage ainsi que le contrôle du contenu en humidité résiduelle des poudres peuvent être effectués en manuel ou en automatique. La continuité du procédé et le contrôle aisé de la machines permettent une distribution constante de la granulométrie tout au cours des années. L'installation du sécheur atomiseur est représentée en figure II.1

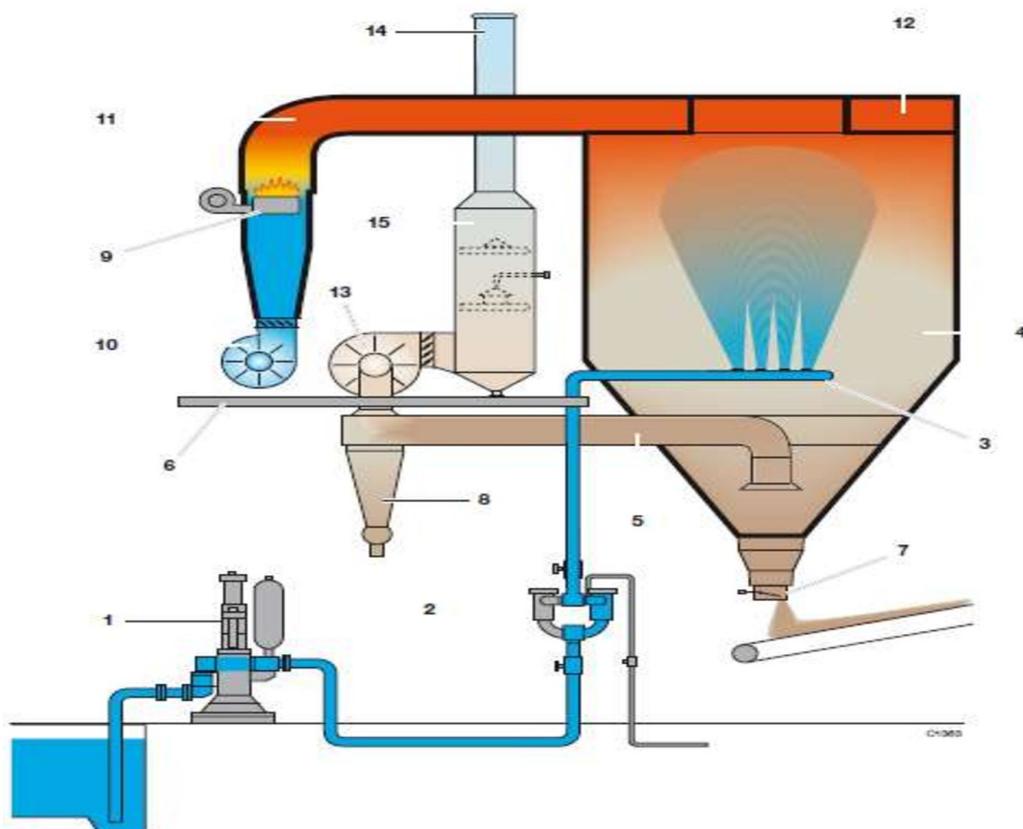


Figure II.1 Schéma du Sécheur Atomiseur SACMI -ATM 52

## **Légende**

1 Pompe d'alimentation de la barbotine, 2 Filtres, 3 Anneau de distribution du porte-buses, 4 Tour de séchage, 5 Tubes de l'air vicié, 6 Plate-forme de service, 7 Vanne de décharge des poudres, 8 Cyclones de séparation, 9 Brûleur, 10 Ventilateur de pressurisation, 11 Conduits de l'air chaud, 12 Distributeur de l'air chaud, 13 électro ventilateur principal, 14 Cheminée, 15 Séparateur par voie humide

### **2.1.1 Principaux Equipements**

- **Filtres**

Sur la ligne d'alimentation de la barbotine, formée par un tube en acier zingué, se trouvent deux filtres pouvant fonctionner alternativement, en manœuvrant les soupapes appropriées, pour les opérations de lavage.

Ils sont munis d'un groupe pneumatique qui amène l'eau aux buses en cas de panne de courant, pour que la barbotine ne sèche pas à l'intérieur des tuyaux.

- **Anneau de distribution porte-buses.**

L'anneau de distribution porte-buses est entièrement construit en acier inoxydable et est pourvu de raccords pour monter les gicleurs. Le nombre ainsi que le type de buses à utiliser est établi sur la base des caractéristiques de la matière à atomiser et des résultats que l'on veut obtenir (production, granulométrie et humidité).

- **Tour de séchage.**

La tour de séchage se compose d'une partie cylindrique, constituant la vraie tour de séchage, d'une partie conique où la matière atomisée est recueillie et d'une partie supérieure de fermeture comprenant le distributeur de l'air chaud. Toutes les parois de la tour sont en acier inoxydable revêtues en partie extérieure de laine de roche. La tour de séchage est munie d'une porte d'inspection, étanche à l'air, avec hublot et d'un deuxième hublot ouvrant, complété de phare pour l'éclairage à l'intérieur afin de contrôler visuellement le procédé d'atomisation.

- **Vanne de décharge des poudres.**

La vanne de décharge des poudres en contre-poids avec refroidisseur refroidit et décharge la poudre atomisée. L'air à température ambiante arrive à travers une série d'ouvertures réglables. L'air rencontre la matière atomisée tout en la refroidissant.

- **Cyclones de Séparation.**

Les cyclones de séparation sont construits en acier inoxydable. Ils sont pourvus de vanne pour décharger les poudres et de portes d'inspection ; ils constituent le premier niveau de séparation des poudres pour l'air vicié qui sort de la tour. Ils sont toujours placés avant le ventilateur principal, pour protéger ce dernier contre l'usure causée par une concentration très élevée de poudres.

- **Brûleur**

Il est muni de tous les dispositifs de sécurité prévus par les normes en vigueur. Le brûleur est du type caréné pour combustibles gazeux et à air soufflé pour combustibles liquides. Dans les deux cas, le réglage de la flamme se fait par un système qui débite la quantité de combustible en fonction de la valeur de la température que l'on veut obtenir. L'installation d'alimentation du combustible peut varier selon le type de combustible utilisé : gazeux, liquide léger ou liquide dense.

- **Ventilateur de pressurisation.**

Il est placé à la base du générateur de chaleur et est du type centrifuge pour obtenir un débit élevé et une prévalence faible. Il est muni d'une soupape motorisée sur la ligne de refoulement qui permet de régler le vide à l'intérieur de la tour de séchage. Un transducteur de pression contrôle le vide à l'intérieur de la tour et la valeur de pression établie est maintenue grâce au système de contrôle qui agit sur la soupape motorisée.

- **Générateur de chaleur et conduits de l'air chaud**

Pour le combustible gazeux, le générateur d'air chaud est construit en tôle d'acier calorifugée à l'intérieur avec de la laine de roche et de la fibre céramique.

Les conduits de l'air chaud relient le générateur au distributeur d'air chaud placé sur la partie supérieure de la tour. Ils sont construits en tôle d'acier isolée du point de vue thermique avec de la laine de roche et de la fibre céramique dans la partie interne et reliés au distributeur par un joint de compensation.

- **Distributeur d'air chaud.**

Le distributeur d'air chaud, placé sur la partie supérieure de la tour de séchage, se compose d'une entrée périphérique tangentielle et d'un système de conduits qui donnent à l'air un mouvement rotatoire formant un tourbillon facilitant ainsi l'échange de l'air chaud avec le matériel. Toutes les surfaces à l'intérieur du distributeur sont réalisées en tôle d'acier

inoxydable. La surface supérieure est isolée aussi à l'extérieur avec une double couche de laine de roche.

- **Ventilateur principal**

Le ventilateur principal, de type centrifuge, à prévalence moyenne, est placé après les cyclones de séparation. Il est muni d'une soupape motorisée sur la ligne d'aspiration permettant de régler le débit de l'air.

- **Cheminée**

La cheminée constitue la partie terminale du système de circulation de l'air en le reliant à l'extérieur pour faire sortir l'air vicié.

## **2.2 Procédé de Fonctionnement du Cycle d'atomisation [2]**

La barbotine, avec un contenu en eau préétabli selon les caractéristiques des matières premières, est aspirée par la pompe<sup>1</sup> et pompée à une pression constante, à travers les filtres<sup>2</sup> qui en retiennent éventuellement les impuretés, à une série de buses avec orifice calibré.

Les buses, montées sur l'anneau de distribution<sup>3</sup>, nébulisent la barbotine à l'intérieur de la tour de séchage<sup>4</sup>. L'air aspiré par l'électro ventilateur de pressurisation<sup>10</sup> est réchauffé par le brûleur<sup>9</sup> et envoyé à travers le conduit en acier<sup>11</sup>, qui est isolé du point de vue thermique, dans le distributeur annulaire <sup>12</sup> qui le met en rotation en le faisant arriver dans la tour de séchage. C'est là qu'a lieu le séchage de la barbotine.

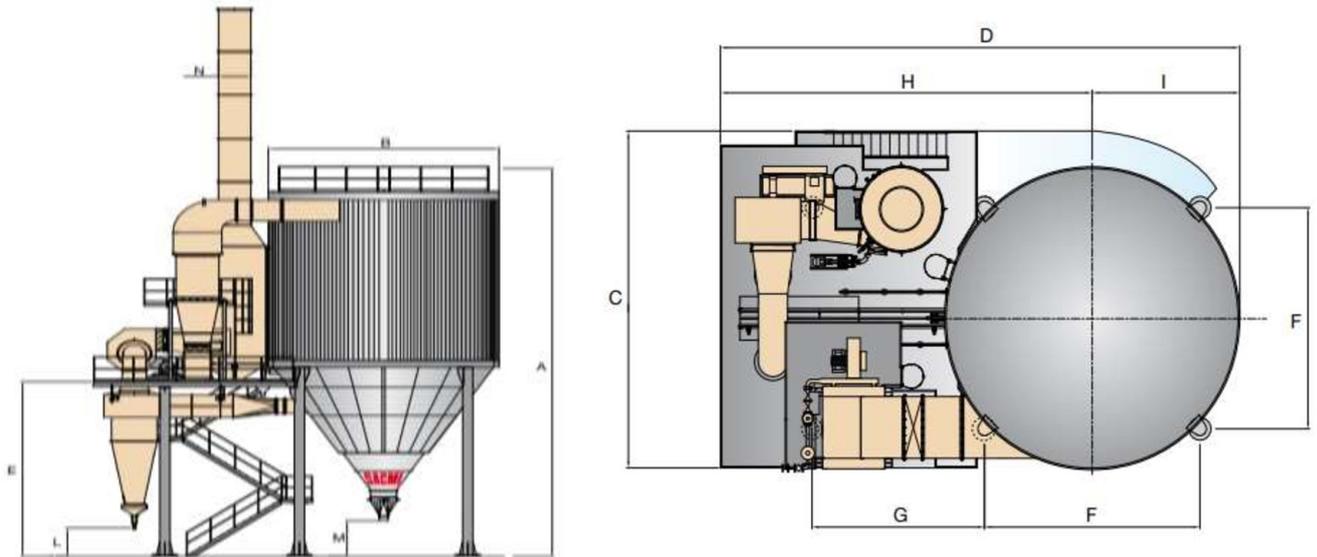
Le produit atomisé tombe sur le fond de la tour de séchage où il est recueilli et acheminé vers la vanne de décharge des poudres <sup>7</sup> sur une bande qui le transporte aux silos de stockage. L'air chargé d'humidité est envoyé vers les cyclones de séparation<sup>8</sup> qui séparent et déchargent une grande partie de la poudre fine en suspension.

A travers l'électro ventilateur principal<sup>13</sup>, l'air humide est introduit dans le séparateur<sup>15</sup> qui termine le traitement de dépoussiérage. Le fluide est expulsé à travers la cheminée<sup>14</sup>. Le cycle d'atomisation est entièrement contrôlé par l'appareil électronique de commande.

## **2.3 Paramètres Opératoires**

### **2.3.1. Spécifications et dimensions géométriques**

Les spécifications et dimensions géométriques du sécheur atomiseur sont données en figure II.2 et au tableau II.1



**Figure II.2. Spécifications géométriques de l'Atomiseur**

**Tableau II.1 Dimensions géométriques du Sécheur atomiseur**

Notation	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N
Dimension (mm)	18950	8100	8950	14200	8050	5875	4700	10150	4050	1300	1650	1130

### 2.3.2 Conditions opératoires [2]

#### 3.2.1 Paramètres opératoires collectées et relevées

La campagne de collecte et de relevé des paramètres opératoires s'est déroulée lors de notre stage au sein de l'unité céramique de BouIsmaïl. Les données opératoires non relevées sont estimées soit à partir des spécifications de fonctionnement des installations ou prises celles du design. Les tableaux ci-après regroupent, les données opératoires de fonctionnement de l'atomiseur, le dosage de la barbotine à l'entrée de l'atomiseur d'une densité de 1650 kg/m<sup>3</sup>, sa granulométrie et la composition chimique de ces matériaux.

**Tableau II.2. Conditions opératoires de l'atomiseur sécheur**

Paramètre Opérateur	Barbotine	Air Procédé	Air Ambient	Gaz naturel
Débit (m <sup>3</sup> /h)	14	40 000	-	650
Granulométrie (Refus tamis 90 µm)	12%	-	-	-
Température entrée (°C)	40	590	25	15
Température sortie (°C)	50	130	-	-
Pression entrée (bar)	15	1	1.013	5
Pression sortie (bar)	0.5	0.04	-	1.3
Humidité entrée (%)	38		60	-
Humidité sortie (%)	6	-	-	-

**Tableau II.3. Dosage Barbotine[1]**

Matière	Argile	Feldspath	Sable	Eau
Fraction massique (%)	37.2	21.7	3.1	38

**Tableau II.4. Composition chimique des matériaux utilisés [1]**

Matière	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PAF	Total
Argile (%)	15.12	15.26	4.32	10.65	1.31	0.42	2.34	0.26	13.24	99.92
Feldspath(%)	72.43	16.52	1.87	1.24	0.54	00	4.45	1.25	1.28	99.58
Sable (%)	92.54	1.21	1.12	1.24	0.27	00	00	00	3.47	99.85

**Tableau II.5. Analyse granulométrique de la barbotine**

Ouverture du tamis (mm)	0.6	0.43	0.3	0.18	0.125	0.09	Assiette
Quantité retenue en %	6	14	28	24	18	8	1.76

- **3.2.2 Paramètres opératoires Design**

Les paramètres opératoires nominaux et les caractéristiques de fonctionnement de l'atomiseur ATM 52 proposés par le constructeur SACMI sont regroupés au tableau II.5 ci-après.

**Tableau II.6. Paramètres opératoires Design de l'atomiseur [2]**

Paramètre Opérateur	Unité	Valeur
Puissance thermique nominale	kW	5 000
Puissance ventilateur air combustion	kW	7.5
Puissance thermique dispersée Parois	kW	174.2
Puissance ventilateur air procédé	kW	90
Débit maximal barbotine	l/h	16 000
Débit air procédé à 100°C	m <sup>3</sup> /h	50 000
Pression maximale barbotine	Bar	30
Pression air procédé à 100°C	mmH <sub>2</sub> O	400
Température air entrée	°C	500-600
Température air sortie	°C	60-130
Consommation spécifique Energie thermique	KJ/kg <sub>H2O</sub>	2926-3553
Nombre de buses avec couronne	-	28

## **Chapitre 3      Modélisation du Procédé d'Atomisation de la Barbotine**

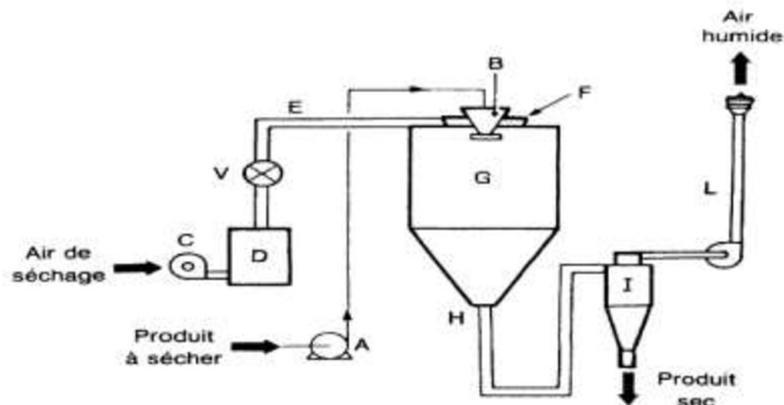
### **Introduction**

Dans ce chapitre, nous développons les équations du modèle proposé pour la représentation du processus de séchage de la barbotine céramiques par atomisation. Le modèle est basé sur les bilans de matière et d'énergie sur l'atomiseur et ses équipements auxiliaires.

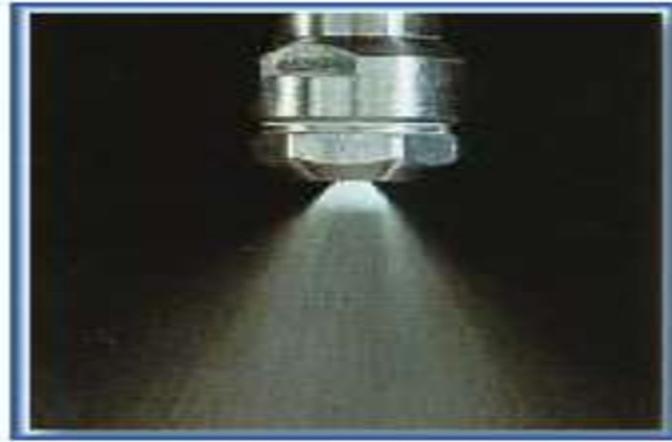
### **3.1 Principe du Procédé d'atomisation [3]**

L'atomisation ("spray drying" en anglais) est une opération unitaire de séchage en continu, largement utilisée dans les industries pharmaceutiques, chimiques, de matériaux de construction ou agroalimentaires. Le séchage par atomisation permet de produire une poudre à partir d'une solution ou suspension liquides, une émulsion ou même une pâte à partir du moment où l'alimentation peut être facilement pompé.

Le principe de base (figure III.1) consiste à pulvériser l'alimentation sous forme d'un brouillard de fines gouttes (de 5 à 500  $\mu\text{m}$ ) par passage à travers une buse (figure III. 2), dans une enceinte où règne une température d'air chauffé au moyen du réchauffeur (D) supérieure à la température d'ébullition du solvant. Grâce à une très grande surface d'échange, l'évaporation du liquide est très rapide : de l'ordre de quelques secondes. Dans le cas d'une solution, la concentration du produit dissous augmente et il y a apparition du solide par cristallisation. Après la phase de séchage, les particules solides sont récupérées en sortie de la chambre d'atomisation et séparées de l'air humide par une unité de séparation gaz - solide. La forme et la taille des particules solides obtenues dépendent du produit atomisé et des conditions de séchage (pression, température, humidité résiduelle).



**Figure III.1. Schéma de principe d'un Sécheur Atomiseur**



**Figure III.2 Buse de Pulvérisation**

### **3.2 Modélisation de l'atomisation de la Barbotine céramiques**

#### **3.2.1 Représentation du Système de Séchage**

La représentation des flux de matière solide et gazeux à l'entrée et à la sortie de l'atomiseur est donnée en figure III.3. Les bilans s'écrivent sur la base des débits constants de barbotine sèche ( $m_{BS}$ ) et d'air sec ( $m_{AS}$ ). Les teneurs en eau sont exprimées en kg d'eau/ kg d'air sec pour l'air et en kg d'eau/ kg de barbotine sèche. Les paramètres opératoires du modèle sont définis ci-après :

$Y$ , humidité absolue de l'air (kg d'eau/ kg d'air sec)

$X$ , teneur en eau de la barbotine (kg d'eau/ kg de barbotine sèche)

$h_A$ , enthalpie spécifique de l'air (kJ/kg)

$T_A, T_B, T_{GN}, T_{GC}$  températures d'air, de la barbotine, du gaz naturel et des gaz de combustion ( $^{\circ}\text{C}$ )

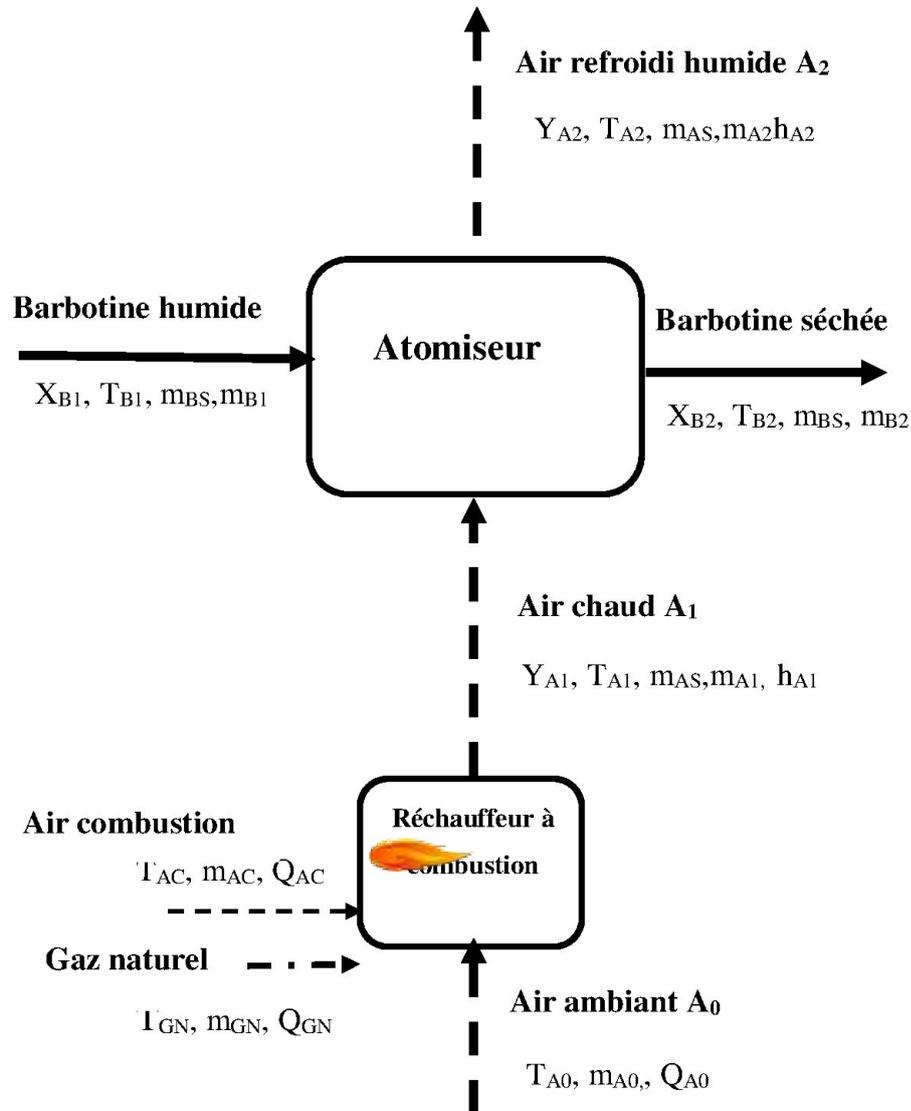


Figure III.3 Schéma représentatif de l'atomiseur sécheur

### 3.2.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier le calcul, un certain nombre d'hypothèses sont considérées :

- La perte au feu de la matière et les entrainements de ses fines particules sont négligeables
- Les fuites et les infiltrations d'air sont négligeables
- La température ambiante  $T_0$  est prise comme température de référence
- La combustion est supposée adiabatique, les gaz de combustion et l'air sont supposés gaz parfaits
- Les propriétés physiques de la barbotine et des gaz sont indépendantes de la température

### 3.2.3 Equations du modèle

#### 3.2.3.1 Bilans massiques

- **Combustion et production d'air chaud**

La conservation du bilan massique lors de la combustion donne :

$$m_{AC} + m_{GN} = m_{GC} \quad (\text{III.1})$$

En introduisant le facteur d'excès d'air de combustion  $\lambda$ , défini par

$$\lambda = \frac{V_{air}^{reel}}{V_{air}^{stoech}} \quad (\text{III.2})$$

on aura :

$$m_{AC} = \lambda V_{air}^{st} \frac{\rho_{air}}{\rho_{GN}} \cdot m_{GN} \quad (\text{III.3})$$

$V_{air}^{reel}$ ,  $V_{air}^{stoech}$ , Volumes spécifiques d'air ( $\text{Nm}^3$  d'air /  $\text{Nm}^3$  de GN) de combustion réel et stœchiométrique [4],

La substitution des équations (III.2) et (III.3) donne :

$$m_{GC} = m_{GN} \left[ 1 + \lambda V_{air}^{st} \frac{\rho_{air}}{\rho_{GN}} \right] \quad (\text{III.4})$$

Le mélange d'air ambiant introduit  $A_0$  avec les gaz de combustion, donne le débit d'air chaud  $m_{A1}$  :

$$m_{A1} = m_{A0} + m_{GC} \quad (\text{III.5})$$

La teneur d'eau  $w_{A1}$  ( $\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}$ ) du débit d'air chaud est calculé par la conservation du bilan massique :

$$m_{A1} \times w_{A1} = m_{A0} \times w_{A0} + m_{GC} \times w_{GC} \quad (\text{III.6})$$

$w_{A0}$ ,  $w_{GC}$  teneurs d'eau de  $m_{A0}$  et de  $m_{GC}$ , la teneur d'eau de  $m_{AC}$  est supposée négligeable.

En considérant le volume d'eau dégagé par la combustion du gaz naturel égal à **2.031**  $\text{Nm}^3$  eau /  $\text{Nm}^3$  de GN [4], la teneur d'eau  $w_{GC}$  s'écrit en fonction des masses molaires  $M_{eau}$ ,  $M_{GN}$

$$w_{GC} = 2.031 \times \frac{M_{eau}}{M_{GN}} \cdot \frac{m_{GN}}{m_{GC}} \quad (\text{III.7})$$

D'autre part, la teneur d'eau dans l'air  $w_{A0}$  est calculée selon [5] par l'équation (III.8) :

$$w_{A0} = \frac{M_{eau}}{M_{air}} \left[ \frac{\phi \times P^s}{P - \left( 1 - \frac{M_{eau}}{M_{air}} \right) \times \phi \times P^s} \right] \quad (\text{III.8})$$

$M_{eau}$ ,  $M_{air}$ ,  $M_{GN}$  Masses molaires d'eau, d'air et du gaz naturel,  $\phi$  humidité relative de l'air,  $P$ , pression atmosphérique

La pression de saturation de l'eau  $P^s$  (atm) dépend de  $T$  en (K) [5], selon l'équation:

$$P^s = \left[ 13.7 - \frac{5120}{T} \right] \quad (\text{III.9})$$

Le débit d'air chaud sec  $m_{AS}$  et sa teneur d'eau  $Y_{A1}$  peuvent ainsi se calculer par :

$$m_{AS} = m_{A1} (1 - w_{A1}) \quad (\text{III.10})$$

$$Y_{A1} = \frac{w_{A1}}{(1 - w_{A1})} \quad (\text{III.11})$$

Par ailleurs, le débit de barbotine sèche et sa teneur en eau  $X$  (kg d'eau/kg de barbotine sèche) sont :

$$m_{BS} = m_{B1} (1 - w_{B1}) \quad (\text{III.12})$$

$$X_{B1} = \frac{w_{B1}}{(1 - w_{B1})} \quad (\text{III.13})$$

$w_{B1}$  étant la teneur d'eau de la barbotine (kg d'eau/kg de barbotine humide)

#### ▪ Procédé de séchage

En considérant la quantité d'eau perdue par la barbotine est restituée à l'air, le bilan d'eau s'écrit :

$$m_{BS} (X_{B1} - X_{B2}) = m_{AS} (Y_{A2} - Y_{A1}) \quad (\text{III.14})$$

D'autre part, le coefficient de calcul de la quantité d'eau évaporée, proposé par le constructeur s'écrit :

$$\alpha = \frac{w_{B1} - w_{B2}}{100 - X_{B1}} \quad (\text{III.15})$$

L'ajustement des valeurs de  $\alpha$  en fonction de la teneur d'eau de la barbotine humide [2], fournies par les données du constructeur (voir annexe), peut s'écrire :

$$\alpha = 0.0255 w_{B1} - 0.503 \quad (\text{III.16})$$

### 3.2.3.2 Bilans thermiques

#### ▪ Combustion

En introduisant le rendement de combustion  $\eta_c$  (supposé indépendant du facteur d'air) caractérisant la présence des imbrulés dans les gaz, la puissance thermique disponible pour la combustion adiabatique, peut s'écrire :

$$Q_{comb} = Q_{GC} \quad (\text{III.17})$$

$$\begin{aligned} m_{GN} \times Cp_{GN} (T_{GN} - T_0) + m_{GN} \times PCI \times \eta_c + m_{AC} \times Cp_{air} \times (T_{AC} - T_0) \\ = m_{GC} \times Cp_{GC} \times (T_{GC} - T_0) \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

▪ **Préchauffage de l'air introduit par les gaz de combustion**

Le préchauffage du débit d'air introduit  $m_{A0}$  par les gaz de combustion se traduit par :

$$Q_{A1} = Q_{A0} + Q_{GC} \quad (\text{III.19})$$

$$m_{A1} \times Cp_{air} \times (T_{A1} - T_0) = m_{GC} \times Cp_{GC} \times (T_{GC} - T_0) + m_{A0} \times Cp_{air} \times (T_{A0} - T_0) \quad (\text{III.20})$$

**Bilan thermique sur la barbotine**

Pour le séchage par atomisation, l'aire interfaciale réelle participant au transfert de chaleur et de masse est inconnue, il convient de définir le coefficient de transfert volumétrique pour le transfert de chaleur  $h_c$  (kJ/m<sup>3</sup>hK), le bilan thermique partiel établi pour la barbotine peut s'écrire ainsi :

$$m_{BS} (1 + X_{B1}) Cp_B (T_{B1} - T_0) + h_c V (\bar{T}_A - \bar{T}_B) = m_{BS} (1 + X_{B2}) Cp_B (T_{B2} - T_0) + m_{eau} \Delta h_v \quad (\text{III.21})$$

**Bilan thermique sur l'air de séchage**

$$m_{AS} (1 + Y_{A1}) Cp_A (T_{A1} - T_0) = m_{AS} (1 + Y_{A2}) Cp_A (T_{A2} - T_0) + m_{eau} Cp_{vap} (\bar{T}_A - \bar{T}_B) + h_c V (\bar{T}_A - \bar{T}_B) + Q_p \quad (\text{III.22})$$

$V$ , Volume effectif de l'atomiseur,  $\Delta h_v$ , chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $Cp_B$ ,  $Cp_v$  chaleurs spécifiques moyennes de la barbotine et de la vapeur d'eau,  $\bar{T}_A = (T_{A1} + T_{A2})/2$  et  $\bar{T}_B = (T_{B1} + T_{B2})/2$ , Températures moyennes arithmétiques

La perte thermique  $Q_p$  à travers les parois de l'atomiseur est considérée égale à 3.5% par rapport à la chaleur maximale fournie par le gaz naturel [2], soit :

$$Q_p = 0.035 \times m_{GN} \times PCI \quad (\text{III.23})$$

**3.2.3.3 Efficacité thermique de séchage**

L'efficacité thermique est une expression de la performance de séchage par atomisation. Elle est liée à la chaleur nécessaire pour produire une unité de poids du produit sec avec la spécification souhaitée. L'efficacité thermique  $\eta_T$  de l'atomiseur dépend de la température opératoire et elle est définie comme le rapport suivant :

$$\eta_T = \frac{\text{Quantité de chaleur consommée pour l'évaporation}}{\text{Quantité de chaleur fournie}} \quad (\text{III.24})$$

$$\eta_T = \frac{m_{BS} (X_{B1} - X_{B2}) \Delta h_v}{m_{GN} \times PCI} \quad (\text{III.25})$$

### 3.2.3.4 Données de calcul du modèle

La description et les valeurs des paramètres de calcul nécessaires à la résolution du modèle sont données au tableau III.1. Les valeurs sont estimées selon les conditions design (datasheet de l'atomiseur) [2]. Les propriétés physiques des fluides seront considérées indépendantes de la température.

**Tableau III.1. Valeurs des paramètres de calcul du modèle**

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeur</b>
$\dot{m}_{GN}$	Débit du gaz naturel	kg/s	0.12
$\dot{m}_{B1}$	Débit de barbotine	kg/s	6.42
$\dot{m}_{A0}$	Débit d'air introduit	kg/s	4.75
$M_{air}$	Masse molaire de l'air	g/mol	29
$M_{eau}$	Masse molaire d'eau	g/mol	18
$M_{GN}$	Masse molaire du gaz naturel	g/mol	18.5
$T_{GN}$	Température du gaz naturel	°C	15
$T_0$	Température de référence ambiante	°C	25
$T_{AC}$	Température d'air de combustion	°C	25
$T_{A0}$	Température d'air introduit	°C	25
$T_{B1}$	Température entrée barbotine	°C	40
$P$	Pression atmosphérique	Atm	1
$PCI$	Pouvoir calorifique Inférieur du gaz naturel	kJ/kg	43790
$\lambda$	Facteur d'air	-	1.1
$\eta_C$	Rendement de combustion	-	0.80
$V_{air}^{st}$	volume d'air stochiométrique	Nm <sup>3</sup> air/Nm <sup>3</sup> GN	10.93
$\phi$	Humidité relative de l'air introduit	%	60
$w_{B1}$	Teneur d'eau dans la barbotine	%	38
$\Delta h_v$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	kJ/kg eau	2257
$\rho_{air}$	Masse volumique de l'air aux CNTP	kg /Nm <sup>3</sup>	1.29
$\rho_{GN}$	Masse volumique du gaz naturel aux CNTP	kg /Nm <sup>3</sup>	0.84
$Cp_{GN}$	Capacité calorifique du gaz naturel	kJ/kg.°C	1.93
$Cp_{air}$	Capacité calorifique de l'air	kJ/kg.°C	1.06
$Cp_{GC}$	Capacité calorifique des gaz de combustion	kJ/kg.°C	1.26
$Cp_B$	Capacité calorifique de la barbotine	kJ/kg.°C	2
$Cp_{vapeur}$	Capacité calorifique de la vapeur eau	kJ/kg.°C	2
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	kJ/h.m <sup>3</sup> .°C	250-500
$V$	Volume de l'atomiseur	m <sup>3</sup>	530

### 3. 3 Résolution du modèle

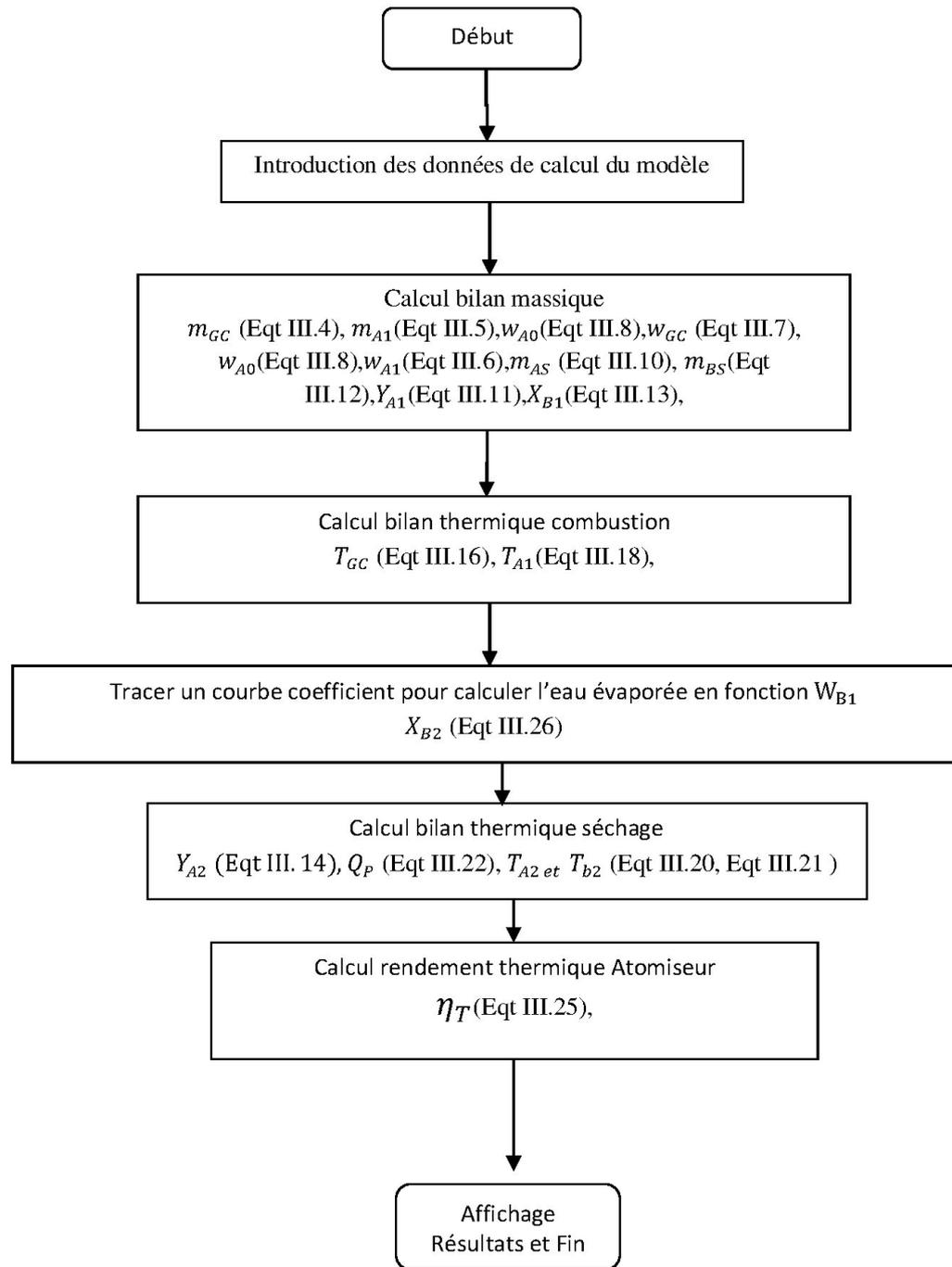
La résolution des équations du modèle est effectuée au moyen du calculateur Excel. La méthodologie de résolution se déroule en plusieurs étapes de calcul, La première étape consiste en la résolution du bilan massique, la seconde résout le bilan thermique de la combustion et le procédé de séchage, enfin la dernière étape évalue le rendement thermique de l'installation. L'organigramme de résolution du modèle est représenté en figure III.4. Les principaux résultats sont illustrés en chapitre IV, par contre leurs valeurs de calcul sont renvoyées en annexe.

### 3. 4. Résultats et interprétations

Afin de tester la validité de notre modèle, nous avons jugé bon de donner en tableau III.2, la comparaison des résultats de calculs aux données de mesures réelles de fonctionnement de l'atomiseur sécheur. Une erreur moyenne de 16% est observée entre les valeurs calculées et relevées sur site industriel. On peut dire donc que le modèle proposé est moyennement valable, il peut être amélioré encore pour prédire de manière assez précise le rendement thermique dans ce type d'installation.

**Tableau III.2. Comparaison des paramètres opératoires calculés et mesurés**

Paramètre	Mesuré	Calculé
$T_{B2}$ (°C)	50	51
$w_{B2}$ (%)	6	12
$T_{A2}$ (°C)	130	112
$Y_{A2}$ (%)	-	23,30



**Figure III.4. Organigramme de résolution du modèle**

## Chapitre 4

## Résultats et Interprétations

### Introduction

Se basant sur le modèle de l'atomiseur sécheur de la barbotine présenté précédemment, nous proposons dans ce présent chapitre une étude paramétrique, traduisant la sensibilité de la rentabilité thermique de ce système aux différentes conditions opératoires. Ceci permettra d'identifier les paramètres qui contrôlent la consommation d'énergie du combustible.

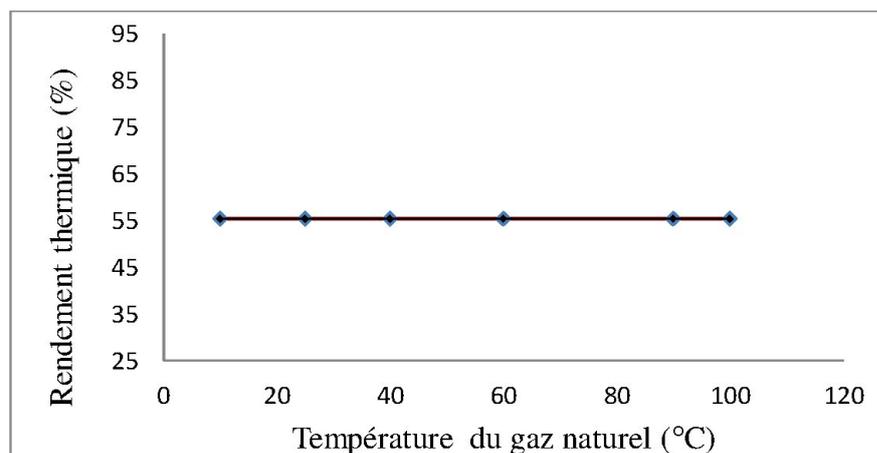
#### 4.1. Variables opératoires de décision

Pour l'optimisation énergétique de l'atomiseur sécheur, il est nécessaire d'identifier les variables indépendantes de décision. Ces variables sont celles qui doivent être modifiées en cours d'optimisation, c'est-à-dire les variables pour lesquelles il faut rechercher la valeur qui permet de maximiser le rendement énergétique. Selon le modèle thermique décrit au chapitre précédent, le rendement énergétique de l'atomiseur, dépend de la température du gaz naturel  $T_{GN}$ , la température d'air de combustion  $T_{AC}$ , la température ambiante  $T_o$ , le facteur d'air  $\lambda$ , le rendement de combustion  $\eta_C$ , la teneur d'eau de la barbotine  $w_{B1}$  et l'humidité initiale de l'air introduit  $w_{A0}$ .

#### 4.2 Influence des paramètres opératoires sur le rendement thermique

##### 4.2.1 Effet de la température du gaz naturel

La figure IV.1 représente l'évolution du rendement thermique en fonction de la température du combustible. On constate que l'évolution du rendement thermique présente une constance. La température de gaz naturel n'affecte pas le rendement thermique de l'atomiseur sécheur.



### Figure. IV.1. Influence de la température du gaz naturel sur le rendement thermique

#### 4.2.2. Effet de la température d'air de combustion

La figure IV.2 représente l'évolution du rendement thermique en fonction de la température d'air de combustion. Une légère amélioration est constatée pour le rendement thermique, soit une augmentation du rendement de 9,2 % pour une élévation de température d'air de 10 à 150°C.

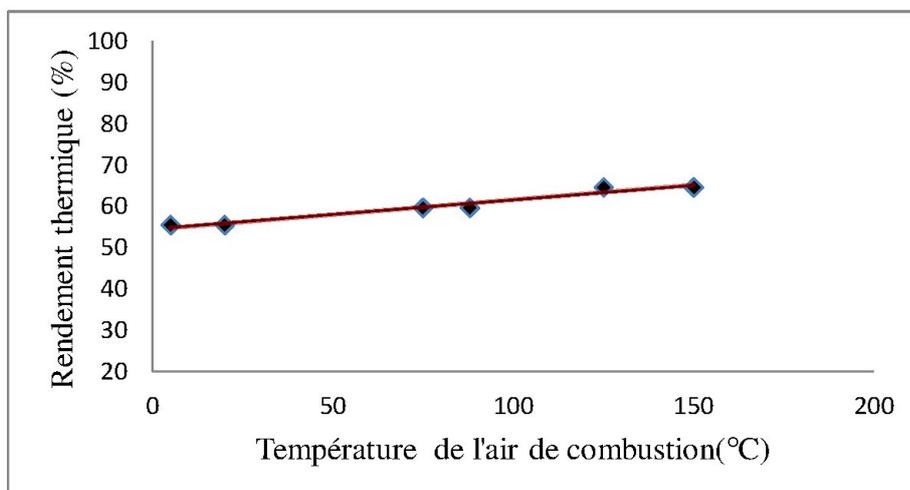
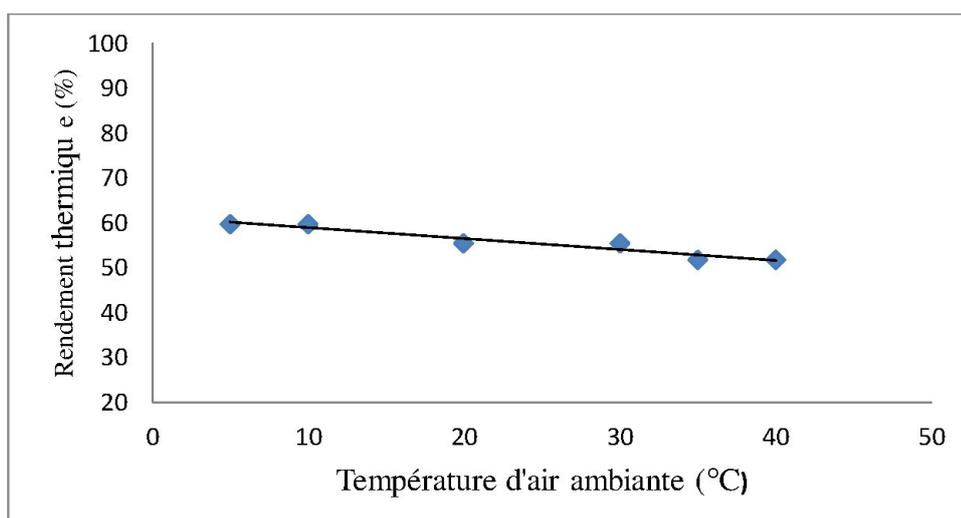


Figure. IV.2. Influence de la température de l'air de combustion sur le rendement thermique

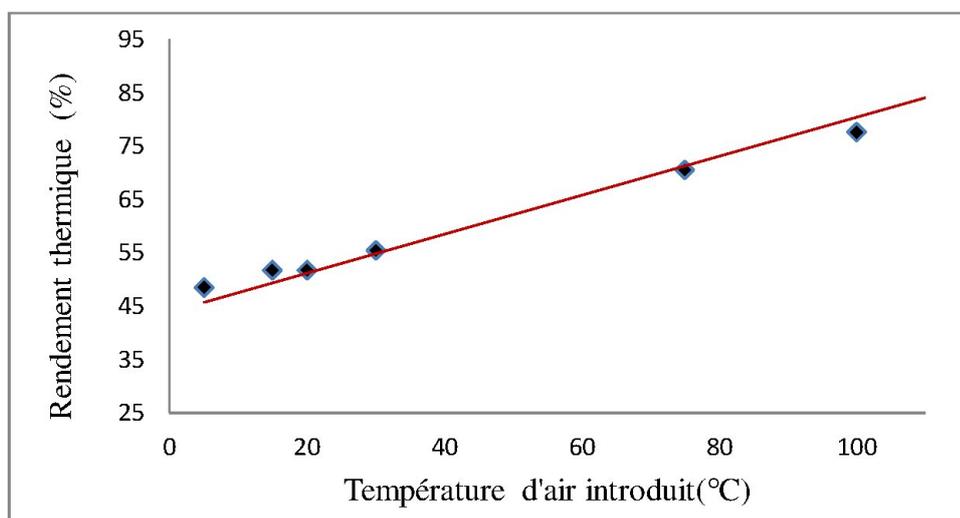
#### 4.2.3. Effet de la température d'air ambiant sur le rendement

La figure IV.3 représente l'effet de la température d'air ambiant. Une augmentation de la température d'air ambiant de 10 à 40°C conduit à une diminution du rendement thermique de 80 à 64%, soit une régression de 16%. Ceci montre que ce paramètre opératoire a une influence significative sur le rendement



**Figure. IV.3. Influence de la température d'air ambiante sur le rendement thermique**  
**4.2.4. Effet de la température d'air de séchage**

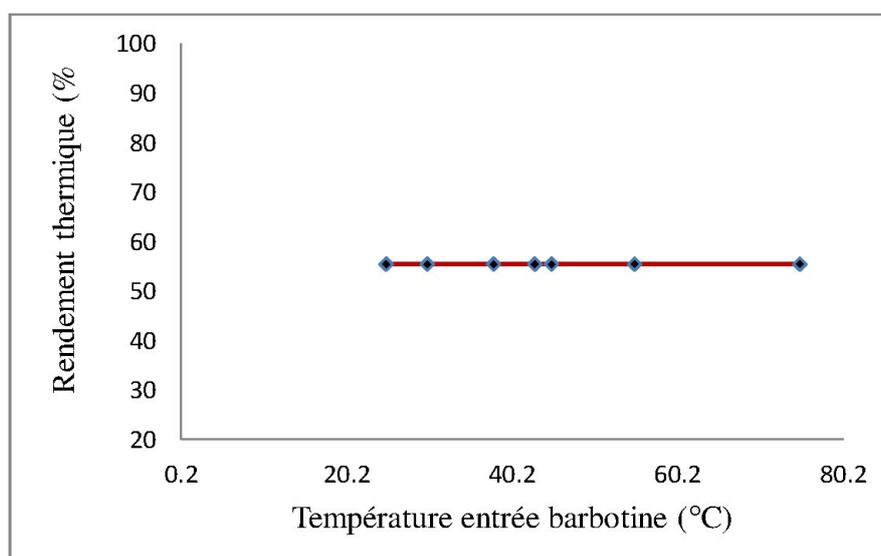
La figure IV.4 représente l'effet de la température d'air de séchage introduit. Cette représentation montre que ce paramètre opératoire a une influence favorable sur le rendement thermique de l'atomiseur. On constate que le rendement augmente au fur et à mesure qu'on augmente la température d'air de séchage.



**Figure. IV.4. Influence de la température d'air introduit sur le rendement thermique**

**4.2.5. Effet de la température de barbotine**

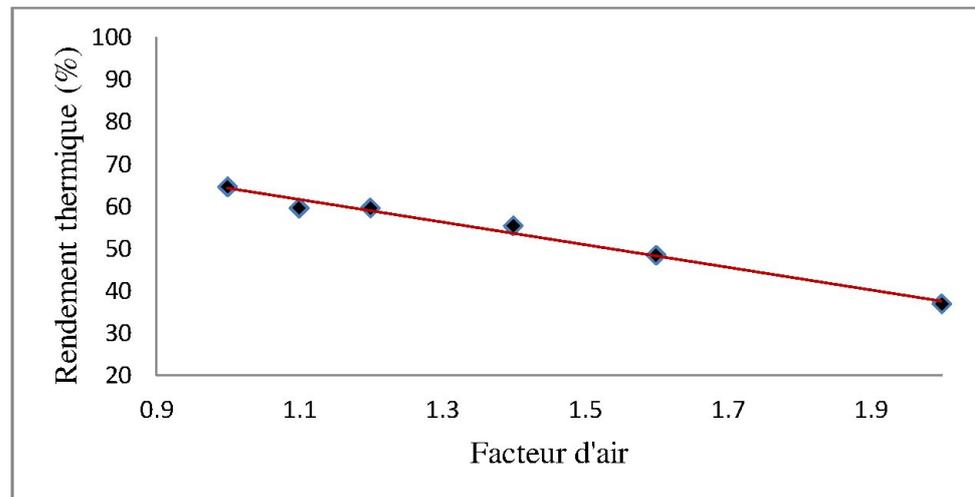
La figure IV.5 montre l'effet de la température de la barbotine. Ce paramètre n'a pratiquement pas d'influence sur le rendement thermique de l'atomiseur sécheur



**Figure. IV.4. Influence de la température entrée barbotine sur le rendement thermique**

**4.2.6. Effet du facteur d'air de combustion**

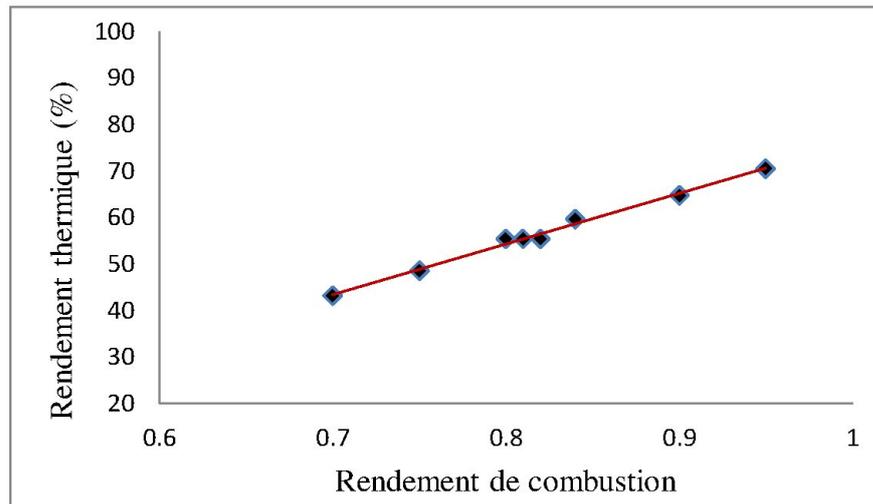
La figure IV .6 représente l'évolution du rendement thermique du système en fonction du facteur d'air de combustion. L'augmentation de l'excès d'air de combustion entraîne toujours la diminution du rendement thermique. En effet, le passage d'une combustion avec excès d'air nul à un excès d'air de 100%, fait diminuer le rendement du procédé de 65 à 36%.



**Figure. IV.6. Influence du facteur d'air sur le rendement thermique**

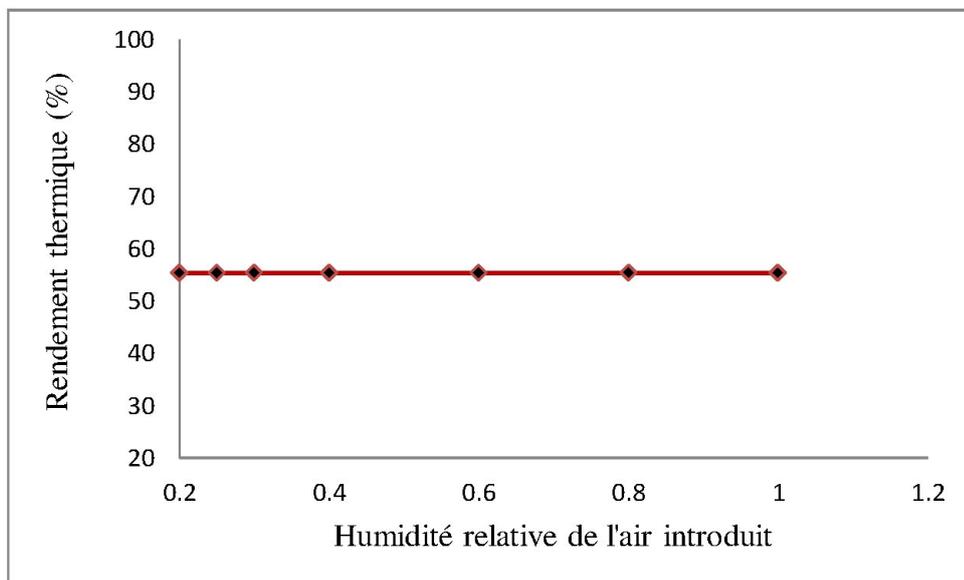
**4.2.7 Effet du rendement de combustion**

La figure IV.7 montre l'effet du rendement de combustion sur le rendement thermique du procédé. On remarque que ce paramètre est très favorable à l'amélioration du rendement thermique de l'atomiseur. Une augmentation du rendement de combustion caractérisant la performance du processus de combustion de 43 à 70% conduit une amélioration du rendement de 27%.



**Figure. IV.7. Influence du rendement de combustion sur le rendement thermique**  
**4.2.8. Effet de l'humidité de l'air de séchage introduit**

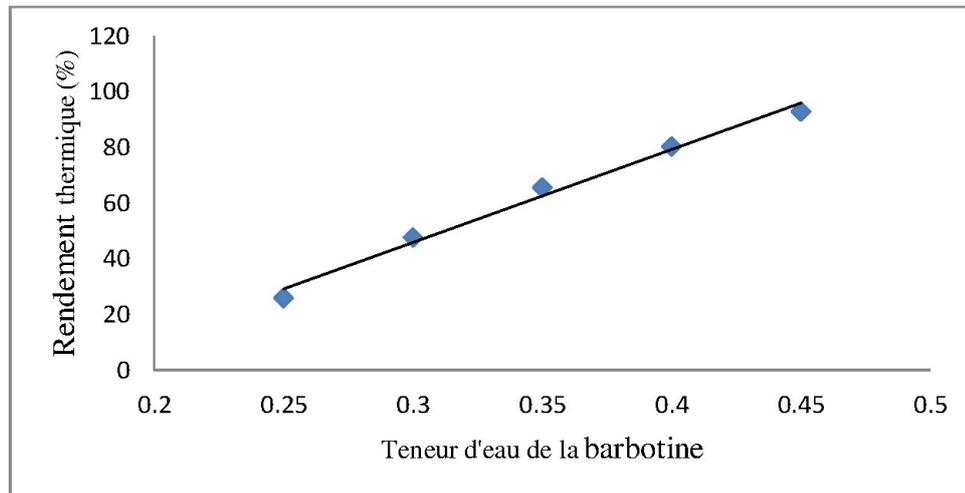
La figure IV.8 montre l'effet de l'humidité d'air de séchage. Ce paramètre n'a pratiquement pas d'influence sur le rendement thermique de l'atomiseur sécheur.



**Figure. IV.8. Influence d'humidité relative de l'air introduit sur le rendement thermique**

#### 4.2.9. Effet de la teneur d'eau de la barbotine

La figure IV.9 montre l'effet du Teneur d'eau de la barbotine sur le rendement thermique du procédé. Intervalle des valeurs d'utilisation [0,25-0,4], On remarque que ce paramètre est très favorable à l'amélioration du rendement thermique de l'atomiseur. Une augmentation du rendement de combustion caractérisant la performance du processus de combustion de 25% à 95% conduit une amélioration du rendement de 70%.



**Figure. IV.9. Influence Teneur d'eau de la barbotine sur le rendement thermique**  
**Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation du procédé de séchage par atomisation de la barbotine d'une unité industrielle de céramiques. La modélisation est basée sur les bilans de matière et d'énergie pour les processus de combustion pour la production d'air chaud et le séchage de la barbotine.

La comparaison dégagée entre les valeurs réelles de la température de la barbotine et sa teneur en eau à la sortie du système, par rapport à celles calculées a permis d'apprécier moyennement la validation de ce modèle. Néanmoins, il a été utilisé dans l'étude paramétrique conduisant à la détermination des variables opératoires de décision pour une éventuelle optimisation du rendement thermique de l'atomiseur sécheur.

Les principaux résultats de l'étude de sensibilité du rendement thermique nous ont permis de d'identifier le rendement de combustion, le facteur d'air, et sa température comme paramètres d'influence significatives sur le rendement énergétique du sécheur-atomiseur.

Enfin, comme perspectives, nous suggérons pour la suite de ce travail d'améliorer le modèle pour une meilleure fiabilité et introduire dans le modèle d'autres équations relatives au processus de ventilation et de dépoussiérage afin d'évaluer la performance de la consommation d'énergie thermique et électrique du procédé.

## **Bibliographie**

- [1] **A.Bey**, Fiches techniques procédé, Sarl Céramiques Hippocampe, Bureau Etudes Minières et environnement, Mai 2019
- [2] **SACMI-IMOLA**, Livret Instructions, Documentation techniques Atomiseurs pour barbotines Céramiques, 001AZ013A, 2008
- [3] **Ensiacet**, Atomisation, Manuel de TP 3eme année option CAP, Toulouse 2003
- [4] **D.Touil**, Modélisation des dégradations d'énergie dans l'industrie de ciment, Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, 2006
- [5] **K. Masters**, Spray Drying, hand book 5th Edition, Longman Scientific and Technical, 1991
- [6] **H.Romdhana**, Amélioration de l'efficacité énergétique de séchage, Collogue national « Energie et Industrie » 25-27 Septembre, Paris, 2017

# Introduction générale

# Chapitre I

## Présentation de l'unité céramique : Cas d'Etude

Chapitre II  
Procédé et Paramètres  
Opérateurs du Sécheur  
Atomiseur

# Chapitre III

## Modélisation du Procédé de Séchage

# Chapitre IV

## Résultats et Interprétations

# Conclusion générale

# Bibliographie

# Annexes

**Annexe**

		changement des paramètres opératoires									Résultats					
		$T_{GN}$	$T_{AC}$	$T_0$	$T_{A0}$	$T_{B1}$	$\lambda$	$\eta_c$	$\phi$	$w_{B1}$	$m_{GN}$	$T_{A1}$	$T_{A2}$	$T_{GC}$	$T_{B2}$	$\eta_T$
		<b>15</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>1,35</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,32</b>	<b>0,13</b>	<b>548,98</b>	<b>112,3</b>	<b>1421,04</b>	<b>50,986</b>	<b>57,12</b>
changement $T_{GN}$ (°C)	10	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	548,97	119,19	1199,13	53,91	55	
	25	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,40	119,41	1200,10	54,00	55	
	40	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,84	119,64	1201,07	54,10	55	
	60	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	550,41	119,93	1202,36	54,23	55	
	90	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	551,28	120,38	1204,31	54,42	55	
	100	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	551,57	120,53	1204,95	54,48	55	
changement $T_{AC}$ (°C)	15	5	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	541,24	115,21	1181,82	52,22	55	
	15	20	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	547,15	118,25	1195,04	53,51	55	
	15	75	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,13	545,21	111,54	1243,54	50,66	60	
	15	88	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,13	550,11	114,02	1255,00	51,71	60	
	15	125	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,12	538,08	102,07	1287,62	46,63	65	
	15	150	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,12	547,04	106,55	1309,67	48,54	65	
changement $T_{(o)}$ (°C)	15	25	5	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,13	551,81	127,69	1198,38	31,20	60	
	15	25	10	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,13	545,46	121,26	1198,65	35,05	60	
	15	25	20	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	555,98	125,96	1199,18	50,21	55	
	15	25	30	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	542,24	112,57	1199,72	57,68	55	
	15	25	35	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,15	555,83	122,14	1199,98	68,33	52	
	15	25	40	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,15	548,48	115,19	1200,25	71,95	52	
Changement $T_{(A0)}$ (°C)	15	25	25	5	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,16	548,65	130	1199,45	58,51	48	
	15	25	25	15	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,15	550,23	125,42	1199,45	56,56	52	
	15	25	25	20	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,15	560,38	130,73	1199,45	58,82	52	
	15	25	25	30	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	558,87	124,3	1199,45	56,08	55	
	15	25	25	75	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,11	560,63	107,15	1199,45	48,79	71	
	15	25	25	100	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,1	567,61	104,13	1199,45	47,51	78	
	15	25	25	200	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,07	569,71	84,393	1199,45	39,12	111	
	15	25	25	400	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,04	532,88	45,611	1199,45	22,64	194	
cha	15	25	25	25	25	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	100,16	1199,45	56,94	55	

	15	25	25	25	30	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	106,53	1199,45	55,94	55
	15	25	25	25	38	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	116,72	1199,45	54,34	55
	15	25	25	25	43	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	123,09	1199,45	53,34	55
	15	25	25	25	45	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	125,63	1199,45	52,94	55
	15	25	25	25	55	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	138,37	1199,45	50,94	55
	15	25	25	25	75	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	163,85	1199,45	46,94	55
changement $\lambda$	15	25	25	25	40	1	0,8	0,6	0,32	0,12	551,13	87,021	1587,40	40,24	65
	15	25	25	25	40	1,1	0,8	0,6	0,32	0,13	563,96	104,8	1452,66	47,79	60
	15	25	25	25	40	1,2	0,8	0,6	0,32	0,13	548,28	103,64	1339,31	47,30	60
	15	25	25	25	40	1,4	0,8	0,6	0,32	0,14	541,59	118,56	1159,22	53,64	55
	15	25	25	25	40	1,6	0,8	0,6	0,32	0,16	549,52	147,23	1022,53	65,83	48
	15	25	25	25	40	2	0,8	0,6	0,32	0,21	552,77	203,43	828,797	89,71	37
Changement $\eta_C$	15	25	25	25	40	1,35	0,7	0,6	0,32	0,18	552,64	142,53	1052,56	63,83	43
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,16	555,40	133,58	1126,01	60,03	48
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	555,67	122,64	1214,14	55,38	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	562,22	126,02	1228,83	56,81	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,13	551,47	114,72	1258,20	52,01	60
	15	25	25	25	40	1,35	0,9	0,6	0,32	0,12	561,94	114,01	1346,34	51,71	65
	15	25	25	25	40	1,35	1	0,6	0,32	0,11	561,27	107,47	1419,78	48,93	71
changement $\phi$	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,2	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,25	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,3	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,4	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,454	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,8	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,96	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	1	0,32	0,14	549,11	119,26	1199,45	53,94	55
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,1	0,14	549,11	1336,3	1199,45	410,1	-84
changement WB1	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,15	0,14	549,11	663,54	1199,45	228,8	-37
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,2	0,14	549,11	390,12	1199,45	148,0	-1,4
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,25	0,14	549,11	241,42	1199,45	99,30	26
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,3	0,14	549,11	147,73	1199,45	65,13	48
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,35	0,14	549,11	83,192	1199,45	39,04	66
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,4	0,14	549,11	35,983	1199,45	18,02	80
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,45	0,14	549,11	-0,051	1199,45	0,473	93

	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,5	0,14	549,11	-28,43	1199,45	-14,53	103
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,55	0,14	549,11	-51,29	1199,45	-27,56	113
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,6	0,14	549,11	-70	1199,45	-38,97	120
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,65	0,14	549,11	-85,45	1199,45	-48,99	127
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,7	0,14	549,11	-98,17	1199,45	-57,70	133
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,75	0,14	549,11	-108,4	1199,45	-65,05	138
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,8	0,14	549,11	-116,1	1199,45	-70,76	141
	15	25	25	25	40	1,35	0,8	0,6	0,9	0,14	549,11	-116,6	1199,45	-71,11	141

## Méthode de calcul du rendement énergétique

### 1-Calcul bilan massique

#### \*Calcul débit du gaz de combustion

$$m_{GC} = m_{GN} \left[ 1 + \lambda V_{air}^{st} \frac{\rho_{air}}{\rho_{GN}} \right] \quad (III.4)$$

Après avoir remplacé les valeurs dans l'équation

$$m_{GC} = 3,076 \text{ kg/s}$$

#### \* Calcul débit d'air chaud

Le mélange d'air ambiant introduit A0 avec les gaz de combustion, donne le débit d'air chaud  $m_{A1}$  :

$$m_{A1} = m_{A0} + m_{GC} \quad (III.5)$$

Après avoir remplacé les valeurs dans l'équation

$$m_{A1} = 7,82 \text{ kg/s}$$

#### \*calcul la teneur d'eau dans l'air

$$w_{A0} = \frac{M_{eau}}{M_{air}} \left[ \frac{\phi \times P^s}{P - \left( 1 - \frac{M_{eau}}{M_{air}} \right) \times \phi \times P^s} \right] \quad (III.8)$$

#### \*calcul la pression de saturation de l'eau

$$P^s = \left[ 13.7 - \frac{5120}{T} \right] \quad (III.9)$$

$$T = T_0 = 25 \text{ °C} = 25 \text{ °C} + 273 = 298 \text{ K}$$

$$P^s = \left[ 13.7 - \frac{5120}{298} \right] = -3.48$$

$$\ln P^s = -3,48$$

$$P^s = 0,03 \text{ atm}$$

$$w_{A0} = \frac{18}{29} \left[ \frac{0.6 \times 0,03}{1 - \left( 1 - \frac{18}{29} \right) \times 0.6 \times 0,03} \right]$$

#### \*calcul la $w_{A0}$ Teneur d'eau dans de $m_{A0}$

$$w_{A0} = 0,0112$$

$$w_{A0} = 0,12\%$$

#### \*calcul la teneur d'eau de $m_{GC}$

$$w_{GC} = 2.031 \times \frac{M_{eau}}{M_{GN}} \cdot \frac{m_{GN}}{m_{GC}} \quad (III.7)$$

$$w_{GC}=0,01124$$

$$w_{GC}=11,24 \%$$

**\*calcul La teneur d'eau  $w_{A1}$  ( $\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}$ ) du débit d'air chaud**

$$m_{A1} \times w_{A1} = m_{A0} \times w_{A0} + m_{GC} \times w_{GC} \quad (\text{III.6})$$

$$w_{A1} = \frac{m_{A0} \times w_{A0} + m_{GC} \times w_{GC}}{m_{A1}}$$

Après avoir remplacé les valeurs dans l'équation

$$w_{A1} = 0,03965 \quad w_{A1} = 3,965 \%$$

**\*calcul Le débit d'air chaud sec**

$$m_{AS} = m_{A1} (1 - w_{A1}) \quad (\text{III.10})$$

Après avoir remplacé les valeurs dans l'équation

$$m_{AS} = 17,38 (1 - 0,0222)$$

$$m_{AS} = 7,51 \text{kg/s}$$

**\*calcul le débit de barbotine sèche**

$$m_{BS} = m_{B1} (1 - w_{B1}) \quad (\text{III.12})$$

$$m_{BS} = 4,554 \text{kg/s}$$

**\*calcul la teneur d'eau**

$$Y_{A1} = \frac{w_{A1}}{(1 - w_{A1})} \quad (\text{III.12})$$

**\*calcul le teneur d'eau de la barbotine**

$$X_{B1} = \frac{w_{B1}}{(1 - w_{B1})} \quad (\text{III.13})$$

$$X_{B1} = 0,4705 \quad X_{B1} = 47,05 \%$$

## 2-Calcul bilan thermique combustion

**\*calcul Température du gaz combustion**

$$\begin{aligned} m_{GN} \times Cp_{GN}(T_{GN} - T_0) + m_{GN} \times PCI \times \eta_C + m_{AC} \times Cp_{air} \times (T_{AC} - T_0) \\ = m_{GC} \times Cp_{GC} \times (T_{GC} - T_0) \end{aligned}$$

(III.16)

$$T_{GC} = \frac{m_{GN} \times Cp_{GN}(T_{GN} - T_0) + m_{GN} \times PCI \times \eta_C + m_{AC} \times Cp_{air} \times (T_{AC} - T_0)}{m_{GC} \times Cp_{GC}} + T_0$$

Après avoir remplacé les valeurs dans l'équation

$$T_{GC} = 1421,05 \text{ °C}$$

**\*calcul Température Air chaud**

$$m_{A1} \times Cp_{air} \times (T_{A1} - T_0) = m_{GC} \times Cp_{GC} \times (T_{GC} - T_0) + m_{A0} \times Cp_{air} \times (T_{A0} - T_0) \quad (\text{III.18})$$

$$T_{A1} = \frac{m_{GC} \times Cp_{GC} \times (T_{GC} - T_0) + m_{A0} \times Cp_{air} \times (T_{A0} - T_0)}{m_{A1} \times Cp_{air}} + T_0$$

$$T_{A1} = 548,98 \text{ °C}$$

**3-Calcul bilan thermique séchage**

**\*calcul La perte thermique  $Q_p$**

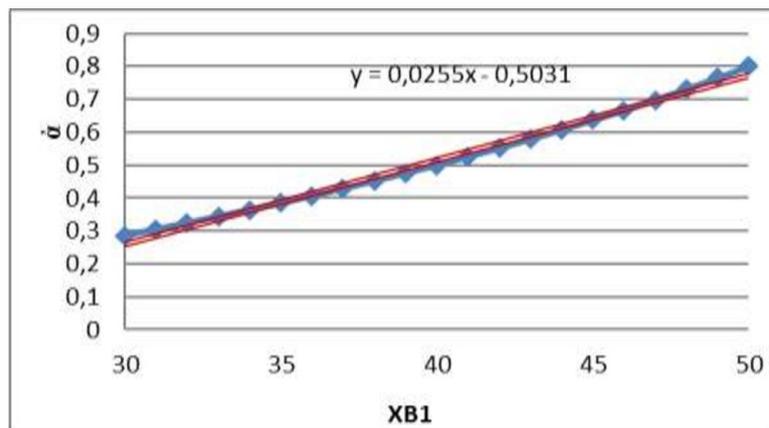
$$Q_p = 0.035 \times m_{GN} \times PCI \quad (\text{III.22})$$

$$Q_p = 199,24 \text{ KJ/S}$$

**4-Tracer un courbe coefficient pour calculer l'eau évaporée en fonction  $W_{B1}$**

$$\alpha = \frac{W_{B1} - W_{B2}}{100 - W_{B1}} \quad (\text{III.25})$$

$$\alpha = 0.0255W_{B1} - 0.5031$$



$$\frac{W_{B1} - W_{B2}}{100 - W_{B1}} = 0.0255W_{B1} - 0.5031$$

$$W_{B2} = 0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31 \quad W_{B1} \%$$

$$X_{B1} = \frac{W_{B1}}{(1 - W_{B1})} W_{B1} = \frac{X_{B1}}{(1 + X_{B1})} W_{B2} = \frac{X_{B2}}{(1 + X_{B2})}$$

$$\frac{X_{B2} * 100}{(1 + X_{B2})} = 0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31$$

$$100X_{B2} = (0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31) * (1 + X_{B2})$$

$$100X_{B2} = (0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31)X_{B2} + 0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31$$

$$X_{B2} = \frac{0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31}{(100 - 0.0255W_{B1}^2 + 2.0031W_{B1} - 50.31)}$$

$$X_{B2} = \frac{0.0255W_{B1}^2 - 2.0031W_{B1} + 50.31}{(49,69 - 0.0255W_{B1}^2 + 2.0031W_{B1})} \quad (\text{III.26})$$

$$X_{B2} = 14,05 \%$$

$$m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + h_C V(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) = m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B(T_{B2} - T_0) + m_{eau} \Delta h_v \quad (\text{III.19})$$

$$\begin{aligned} m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) \\ = m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A(T_{A2} - T_0) + m_{eau} Cp_{vap}(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) \\ + h_C V(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) + Q_p \quad (\text{III.19}) \end{aligned}$$

(III.19) +(III.20)

$$m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + h_C V(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) + m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) = m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B(T_{B2} - T_0) + m_{eau} \Delta h_v + m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A(T_{A2} - T_0) + m_{eau} Cp_{vap}(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) + h_C V(\mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B) + Q_p$$

$$m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) = m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B(T_{B2} - T_0) + m_{eau} \Delta h_v + m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A(T_{A2} - T_0) + m_{eau} Cp_{vap}(T_{A2} - T_{B1}) + Q_p \quad (3)$$

$$m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) = m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_{B2} - m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau} \Delta h_v + m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A T_{A2} - m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A T_0 + m_{eau} Cp_{vap} T_{A2} - m_{eau} Cp_{vap} T_{B1} + Q_p$$

$$m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A T_{A2} + m_{eau} Cp_{vap} T_{A2} = -m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_{B2} + m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) + m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_0 - m_{eau} \Delta h_v + m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A T_0 + m_{eau} Cp_{vap} T_{B1} - Q_p$$

$$(m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A + m_{eau} Cp_{vap})T_{A2} = -m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_{B2} + m_{BS}(1 + X_{B1})Cp_B(T_{B1} - T_0) + m_{AS}(1 + Y_{A1})Cp_A(T_{A1} - T_0) + m_{BS}(1 + X_{B2})Cp_B T_0 - m_{eau} \Delta h_v + m_{AS}(1 + Y_{A2})Cp_A T_0 + m_{eau} Cp_{vap} T_{B1} - Q_p$$

$$T_{A2} = \frac{-m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B}{m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A+m_{eau}Cp_{vap}} T_{B2} + \frac{m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0)+m_{AS}(1+Y_{A1})Cp_A(T_{A1}-T_0)+m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 - m_{eau}\Delta h_v + m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A T_0 + m_{eau}Cp_{vap}T_{B1}-Q_p}{m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A+m_{eau}Cp_{vap}}$$

$$T_{A2} = A T_{B2} + B$$

$$A = \frac{-m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B}{m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A+m_{eau}Cp_{vap}}$$

$$A = -0.7563$$

$$B =$$

$$\frac{m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0)+m_{AS}(1+Y_{A1})Cp_A(T_{A1}-T_0)+m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 - m_{eau}\Delta h_v + m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A T_0 + m_{eau}Cp_{vap}T_{B1}-Q_p}{m_{AS}(1+Y_{A2})Cp_A+m_{eau}Cp_{vap}}$$

$$B = 150,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0) + h_c V ((TA1 + TA2)/2 - (TB1 + TB2)/2) = m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B(T_{B2}-T_0) + m_{eau}\Delta h_v$$

$$m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0) + \frac{h_c V}{2} TA2 - \frac{h_c V}{2} TB2 + \frac{h_c V}{2} (TA1 - TB1) = m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B(T_{B2}-T_0) + m_{eau}\Delta h_v$$

$$m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0) + \frac{h_c V}{2} TA2 - \frac{h_c V}{2} TB2 + \frac{h_c V}{2} (TA1 - TB1) = m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_{B2} - m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau}\Delta h_v$$

$$\frac{h_c V}{2} TA2 = m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_{B2} + \frac{h_c V}{2} TB2 - m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau}\Delta h_v - m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0)$$

$$\frac{h_c V}{2} TA2 = (m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B + \frac{h_c V}{2})T_{B2} - m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau}\Delta h_v - m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0)$$

$$TA2 = \frac{2}{h_c V} (m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B + \frac{h_c V}{2})T_{B2} - \frac{2}{h_c V} (m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau}\Delta h_v - m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0)) \text{ (III.27)}$$

$$TA2 = C T_{B2} + D$$

$$C = \frac{2}{h_c V} (m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B + \frac{h_c V}{2})$$

$$C = 2.3582$$

$$D = -\frac{2}{h_c V} (m_{BS}(1+X_{B2})Cp_B T_0 + m_{eau}\Delta h_v - m_{BS}(1+X_{B1})Cp_B(T_{B1}-T_0))$$

$$D = -7,6617 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{A2} = A T_{B2} + B$$

$$T_{A2} = C T_{B2} + D \quad \text{donc}$$

$$T_{B2} = \frac{B - D}{C - A}$$

$$T_{B2} = 50.99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**\*calcul le rendement thermique**

$$\eta_T = \frac{m_{BS} (X_{B1} - X_{B2}) \Delta h_v}{m_{GN} \times PCI}$$

