

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude  
de MASTER ACADEMIQUE**  
Spécialité: **Commande des systèmes**  
Filière: **Génie Electrique**

Présenté par  
**TALMATKADI Celia**  
**SAIACHE Cilia**

Mémoire dirigé par **Rezki HADDOUCHE**

Thème

**Identification graphique de la tour de  
conditionnement des fumées**

Mémoire soutenu publiquement le 30/09/2015 devant le jury composé de:

**M. AKROUF Said**

Grade, Lieud'exercice, Président

**M. KASRI Ahmed**

**Melle. AIT AIDER Malika**

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions le bon DIEU le tout puissant de nous avoir facilité le chemin et donner durant tout notre cursus universitaire la santé, le courage pour mener à terme notre travail.*

*Nous tenons à remercier vivement notre promoteur M. Rezkî HADDOUCHE pour l'intéressante documentation qu'il a mis à notre disposition, pour ses conseils précieux et ses suggestions qui nous ont permis de mener à bonne fin notre travail.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciement les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation dans les meilleurs conditions.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers grands et  
petits*

*Spécialement,*

*À mes très chers parents pour lesquels je prie le bon dieu de me les  
garder et les protéger, c'est principalement eux qui m'ont encouragé par leur  
soutien moral et financier durant mes études et durant la réalisation de ce  
mémoire*

*À mes frères, Moumouh et Ilyas.*

*À ma grand-mère Malih*

*À mon oncle Samir à qui je souhaite la réussite dans sa vie.*

*À mes tantes, leurs maris et leurs enfants.*

*À tous mes cousins et cousines.*

*À tous mes amis qui m'ont aidé de loin ou de près que dieu nous garde  
toujours unis.*

*Sans oublier ma camarade (copine) avec qui j'ai accompli ce mémoire et toute  
sa famille.*

*Celia*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers grands et petits.*

*Spécialement,*

*À mes très chers parents pour lesquels je prie le bon dieu de me les garder et les protéger, c'est principalement eux qui m'ont encouragé par leur soutien moral et financier durant mes études et durant la réalisation de ce mémoire.*

*À mes chers frères Kamel et Nassim .*

*À mes belles-sœurs Souhila et Linda.*

*À mon cher mari, qui je remercie pour son encouragement et son soutien.*

*À toute ma famille , belle-famille et mes grands-parents.*

*À mes neveux et nièces Maylisse, Dayline, Enzo, Ilyes et sans oublié*

*Idir, Wilan, Maya , Marya et massi.*

*À ma tante Tounsia, son mari et ses enfants.*

*À tous mes ami(e)s et à toute la promotion Automatique 2015*

*Et sans oublier ma camarade Celia (copine !!!!) avec qui j'ai accomplie ce mémoire et à toutes sa famille.*

*Cilia*

# *Sommaire*

## Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre I : Présentation de la tour de conditionnement des fumées**

I.Introduction.....	2
II. Circuit aéraulique des fumées .....	2
III.Stratégies de contrôle de la température des fumées.....	4
III.1. Régulation basée seulement sur la température à la sortie de la tour .....	4
III.2. Régulation basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour (T.C)...	7
III.3. Régulation basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour et sur le débit des gaz à l'entrée de la tour (TC) .....	9
IV. Nouvelle stratégie pour le contrôle de la température des fumées.....	11
IV. Conclusion.....	14

### **Chapitre II : Caractéristique statique de la tour de conditionnement des fumées**

I. Introduction .....	15
II.Bilan thermique de la tour de conditionnement des fumées.....	15
II.1 Les données de base .....	16
II.2 Bilan thermique de la tour de conditionnement .....	17
III. Caractéristique statique de la tour de conditionnement .....	28
IV. Conclusion .....	31

### **Chapitre III : Elaboration d'un modèle pour la tour de conditionnement des fumées**

I. Introduction .....	32
II. Identification des procédés .....	32

III.2.1.Méthode du premier ordre avec retard .....	32
III.2.2.La méthode de Broida .....	33
III.2.3.Application des méthodes sites sur trois essais différents .....	34
IV. Conclusion .....	42
Conclusion générale .....	43

*Liste des  
figures*

<b>Figure. I.1.</b> Circuit de flux des fumées dans une cimenterie.....	3
<b>Figure. I. 2</b> Schéma de structure de la boucle de régulation .....	4
<b>Figure. I. 3</b> Schéma de principe du système de régulation basé seulement sur la température de la sortie de la tour de conditionnement.....	5
<b>Figure .I. 4.</b> Schéma de régulation proposé par Schwab et al.....	6
<b>Figure .I . 5</b> Schéma de régulation de la société .....	6
<b>Figure. I. 6</b> Schéma de structure de la boucle de contrôle basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour.....	7
<b>Figure. I. 7</b> Schéma détaillé de la stratégie basée sur les deux températures $T_1$ et $T_3$ ...	7
<b>Figure. I. 8</b> Schéma de contrôle proposé par Reigel et al .....	8
<b>Figure. I.9</b> Schéma fonctionnel de contrôle de l'EnviroCare.....	9
<b>Figure. I.10</b> Schéma structurel de la boucle de contrôle basé sur les deux températures et le débit des fumées .....	9
<b>Figure. I. 11</b> Schéma détaillé de la stratégie basée sur les deux températures $T_1$ et $T_3$ .....	10
<b>Figure. I.12</b> Schéma de contrôle proposé par Schioth [1].....	11
<b>Figure.I. 13</b> Schéma de principe de la nouvelle boucle de contrôle .....	12
<b>Figure. I.14</b> Schéma structurel détaillé de la nouvelle stratégie proposée.....	13
<b>Figure II.1</b> Source et circuit des fumées dans une cimenterie.....	14
<b>Figure II.2</b> Caractéristiques des fumées à l'entrée de la tour de conditionnement.....	14
<b>Figure II.3</b> La température de sortie $T_s$ en fonction de débit d'eau $G_w$ pour un débit de fumée variable à l'entrée de la tour.....	27
<b>Figure II.3</b> La température de sortie $T_s$ en fonction de débit d'eau $G_w$ pour une température d'entrée variable.....	29
<b>Figure II.4</b> La température de sortie $T_s$ en fonction de débit d'eau $G_w$ pour un débit de fumée variable et une température d'entrée variable .....	29
<b>Figure III.1</b> : Système du premier ordre.....	32

<b>Figure III.2</b> : Courbe en ‘S’ analyse par la méthode de Broida.....	32
<b>Figure III.3</b> Réponse du système à une variation de débit d’eau à l’entrée de la tour....	33
<b>Figure III.4</b> Réponse du système à une variation de débit d’eau à l’entrée de la tour.....	36
<b>Figure III.5</b> Réponse du système à une variation de débit d’eau à l’entrée de la tour....	38

***Introduction***  
***générale***

## Introduction générale

---

L'automatique est l'art de modéliser, identifier et d'analyser puis de commander les systèmes. C'est aussi celui de traiter l'information et de prendre des décisions.

L'automatique est la science qui traite des lois de régulation des systèmes commandés.

Dans le but de contrôler l'émission des gaz et de diminuer les rejets des poussières vers l'atmosphère, il est en général nécessaire de traiter les fumées générées par les processus industriels, caractériser par une haute température, avant de les introduire dans les dispositifs de récupération des poussières.

Par ailleurs, le processus de fabrication du ciment génère des fumées (poussières + gaz) à une température avoisinant les 350°C (jusqu'à 400°C). Cette dernière doit être ramenée à une température avoisinant les 150°C et 180°C. Le dispositif abritant cette tâche est appelé « tour de conditionnement des fumées ».

Le principe de fonctionnement de la tour de conditionnement des fumées est basé sur l'injection de l'eau vaporisée à l'entrée pour permettre le refroidissement des fumées générées par l'usine du ciment et qui arrivent par le même côté. L'opération de refroidissement permet la récupération d'une partie des poussières contenue dans ces fumées, en bas de la tour, et l'abaissement de la température des fumées qui vont continuer leur chemin vers le précipitateur électrostatique.

Le but de notre travail est l'élaboration d'un modèle de la tour de conditionnement des fumées. Il consiste à appliquer des méthodes d'identification graphiques sur le système afin de mettre en œuvre un modèle qui décrit sa dynamique la plus optimale.

Dans le premier chapitre nous présentons l'étude du principe de fonctionnement de la tour de conditionnement des fumées, et en donnant un aperçu sur les stratégies de commande déjà existantes.

Le second chapitre est consacré à l'étude statique du système. Le calcul du bilan thermique de la tour de conditionnement des fumées permettra de tracer la caractéristique statique du système.

Le dernier chapitre fera l'objet d'élaboration d'un modèle dynamique, en appliquant des méthodes d'identifications graphiques, pour le système en se basant sur des données expérimentales.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.



*CHAPITRE I*

# Présentation de la tour de conditionnement des fumées

## I. Introduction

Le ciment est une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenu par broyage et cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le produit de la cuisson, appelé clinker, est pour l'essentiel une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique.

Toute usine de production de ciment doit inclure, entre autres, un circuit aéraulique des fumées comprenant : une tour de conditionnement des fumées, un précipitateur électrostatique (ESP), et la cheminé. Généralement, une partie des fumées qui vient du four passe à travers la tour de conditionnement, tandis que l'autre partie est dirigée vers le broyeur cru. Par la suite toutes les fumées (gaz et poussières) sont envoyées directement vers le précipitateur électrostatique dans le but de récupérer le reste des poussières contenu dans les fumées.

## II. Circuit aéraulique des fumées

L'épuration des gaz dans l'industrie cimentière est une tâche très difficile. Le processus moderne de production de ciment implique, d'une part, le broyage des matières premières carbonatées et argileuses et d'autre part, le traitement thermique de la farine crue rectifiée (c.-à-d. préchauffée), précalcinée et clinkeriser dans le four rotatif. Ensuite, le clinker est refroidit par un refroidisseur de clinker. Toutes ces opérations produisent une grande quantité de fumées (gaz et de poussières) dont les caractéristiques sont variables, à savoir la valeur de la température, le contenu d'humidité, la distribution des dimensions des particules, la composition chimique, etc [6, 5]. L'émission de ces poussières constitue l'un des principaux facteurs de pollution de l'air d'où la nécessité d'emploi des précipitateurs électrostatiques (ESP) pour épurer ces fumées avant de leur rejet dans l'atmosphère. Toutefois, les performances des ESP dépendent considérablement des équipements situés en amont. En effet, la plupart des précipitateurs sont associés à une tour de refroidissement [1].

Le circuit des fumées générées par le processus de production du ciment présenté sur la Fig.I.1 est le circuit le plus fréquemment rencontré dans les installations de production de ciment. La circulation des fumées est réalisée suivant l'évolution du déroulement du process :

- Plus souvent, les fumées vont de la tour de préchauffage à la cheminée, via le broyeur cru;
- Dans le cas où les silos d'homogénéisation sont pleins, les fumées sont dirigées vers la tour de conditionnement, le précipitateur électrostatique puis vers la cheminée ;
- En mode mixte, dans le cas où l'énergie offerte au broyeur cru est assez élevée. Alors, environ 10 à 20% sont envoyées à la tour de conditionnement et la quantité restante au broyeur cru.

L'exemple illustratif du circuit aéraulique des fumées est illustré par la Fig.I.1. Une partie des fumées générées est envoyée vers le broyeur cru à travers la vanne  $V_2$  et l'autre partie est dirigée vers la tour de conditionnement à travers la vanne  $V_1$ . Dans le broyeur, les fumées sont utilisées pour sécher les matières premières et ensuite elles sont acheminées vers le précipitateur électrostatique. Dans la tour de conditionnement, les fumées sont conditionnées (diminution de température au-dessous du point de résistivité maximale) [1] et épurées d'une quantité importante des poussières puis envoyées vers le précipitateur électrostatique. Le rôle de ce dernier est de purifier d'avantage ces poussières, pour atteindre un taux n'excédant pas 5 mg de poussière par  $m^3$  de fumée [7]. Pour terminer, les gaz sont rejetés vers l'atmosphère à travers la cheminée.

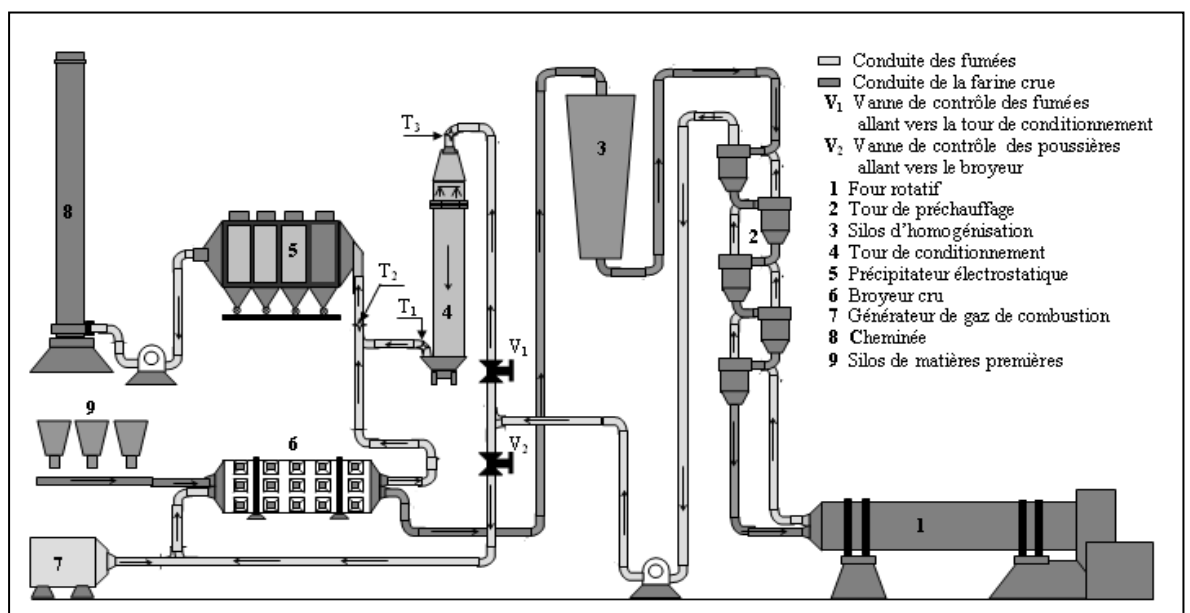


Figure.I.1. Circuit de flux des fumées dans une cimenterie

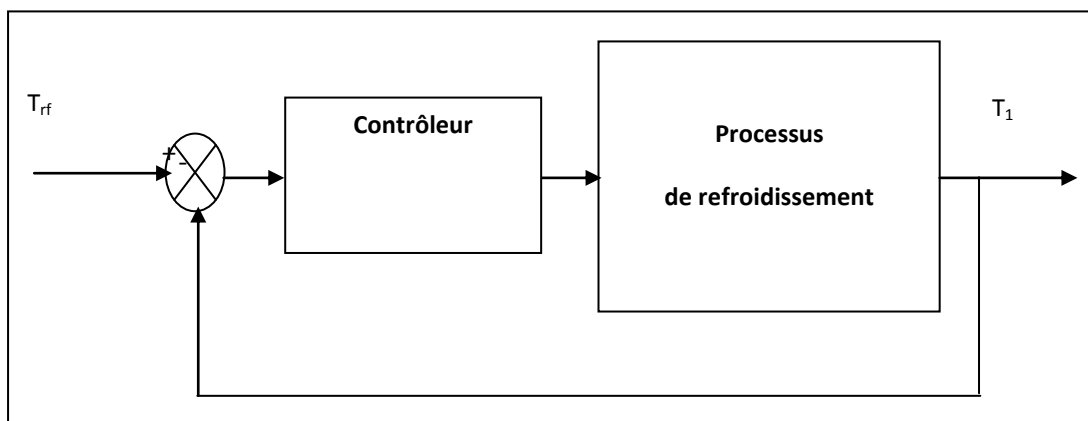
D'autre part, il est à signaler que l'efficacité des précipitateurs électrostatiques dépend de la température des fumées à épurées. Toutefois, les différentes stratégies de contrôle existantes actuellement tiennent compte uniquement de la température des fumées à la sortie de la tour de conditionnement ( $T_1$ ) mais pas de celle des fumées à l'entrée du précipitateur électrostatique ( $T_2$ ).

### III. Stratégies de contrôle de la température des fumées

Dans cette partie nous présentons les différentes stratégies de contrôle de la température des fumées acheminées vers le précipitateur électrostatique et qui sont appliquées dans l'industrie du ciment.

#### III.1 Régulation basée seulement sur la température à la sortie de la tour [4]

Dans cette technique, le contrôleur régule la température à la sortie de la tour ( $T_1$ ) en agissant sur une vanne d'eau et n'utilise comme information que cette température et la température de référence  $T_{rf}$  (Fig.I.2). Dans ce cas, généralement, le contrôleur est de type flou [8].



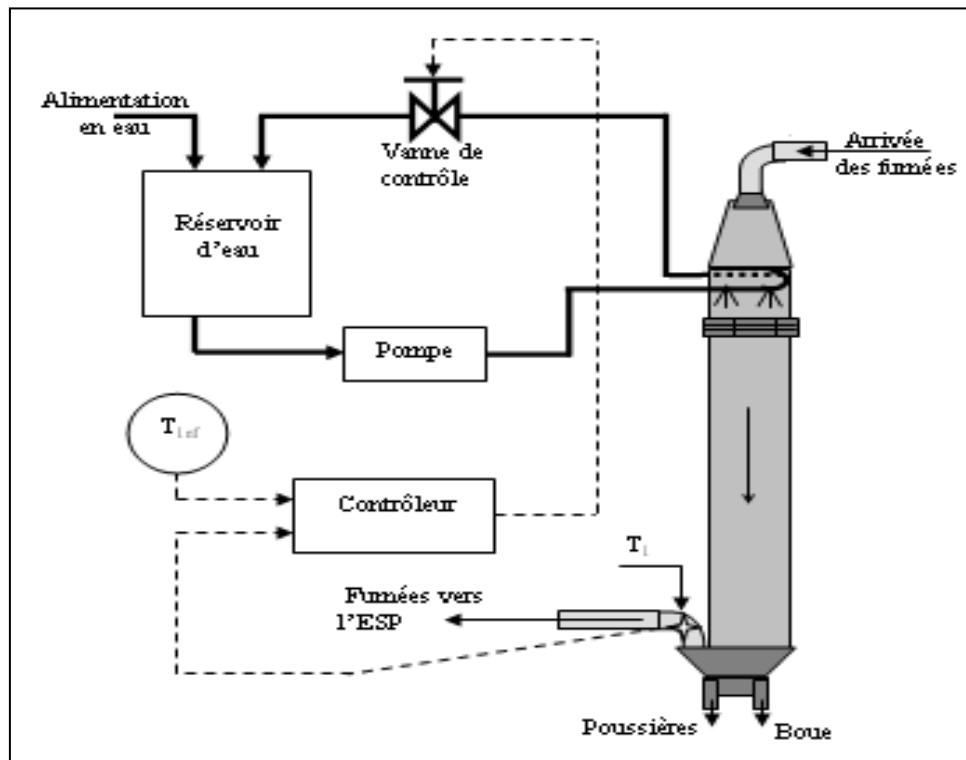
**Figure. I. 2** Schéma de structure de la boucle de régulation

Le schéma détaillé de cette technique est présenté sur la Fig.3. Les fumées entrent par le haut de la tour et sortent par le bas pour se diriger vers l'ESP. L'eau utilisée est injectée en haut de la tour à partir d'un réservoir par le biais d'une pompe. Le contrôleur agit sur la vanne de contrôle de telle sorte que:

- Si la température  $T_1$  à la sortie de la tour augmente au-dessus de la température de référence  $T_{rf}$ , le contrôleur agit par diminution de la course de la vanne, avec un

certain pourcentage, alors une quantité d'eau supplémentaire est injectée dans la tour (TC), chose qui permet de diminuer la valeur de la température  $T_1$ ;

- Si la valeur de la température  $T_1$  à la sortie de la tour diminue au-dessous de la température de référence  $T_{1ref}$ , le contrôleur ouvre la vanne, avec un certain pourcentage, et la quantité d'eau injectée dans la tour (TC) diminue, ce qui permet de faire augmenter la valeur de la température  $T_1$  à la sortie de cette dernière.



**Figure. I. 3** Schéma de principe du système de régulation basé seulement sur la température de la sortie de la tour de conditionnement

La stratégie basée, uniquement, sur la valeur de la température à la sortie de la tour a été l'œuvre d'un brevet de Schwab et al. Schwab a proposé une technique de régulation de température dont la totalité des fumées passe par la tour de conditionnement (Fig.I.4) [4]. Une technologie de régulation similaire est proposée par la société BIPROMET. La Fig.I.5 présente le schéma de contrôle conçu par cette entreprise [7].

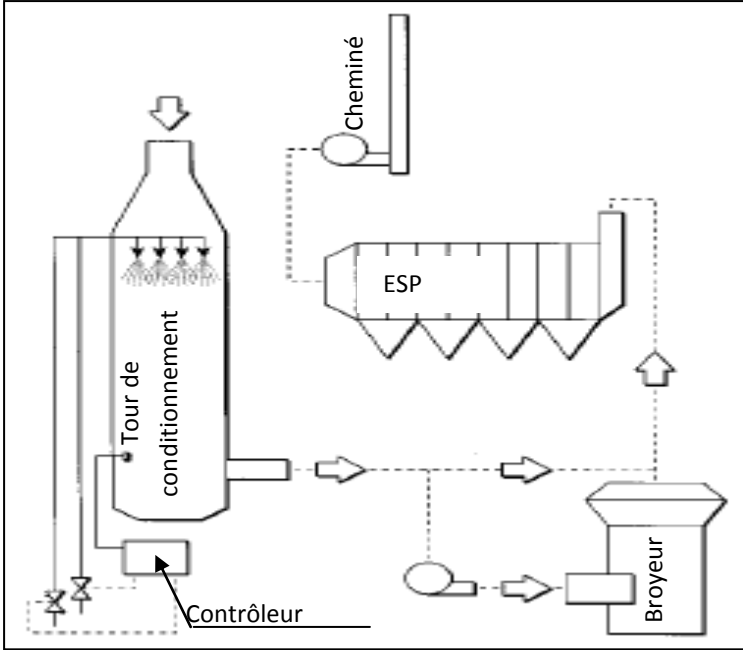


Figure I. 4. Schéma de régulation proposé par Schwab et al

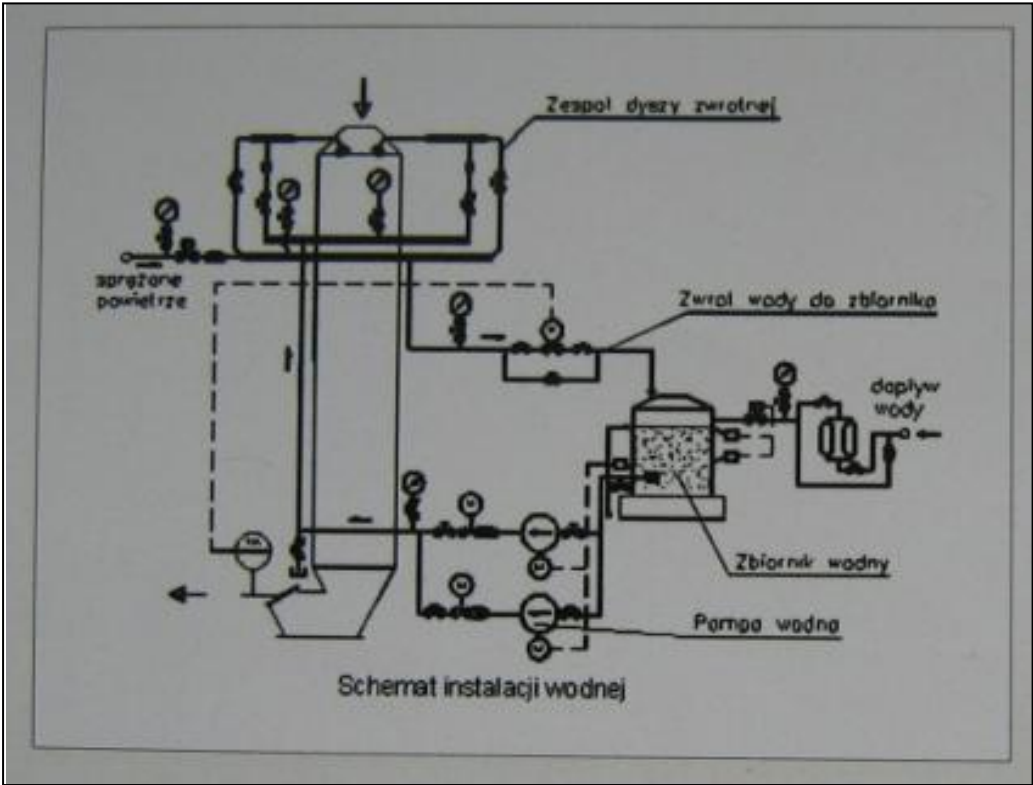


Figure I. 5 Schéma de régulation de la société

### III.2 Régulation basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour (T.C)

Vu que la température à l'entrée de TC perturbe la stabilité du fonctionnement de cette dernière ; une autre technique de réglage a été mise en évidence. Dans ce cas, le contrôleur régule le débit d'eau injectée dans la tour en tenant compte de la valeur de la température  $T_3$  (Fig.I.6). Le schéma de structure détaillé de cette stratégie est présenté sur la Fig.I.7.

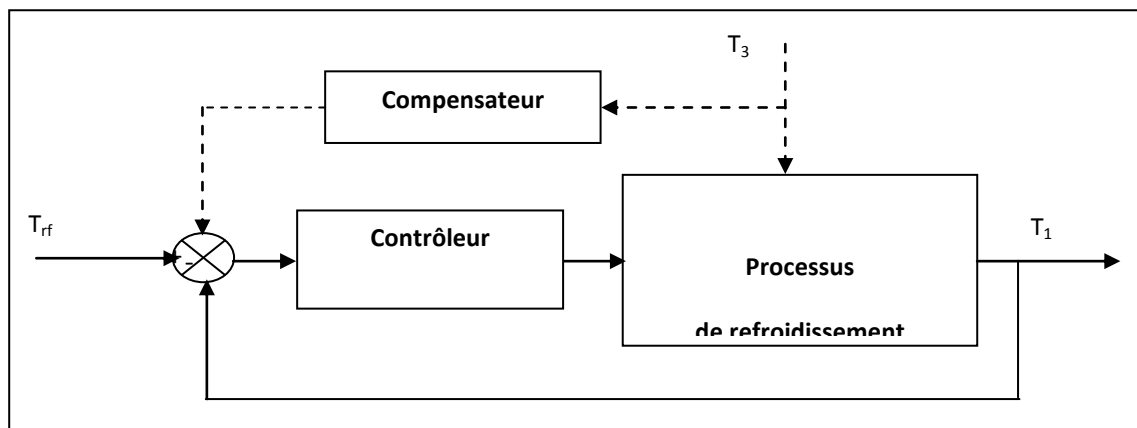


Figure. I. 6 Schéma de structure de la boucle de contrôle basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour

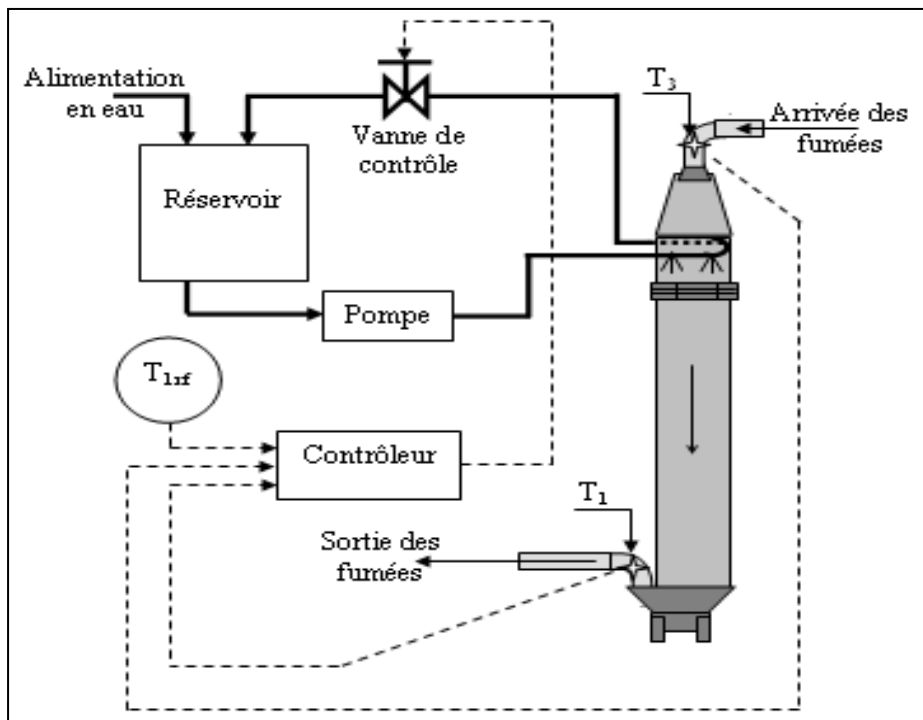
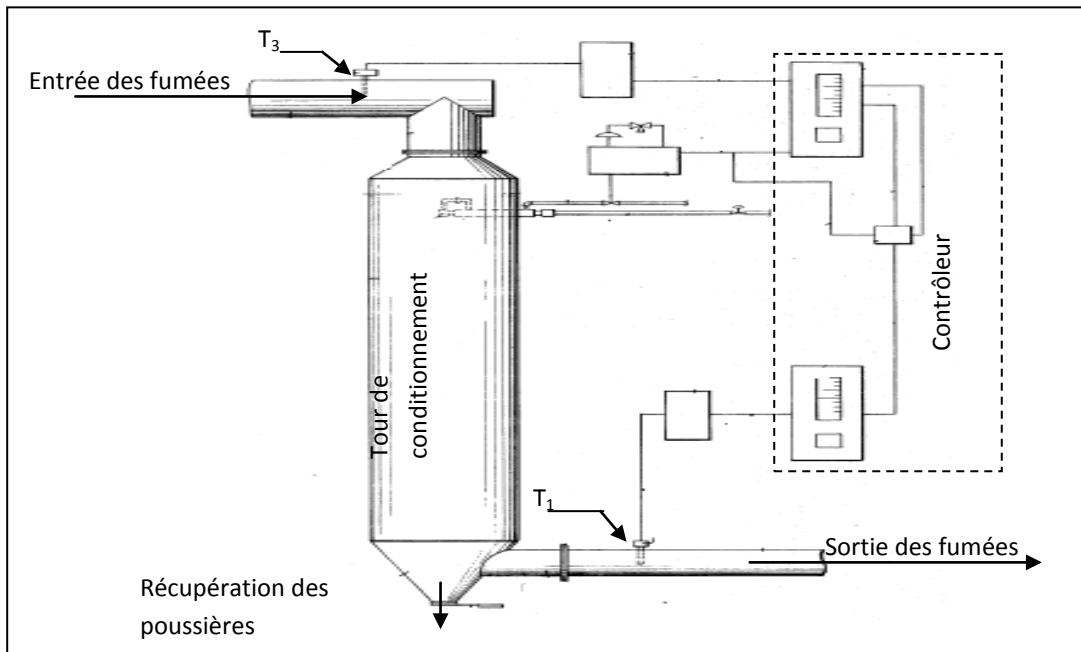


Figure. I. 7 Schéma détaillé de la stratégie basée sur les deux températures  $T_1$  et  $T_3$

Cette technique de contrôle a été proposée par Reigel et al [3]. Reigel a mis l'accent, en particulier, sur la technique d'injection d'eau et sur l'orientation des buses. Il a proposé une boucle de régulation en cascade (Fig.I.8). Cette boucle de régulation cascade prend en considération les deux températures à l'entrée et à la sortie de TC. La boucle de réglage interne réagit pour des variations sur la température  $T_3$  et la boucle externe réagit pour des variations de la température de  $T_1$  [8]



**Figure. I. 8** Schéma de contrôle proposé par Reigel et al [3]

Par ailleurs, la société EnviroCare [6] a une technologie de réglage similaire à la méthode décrite ci-dessus et le schéma fonctionnel détaillé de ce circuit de régulation est présenté sur la Fig.I.9. Dans une installation typique, les signaux des thermocouples sont comparés à une température de référence et un signal est transmis à la vanne de contrôle du débit d'eau. La vanne de contrôle de la circulation d'air est alors modulée pour contrôler le rapport air-eau approprié [6].

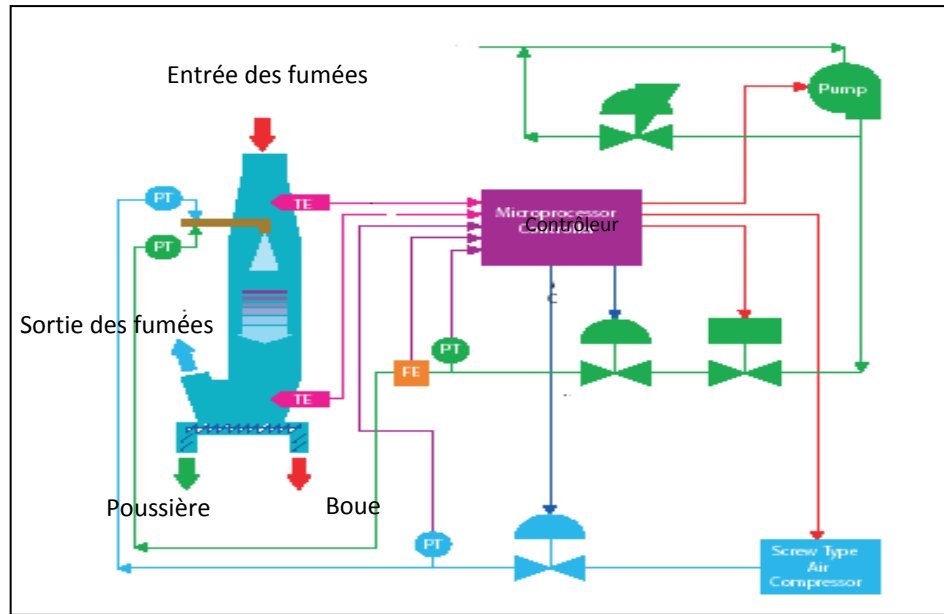


Figure. I.9 Schéma fonctionnel de contrôle de l'EnviroCare

### III.3 Régulation basée sur les températures à l'entrée et à la sortie de la tour et sur le débit des gaz à l'entrée de la tour (TC)

L'autre variable qui est prise en considération dans cette stratégie est le débit des fumées  $Q_1$  à l'entrée de la tour de conditionnement. En tenant compte de cette variable, nous pouvons contrôler avec plus de précision la température  $T_1$ . Le schéma de structure de cette technique est illustré sur la Fig.I.10.

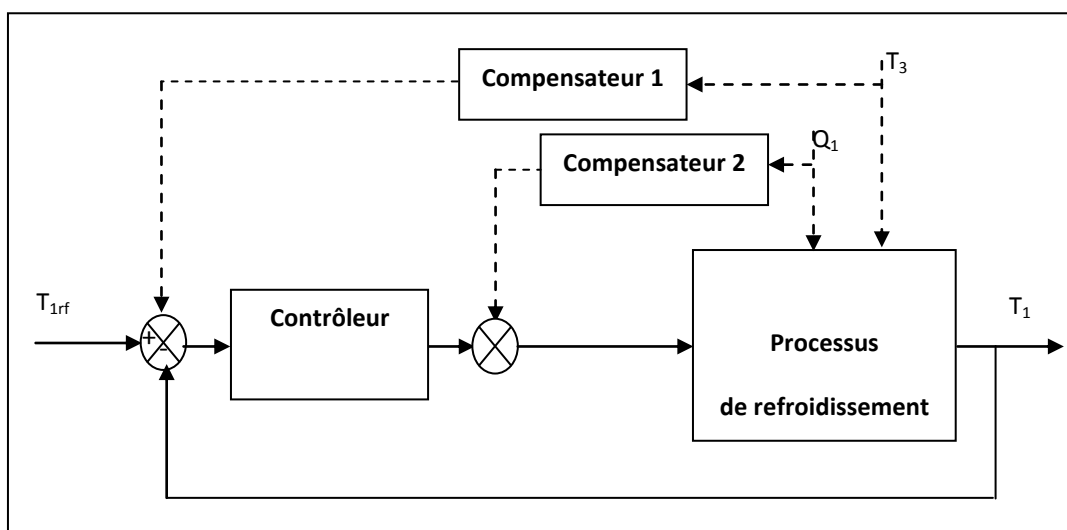
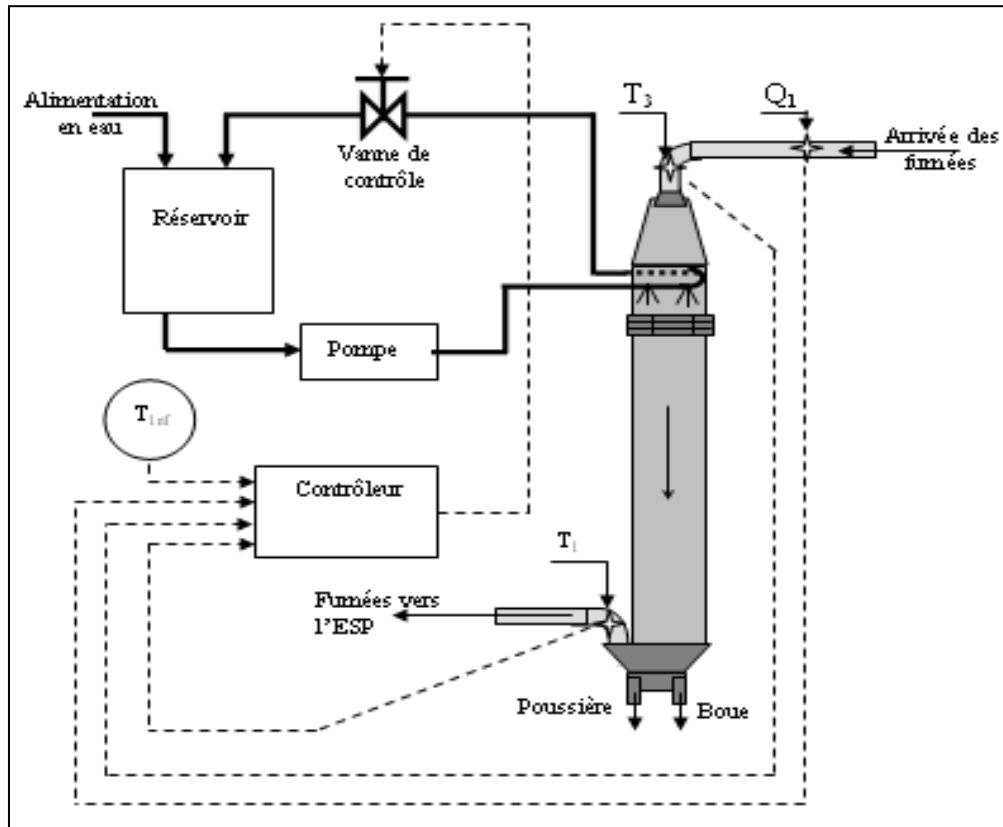


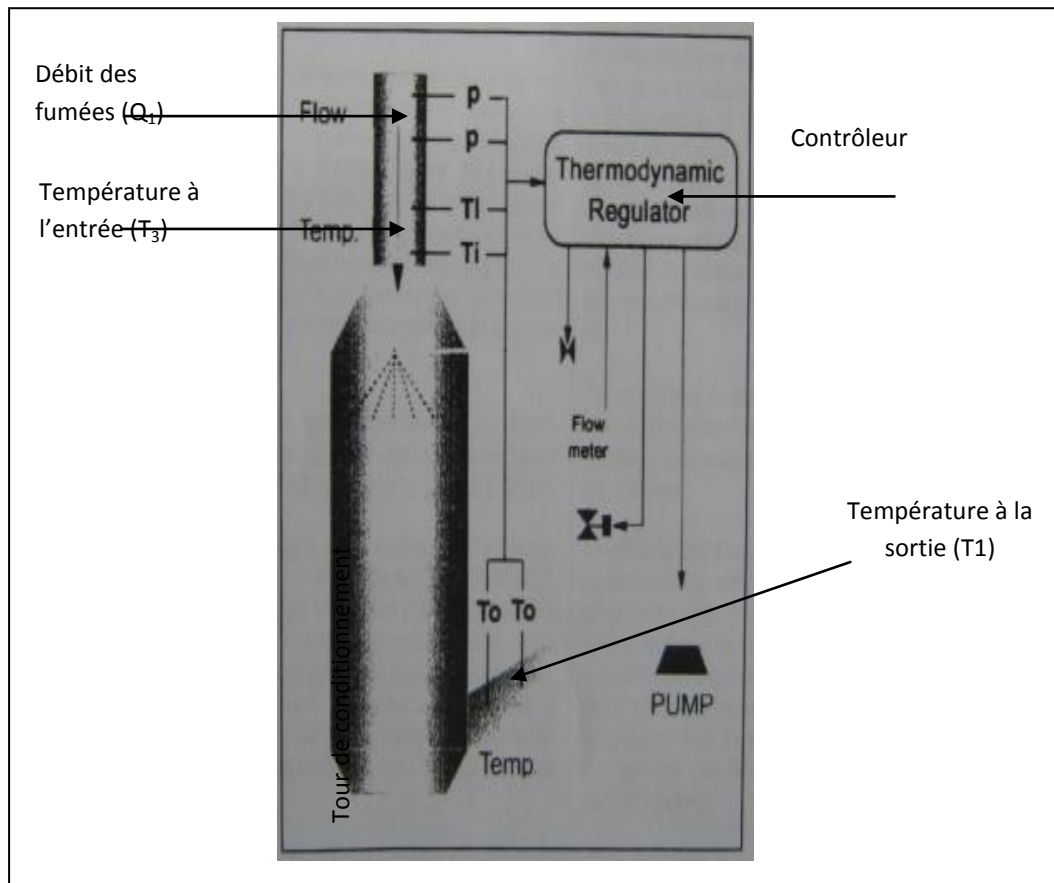
Figure. I.10 Schéma structurel de la boucle de contrôle basé sur les deux températures et le débit des fumées

En effet, étant donné que les variables, température ( $T_3$ ) et le débit ( $Q_1$ ), des fumées sont deux grandeurs perturbatrices, la compensation de leurs actions permet de stabiliser et d'optimiser la conduite de la tour de conditionnement. Le schéma de principe dans ce cas est donné sur la Fig.I.11



**Figure. I. 11** Schéma détaillé de la stratégie basée sur les deux températures  $T_1$  et  $T_3$

Ce système de régulation thermodynamique a été développé par Schioth [1] en vue d'obtenir une réactivité supérieure à celle des systèmes conventionnels (Fig.I.12).



**Figure. I.12** Schéma de contrôle proposé par Schioth [1]

Il permet de mesurer le débit et la température des fumées avant que ces dernières n'entrent dans la zone d'évaporation de l'eau de la tour de conditionnement. Les mesures sont transmises à un automate qui calcule le débit d'injection d'eau requis. Sur la base du débit des fumées et de la différence de température d'entrée, la quantité totale de chaleur à éliminer des fumées peut être estimée [1].

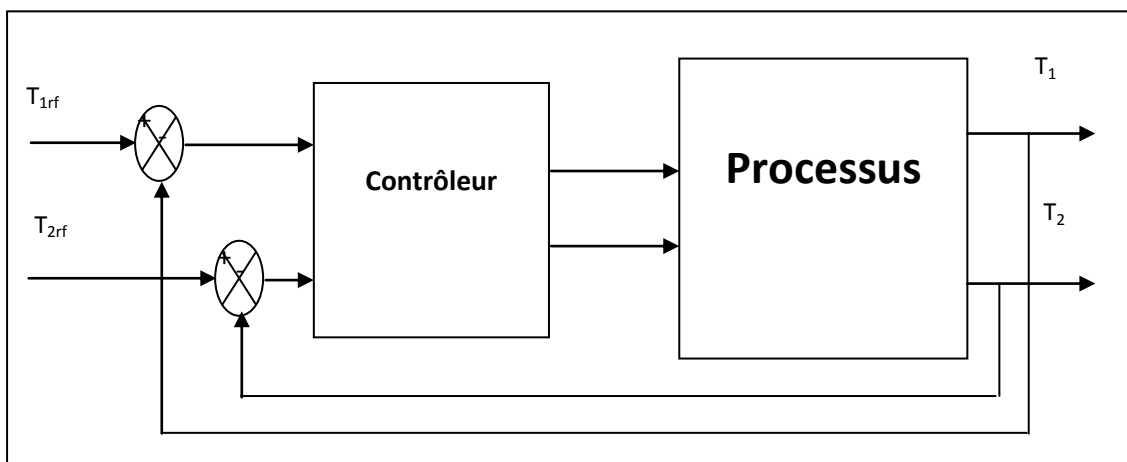
#### IV. Nouvelle stratégie pour le contrôle de la température des fumées

Les trois stratégies de contrôle présentées sont caractérisées par des insuffisances évidentes en ce qui concerne l'aspect d'optimisation de la conduite de la tour de conditionnement. En plus, le rôle du système de régulation peut être étendu en vue d'inclure le réglage de la température des fumées à l'entrée du précipitateur électrostatique. En effet, le fonctionnement de ce dernier est optimal si la température des fumées qu'il traite est comprise entre 120 °C et 150 °C [1, 2]. Par ailleurs, étant donné que les fumées acheminées vers l'ESP passe soit par la tour de conditionnement et/ou soit par le broyeur cru, alors il est

indispensable de prendre en compte, dans la stratégie de commande automatique proposée l'interaction des fumées des deux circuits.

A la lumière de ce qui a été dit et en vue de trouver une solution aux problématiques suscitées, nous proposons une nouvelle stratégie de contrôle qui prend en compte le débit des fumées qui passent par le broyeur. Sachant que ces dernières sont mélangées à celles qui passent à travers la tour de conditionnement et que la température à l'entrée du précipitateur électrostatique est celle du mélange alors il est nécessaire que les fumées passent en permanence par la tour (avec un débit variable).

Le schéma de principe de la technique proposée est présenté par la Fig.I.13. Dans ce schéma, nous avons deux variables à contrôler : la température à la sortie de la tour ( $T_1$ ), pour éviter la formation de la boue, et la température à l'entrée du précipitateur électrostatique ( $T_2$ ) pour avoir un fonctionnement optimal de ce dernier. Ces deux variables sont contrôlées en agissant sur deux vannes, l'une permet de contrôler le débit d'eau injectée dans la tour et l'autre permet de contrôler le débit des fumées qui passent par le broyeur (Fig.I.14).

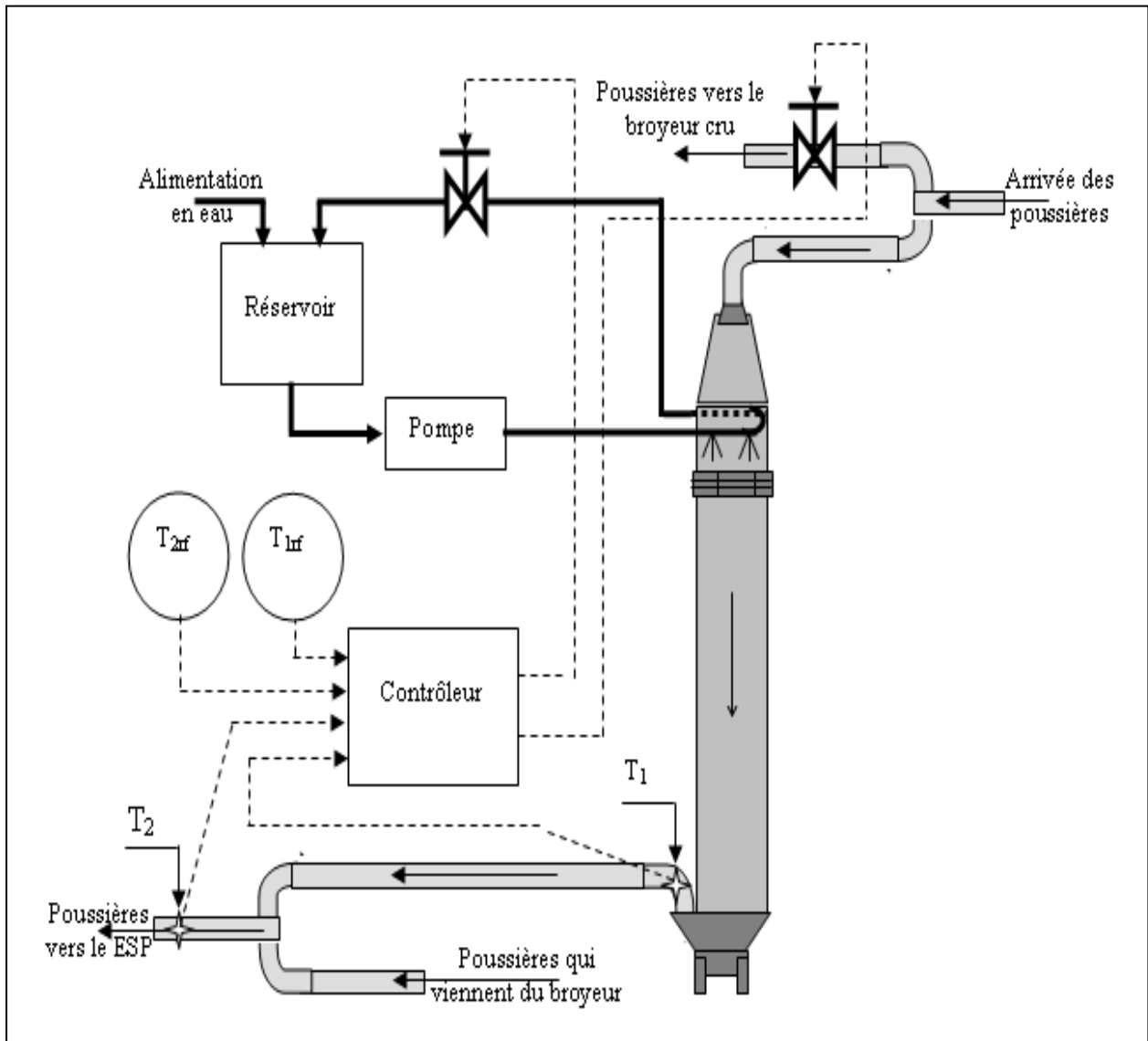


**Figure.I. 13** Schéma de principe de la nouvelle boucle de contrôle

Le principe de fonctionnement de cette technique est comme suit :

- Si la température à l'entrée du précipitateur électrostatique ( $T_2$ ) est dans l'intervalle  $120^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ , le contrôleur contrôle seulement la température à la sortie de la tour ( $T_1$ ) en agissant sur la vanne de réglage de la quantité d'eau injectée à l'intérieur de la tour (boucle de réglage en cascade permettant de stabiliser à la fois le débit d'eau injectée et la température de sortie de la tour de conditionnement).

- Si la température à l'entrée de ESP ( $T_2$ ) est en dehors de l'intervalle  $120^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ , alors le contrôleur agit sur le rapport (pourcentage) des quantités de fumées qui sont acheminées vers la tour de conditionnement.



**Figure. I.14** Schéma structurel détaillé de la nouvelle stratégie proposée

### **IIV. Conclusion**

L'utilisation d'une tour de conditionnement dans une chaîne de production de ciment est indispensable pour améliorer les performances du précipitateur électrostatique. Même si le réglage de la température des fumées à la sortie de cette dernière a été l'objectif de plusieurs travaux de recherche.

Vue que les performances des précipitateurs électrostatiques dépend de la température des fumées à leur entrée, nous avons proposés le réglage de cette température en agissant sur deux grandeurs différentes :

- Le débit d'eau injectée dans la tour de conditionnement afin de bien conditionner les fumées à l'intérieur, chose qui permet de contrôler la température à la sortie de la tour TC.
- Le débit des fumées qui passe par le broyeur dans l'objectif de contrôler la température des fumées à l'entrée du précipitateur électrostatique, chose qui permet d'améliorer son efficacité, donc la récupération d'un maximum de poussière contenue dans les fumées.

Dans le but d'élaborer un système de réglage du processus de conditionnement des fumées, nous avons pensé à l'élaboration de son modèle de fonctionnement. A cet effet, nous avons procédé à des tests expérimentaux sur le système en question.



# CHAPITRE II

# Caractéristique statique de la tour de conditionnement des fumées

## I. Introduction

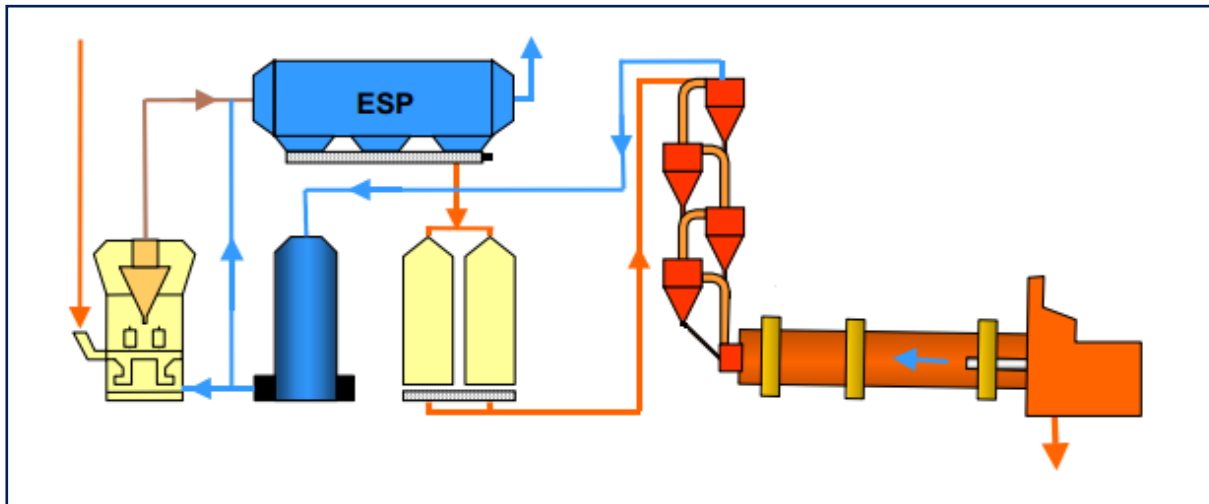
Pour maîtriser la manière dont va réagir un système automatique, il faut tout d'abord comprendre la relation entre l'entrée et la sortie du sous-ensemble de base, ceci pour des niveaux de l'entrée fixes (ou variant très lentement). On parle de caractéristique statique car elle est obtenue pour des valeurs continues (stabilisées) de l'entrée et de la sortie.

Dans la fabrication du ciment la tour de conditionnement des fumées jouent un rôle très important dans le traitement des gaz poussières, elles permettent d'abaisser les températures des fumées (gaz + Poussières) venant du préchauffeur à un niveau acceptable d'une part, récupérer une partie des poussières contenue dans les fumées au niveau de la tour de conditionnement et d'autre part, garantir un fonctionnement optimal du précipitateur électrostatique.

Dans ce chapitre nous étudions l'évolution de la température à la sortie de la tour en fonction de la variation de débit des fumées à l'entrée et la variation de débit d'eau injecté en haut de la tour. Ceci nous permettra de tracer la caractéristique statique de la tour de conditionnement des fumées.

## II. Bilan thermique de la tour de conditionnement des fumées

Dans une chaîne de production du ciment, la tour de conditionnement fait partie du circuit des fumées traitées puis envoyées dans l'atmosphère. Elle se situe entre la tour préchauffage et le filtre électrostatique (Fig II.1). Elle permet de conditionner (d'humidifier) les poussières contenues dans les fumées pour optimiser le rendement du filtre électrostatique et de récupérer une partie des poussières.

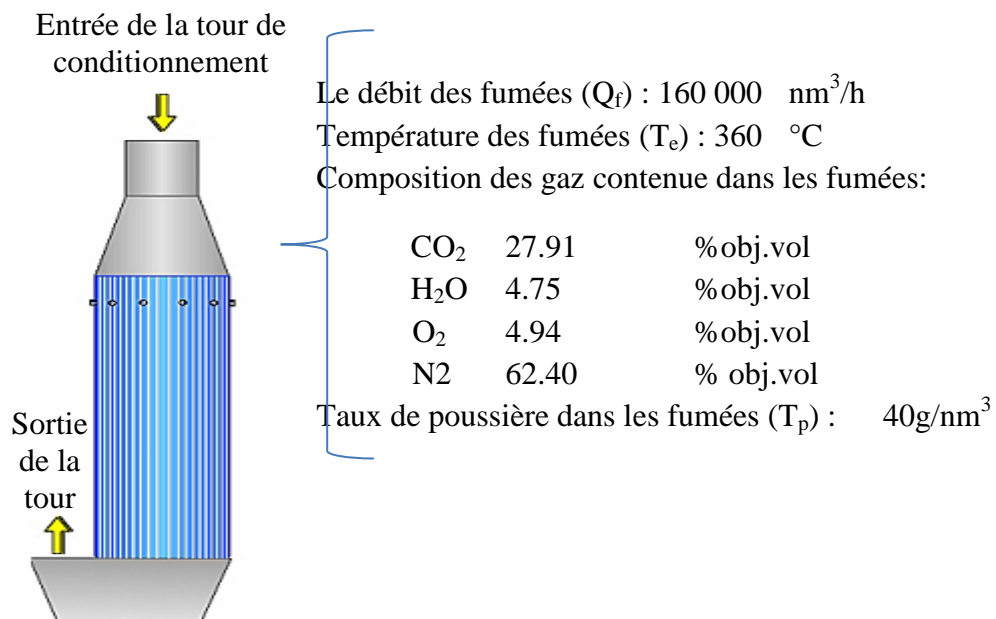


**Figure II.1** Source et circuit des fumées dans une cimenterie

L'étude statique de la tour de conditionnement des fumées, consiste à déterminer le débit d'eau nécessaire pour obtenir une température des fumées à la sortie de la tour de conditionnement avoisinant les 150°C. Ce calcul sera effectué pour de différents débits de fumées ( $Q_f$ ), ainsi que de différente température des fumées( $T_e$ ) à l'entrée de la tour de conditionnement.

### II.1. Les données de base

- Caractéristiques des fumées à l'entrée de la tour de conditionnement



**Figure II.2** Caractéristiques des fumées à l'entrée de la tour de conditionnement

- Emission de poussière de l'échangeur :

$$Q_t = (Q_f \times T_p)/1000$$

-Quantité de poussière totale contenue dans les fumées ( $Q_t$ ) :

$$Q_t = (Q_f \times T_p)/1000 \quad 6400 \text{Kg/h}$$

-Température des poussières :  $360^\circ\text{C}$

- Quantité d'eau nécessaire à injecter pour obtenir une température  $T_s=150^\circ\text{C}$  à la sortie de la tour :

-Quantité :  $G_w \text{Kg/h}$

-Température de l'eau ( $T_w$ ) :  $20^\circ\text{C}$

### ➤ Principe de calculs

- Température des gaz en aval de la tour :  $150^\circ\text{C}$
- Point de rosé des gaz en aval de la tour :  $120^\circ\text{C}$
- Teneur en poussière(des gaz) ( $T_g$ ):  $25 \text{ g/nm}^3$
- Quantité de poussière dans les gaz :  $4000 \text{ Kg/h}$

$$Q_{pg} = (Q_f \times T_g)/1000 Q_t$$

$$= (160000 \times 25)/1000 = 4000$$

- Quantité de poussière précipitée dans la tour :  $2400 \text{ Kg/h}$

$$Q_{pp} = Q_t - Q_{pg}$$
$$6400 - 4000 = 2400$$

- Température des poussières précipitée dans la tour :  $130^\circ\text{C}$

## II.2. Bilan thermique de la tour de conditionnement

### A. Recette de la chaud

#### a. Chaud physique des gaz d'échangeur ( $Q_1^p$ ):

❖ Pour :  $Q_f = 160000 \text{ nm}^3/\text{H}$   
 $T_e = 360^\circ\text{C}$

On a:

$$Q_1^p = Q_f \cdot C_g \cdot T_e \text{ (II.1)}$$

Avec :  $Q_f$  : Débit de fumée

$C_g$ : Moyenne chaud des gaz

$T_e$ : Température d'entrées

- Calcul de la moyenne chaud des gaz à 360°C :  $C_g^{360^\circ C}$

$$C_g^{300^\circ C} = \frac{[(27.91 \times 0.4469) + (4.75 \times 0.3684) + (4.94 \times 0.3240) + (62.40 \times 0.3122)]}{100}$$

$$C_g^{300^\circ C} = 0.353 \text{Kcal/nm}^3 \cdot C$$

$$C_g^{400^\circ C} = \frac{[(27.91 \times 0.4628) + (4.75 \times 0.3739) + (4.94 \times 0.3291) + (62.40 \times 0.3146)]}{100}$$

$$C_g^{400^\circ C} = 0.36 \text{Kcal/nm}^3 \cdot C$$

$$C_g^{360^\circ C} = 0.353 + \left[ \frac{360-300}{400-300} \right] \times (0.360 - 0.353)$$

$$C_g^{360^\circ C} = 0.357 \text{Kcal/nm}^3 \cdot C$$

Donc:

$$Q_1^p = 160000 \times 0.375 \times 360 = 20563200 \text{Kcal/h}$$

**b. Chaud physique de la poussière en aval de l'échangeur ( $Q_2^p$ ):**

$$Q_2^p = Q_t \cdot C_p^{360^\circ C} \cdot T_e \quad (\text{II.2})$$

- Calcul de la moyenne chaud spécifique à 360°C :  $C_p^{360^\circ C}$

$$C_p^{360^\circ C} = 0.234 + \left[ \frac{360-300}{400-300} \right] (0.244 - 0.234)$$

$$C_p^{360^\circ C} = 0.240 \text{Kcal/Kg} \cdot C$$

Donc:

$$Q_2^p = 6400 \times 0.24 \times 360 = 552960 \text{Kcal/h}$$

**c. Chaud physique de l'eau ( $Q_3^p$ ):**

- Calcul de la moyenne chaud physique de l'eau à 20°C :  $C_w^{20^\circ C}$

$$C_w^{20^\circ C} = 1.000 \text{Kcal/Kg} \cdot C$$

Donc:

$$Q_3^p = G_w \cdot C_w^{20^\circ C} \cdot 20 \quad (\text{II.3})$$

$$Q_3^p = G_w \times 1000 \times 20$$

$$Q_3^p = 20G_w \quad \text{Kcal/h}$$

- Total recette de la chaud:

$$Q^p = Q_1^p + Q_2^p + Q_3^p = 20563200 + 552960 + 20G_w$$

$$Q^p = 21116160 + 20G_w$$

## B. Dépense :

### a. Chaud physique des gaz de dépollueur $Q_1^R$ :

❖ Pour  $Q_f = 160000 \text{ nm}^3/\text{h}$

$$T_s = 150^\circ\text{C}$$

On a:

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{150^\circ\text{C}} \cdot T_s \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $Q_f$ : Débit de fumée

$C_g$ : Moyenne chaud spécifique

$T_s$ : Température de sortie

- Calcul de la moyenne spécifique à  $150^\circ\text{C}$  :

$$C_g^{100^\circ\text{C}} = \frac{[(27.91 \times 0.4092) + (4.75 \times 0.3596) + (4.94 \times 0.3145) + (62.40 \times 0.3096)]}{100}$$

$$C_g^{100^\circ\text{C}} = 0.340 \text{ Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

$$C_g^{200^\circ\text{C}} = \frac{[(27.91 \times 0.4240) + (4.75 \times 0.3635) + (4.94 \times 0.3190) + (62.40 \times 0.3106)]}{100}$$

$$C_g^{200^\circ\text{C}} = 0.345 \text{ Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

$$C_g^{150^\circ\text{C}} = 0.34 + \left[ \frac{150-100}{200-100} \right] \times (0.340 - 0.345) = 0.3425$$

$$C_g^{150^\circ\text{C}} = 0.343 \text{ Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.343 \times 150$$

$$Q_1^R = 8232000Kca/h$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_{pg} \cdot C_p^{150^\circ C} \cdot T_e \quad (II.5)$$

Avec :  $Q_{pg}$  : Quantité de poussière dans les gaz

- Calcul de la moyenne chaud des poussières à  $150^\circ C$  :  $C_p^{150^\circ C}$

$$C_p^{150^\circ C} = 0.209 + \left[ \frac{150-100}{200-100} \right] \times (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{150^\circ C} = 0.215Kcal/(Kg.C)$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.215 \times 150$$

$$Q_2^R = 129000Kcal/h$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = Q_{pp} \cdot C_p^{130^\circ C} \cdot T_e \quad (II.6)$$

Avec :

$Q_{pp}$  : Quantité de poussière précipite dans la tour

- Calcul de la moyenne chaud physique de la poussière à  $130^\circ C$  :  $C_p^{130^\circ C}$

$$C_p^{130^\circ C} = 0.209 + \left[ \frac{130-100}{200-100} \right] (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{130^\circ C} = 0.212Kcal/Kg.C$$

Donc :

$$Q_3^R = 2400 \times 0.212 \times 130$$

$$Q_3^R = 66144Kcal/h$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w (r \cdot C_{pw}^{150^\circ C} \cdot 150) \quad (II.7)$$

Avec :  $G_w$  : Débit d'eau

r:Chaud d'évaporation à  $0^\circ C$

- Calcul de la moyenne chaud spécifique de la vapeur à 150°C :  $C_{pw}^{150^{\circ}C}$

$$C_{pw}^{150^{\circ}C} = (0.36 + \left[ \frac{150-100}{200-100} \right] \times (0.364 - 0.360)) / 0.805$$

$$C_{pw}^{150^{\circ}C} = 0.450 \text{ Kcal}/(\text{nm}^3 \cdot C)$$

Donc:

$$Q_4^R = G_w (597 + 0.450 \times 150)$$

$$Q_4^R = 665 G_w \text{ Kcal/h}$$

- Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 8232000 + 129000 + 66144 + 665 G_w$$

$$Q^R = 8427144 + 665 G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20 G_w = 8427144 + 665 G_w$$

$$G_w = 19673 \text{ Kg/h}$$

❖ Pour  $T_s = 130^{\circ}C$

**a. Chaud physique des gaz de dépoussiéreur  $Q_1^R$ :**

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{130^{\circ}C} \cdot T_s \quad (\text{II.8})$$

- Calcul de la moyenne spécifique à 130°C :

$$C_g^{130^{\circ}C} = 0.34 + \left[ \frac{130-100}{200-100} \right] (0.340 - 0.345) = 0.3389$$

$$C_g^{130^{\circ}C} = 0.339 \text{ Kcal}/(\text{nm}^3 \cdot C)$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.339 \times 130$$

$$Q_1^R = 751200 \text{ Kcal/h}$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_p \cdot C_p^{130^{\circ}C} \cdot T_s \quad (\text{II 9})$$

- Calcul de la moyenne chaud des poussières à 130°C :  $C_p^{130^\circ C}$

$$C_p^{130^\circ C} = 0.209 + \left[ \frac{130-100}{200-100} \right] \times (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{130^\circ C} = 0.212 \text{ Kcal/Kg.C}$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.212 \times 130$$

$$Q_2^R = 110240 \text{ Kcal/h}$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = 66144 \text{ Kcal/h}$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w (r + C_{pw}^{130^\circ C} \cdot T_s) \text{ (II 10)}$$

Calcul de moyenne chaud spécifique de la vapeur à 130°C :

$$C_{pw}^{130} = (0.360 + \left[ \frac{130-100}{200-100} \right] (0.364 - 0.360)) / 0.805 = 0.448 \text{ Kcal/Kg.C}$$

Donc :

$$Q_4^R = G_w (597 + 0.448 \times 130)$$

$$Q_4^R = 655.24 G_w \text{ Kcal/h}$$

- Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 7051200 + 110240 + 66144 + 655.24 G_w$$

$$Q^R = 7227584 + 655.24 G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20 G_w = 7227584 + 655.24 G_w$$

$$G_w = 21863.51 \text{ Kg/h}$$

❖ Pour  $T_s = 110^\circ C$

**a. Chaud physique des gaz de dépollueur  $Q_1^R$ :**

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{110^\circ C} T_s \text{ (II 11)}$$

- Calcul de la moyenne spécifique à 110°C :

$$C_g^{110} = 0.34 + \left[ \frac{110-100}{200-100} \right] (0.340 - 0.345) = 0.3395$$

$$C_g^{110} = 0.340 \text{ Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.340 \times 110$$

$$Q_1^R = 5984000 \text{ Kcal/h}$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_p \cdot C_p^{110^\circ\text{C}} \cdot T_s \quad (\text{II } 12)$$

- Calcul de la moyenne chaud des poussières à 110°C :  $C_p^{110^\circ\text{C}}$

$$C_p^{110^\circ\text{C}} = 0.209 + \left[ \frac{110-100}{200-100} \right] (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{110^\circ\text{C}} = 0.210 \text{ Kcal/(Kg.C)}$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.210 \times 110$$

$$Q_2^R = 92400 \text{ Kcal/h}$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = 66144 \text{ Kcal/h}$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w (r + C_{pw}^{110^\circ\text{C}} \cdot T_s) \quad (\text{II } 13)$$

- Calcul de moyenne chaud spécifique de la vapeur à 110°C :

$$C_{pw}^{110^\circ\text{C}} = (0.360 + \left[ \frac{110-100}{200-100} \right] (0.364 - 0.360)) / 0.805 = 0.447 \text{ Kcal/Kg.C}$$

Donc :

$$Q_4^R = G_w (597 + 0.447 \times 110)$$

$$Q_4^R = 646.17 G_w \text{ Kcal/h}$$

- Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 598400 + 92400 + 66144 + 646.17G_w$$

$$Q^R = 6142544 + 646.17G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20G_w = 6142544 + 646.17G_w$$

$$G_w = 23913.02 \text{ Kg/h}$$

❖ Pour  $T_s = 90^\circ\text{C}$

**a. Chaud physique des gaz de dépoussiéreur:  $Q_1^R$**

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{90^\circ\text{C}} \cdot T_s \text{ (II 14)}$$

- Calcul de la moyenne spécifique à  $90^\circ\text{C}$  :

$$C_g^{90^\circ\text{C}} = 0.34 + \left[ \frac{90-100}{200-100} \right] (0.340 - 0.345) = 0.341$$

$$C_g^{90^\circ\text{C}} = 0.341 \text{ Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.341 \times 90$$

$$Q_1^R = 4910400 \text{ Kcal/h}$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_p \cdot C_p^{90^\circ\text{C}} \cdot T_s \text{ (II 15)}$$

- Calcul de la moyenne chaud des poussières à  $90^\circ\text{C}$  :  $C_p^{90^\circ\text{C}}$

$$C_p^{90^\circ\text{C}} = 0.209 + \left[ \frac{90-100}{200-100} \right] (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{90^\circ\text{C}} = 0.208 \text{ Kcal/Kg.C}$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.208 \times 90$$

$$Q_2^R = 74880 \text{ Kcal/h}$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = 66144 \text{ Kcal/h}$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w(r + C_{pw}^{90^\circ C} \cdot T_s) \quad (\text{II } 16)$$

- Calcul de moyenne chaud spécifique de la vapeur à  $90^\circ\text{C}$  :

$$C_{pw}^{90^\circ C} = (0.360 + [\frac{90-100}{200-100}](0.364 - 0.360)) / 0.805 = 0.446 \text{ Kcal}/(\text{Kg} \cdot \text{C})$$

Donc :

$$Q_4^R = G_w(597 + 0.446 \times 90)$$

$$Q_4^R = 637.14 G_w \text{ Kcal/h}$$

- Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 4910400 + 74880 + 66144 + 637.14 G_w$$

$$Q^R = 5051424 + 637.14 G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20G_w = 5051424 + 637.14G_w$$

$$G_w = 26030.94 \text{ Kg/h}$$

❖ Pour  $T_s = 170^\circ\text{C}$

**a. Chaud physique des gaz de dépollueur  $Q_1^R$ :**

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{170^\circ C} T_s \quad (\text{II } 17)$$

- Calcul de la moyenne spécifique à  $170^\circ\text{C}$  :

$$C_g^{170^\circ C} = 0.34 + [\frac{170-100}{200-100}](0.340 - 0.345) = 0.337$$

$$C_g^{170^\circ C} = 0.337 \text{ Kcal}/\text{nm}^3 \cdot \text{C}$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.337 \times 170$$

$$Q_1^R = 9166400 \text{Kcal/h}$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_p \cdot C_p^{170^\circ\text{C}} \cdot T_s \quad (\text{II 18})$$

Calcul de la moyenne chaud des poussières à  $170^\circ\text{C}$  :  $C_p^{170^\circ\text{C}}$

$$C_p^{170^\circ\text{C}} = 0.209 + \left[ \frac{170-100}{200-100} \right] (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{170^\circ\text{C}} = 0.217 \text{Kcal}/(\text{Kg} \cdot \text{C})$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.217 \times 170$$

$$Q_2^R = 147560 \text{Kcal/h}$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = 66144 \text{Kcal/h}$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w (r + C_{pw}^{170^\circ\text{C}} \cdot T_s) \quad (\text{II 19})$$

Calcul de moyenne chaud spécifique de la vapeur à  $170^\circ\text{C}$  :

$$C_{pw}^{170^\circ\text{C}} = (0.360 + \left[ \frac{170-100}{200-100} \right] (0.364 - 0.360)) / 0.805 = 0.450 \text{Kcal}/(\text{Kg} \cdot \text{C})$$

Donc :

$$Q_4^R = G_w (597 + 0.450 \times 170)$$

$$Q_4^R = 673.5 G_w \text{Kcal/h}$$

- Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 9166400 + 147560 + 66144 + 673.5 G_w$$

$$Q^R = 9380104 + 673.5 G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20 G_w = 9380104 + 673.5 G_w$$

$$G_w=17958.76\text{Kg/h}$$

❖ Pour  $T_s=190^\circ\text{C}$

**a. Chaud physique des gaz de dépoussiéreur  $Q_1^R$ :**

$$Q_1^R = Q_f \cdot C_g^{190^\circ\text{C}} \cdot T_s \quad (\text{II 20})$$

- Calcul de la moyenne spécifique à  $190^\circ\text{C}$  :

$$C_g^{190^\circ\text{C}} = 0.34 + \left[ \frac{190-100}{200-100} \right] (0.340 - 0.345) = 0.336$$

$$C_g^{190^\circ\text{C}} = 0.336 \text{Kcal/nm}^3 \cdot \text{C}$$

Donc:

$$Q_1^R = 160000 \times 0.336 \times 190$$

$$Q_1^R = 10214400 \text{Kcal/h}$$

**b. Chaud physique des poussières dans le gaz en amont du dépoussiéreur :  $Q_2^R$**

$$Q_2^R = Q_p \cdot C_p^{190^\circ\text{C}} \cdot T_s \quad (\text{II 21})$$

- Calcul de la moyenne chaud des poussières à  $190^\circ\text{C}$  :  $C_p^{190^\circ\text{C}}$

$$C_p^{190^\circ\text{C}} = 0.209 + \left[ \frac{190-100}{200-100} \right] (0.22 - 0.209)$$

$$C_p^{190^\circ\text{C}} = 0.219 \text{Kcal}/(\text{Kg} \cdot \text{C})$$

Donc:

$$Q_2^R = 4000 \times 0.219 \times 190$$

$$Q_2^R = 166440 \text{Kcal/h}$$

**c. Chaud physique des poussières précipitées dans la tour :  $Q_3^R$**

$$Q_3^R = 66144 \text{Kcal/h}$$

**d. Chaud d'évaporation de l'eau et de chauffage de la vapeur :  $Q_4^R$**

$$Q_4^R = G_w (r + C_{pw}^{190^\circ\text{C}} \cdot T_s) \quad (\text{II 22})$$

- Calcul de moyenne chaud spécifique de la vapeur à  $190^\circ\text{C}$  :

$$C_{pw}^{190^{\circ}C} = (0.360 + \left[ \frac{190-100}{200-100} \right] (0.364 - 0.360)) / 0.805 = 0.451 \text{ Kcal/Kg.C}$$

Donc :

$$Q_4^R = G_w (597 + 0.451 \times 190)$$

$$Q_4^R = 682.69 G_w \text{ Kcal/h}$$

Total Dépense :  $Q^R$

$$Q^R = Q_1^R + Q_2^R + Q_3^R + Q_4^R$$

$$Q^R = 10214400 + 166440 + 66144 + 682.69 G_w$$

$$Q^R = 10446984 + 682.69 G_w$$

Total recette et dépense nous donne la relation suivante :

$$21116160 + 20 G_w = 10446984 + 682.69 G_w$$

$$G_w = 16099.80 \text{ Kg/h}$$

### III. Caractéristique statique de la tour de conditionnement :

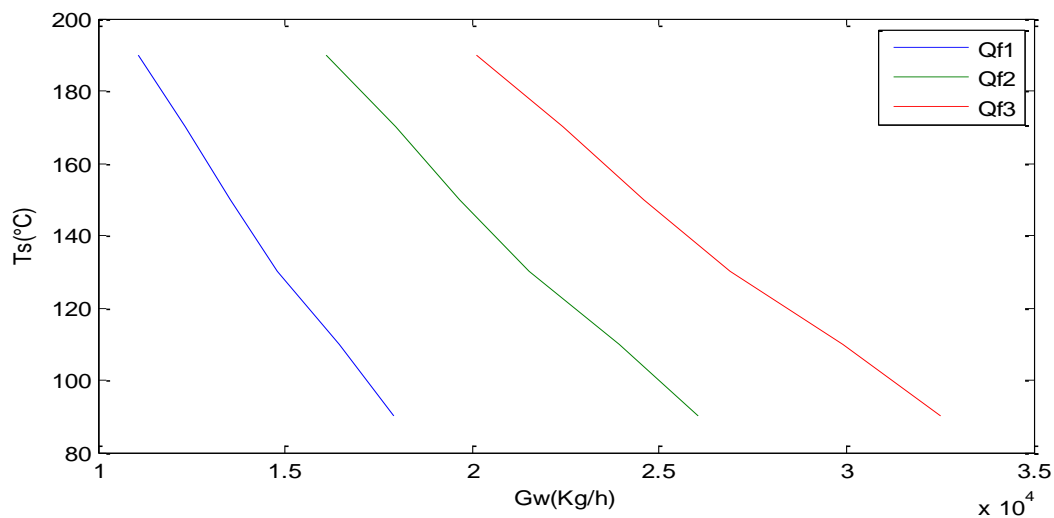
Les résultats obtenus de l'étude statique du fonctionnement de la tour de conditionnement des fumées sont résumés dans les tableaux 1,2 et 3.

- Le tableau suivant comporte les différents débits d'eau  $G_w$  à injecter par la tour de conditionnement, avec une température d'entrée fixe ( $T_e = 360^{\circ}C$ ), et pour un débit de fumées  $Q_f$  variable et la température de sortie  $T_s$ . Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 1) :

**Tableau 1** : Variation de la température de sortie en fonction de débit d'eau d'entrées et pour des débits de fumées variables à l'entrée de la tour.

$T_s (^{\circ}C)$	$G_w (Kg/h)$		
	$Q_{f1} = 110000$ ( $nm^3/h$ )	$Q_{f2} = 160000$ ( $nm^3/h$ )	$Q_{f3} = 200000$ ( $nm^3/h$ )
90	17893.66	26027.15	32533.93
110	16437.32	23908.82	29886.025

130	14795.23	21520.331	26900.41
150	13525.12	19673	24591.12
170	12343.44	17954.10	22442.62
190	11065.43	16095.185	20118.98



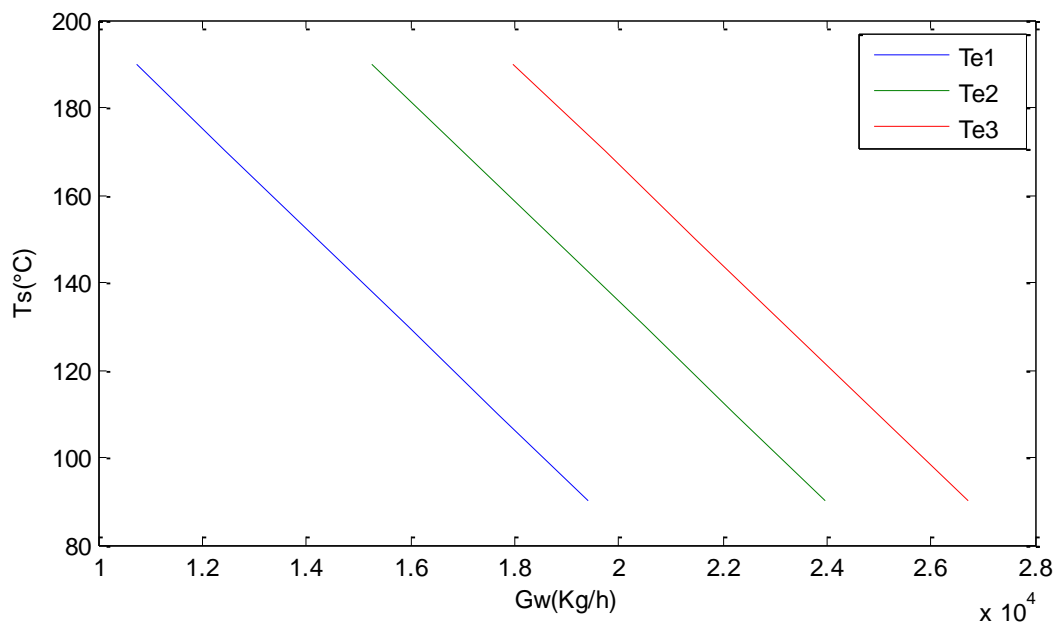
**Figure II.3** La température de sortie  $T_s$  en fonction de débit d'eau  $G_w$  pour un débit de fumée variable à l'entrée de la tour.

La figure ci-dessus montre l'évolution de la température de sortie  $T_s$  pour les différents débits de fumées en fonction de débit d'eau  $G_w$ . D'après les résultats obtenu on remarque que la plage d'eau qui permet d'obtenir des températures de sortie  $T_s=150^\circ\text{C}$  est de  $G_w=[13525.12 ; 24591.12]$  (Kg/h).

- Le tableau suivant comporte les différents débits d'eau  $G_w$  à injecter par la tour de conditionnement, avec un débit de fumée fixe  $Q_f(Q_f=160000\text{nm}^3/\text{h})$ , et pour une température d'entrée  $T_e$  variable et la température de sortie  $T_s$ . Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (tableau2) :

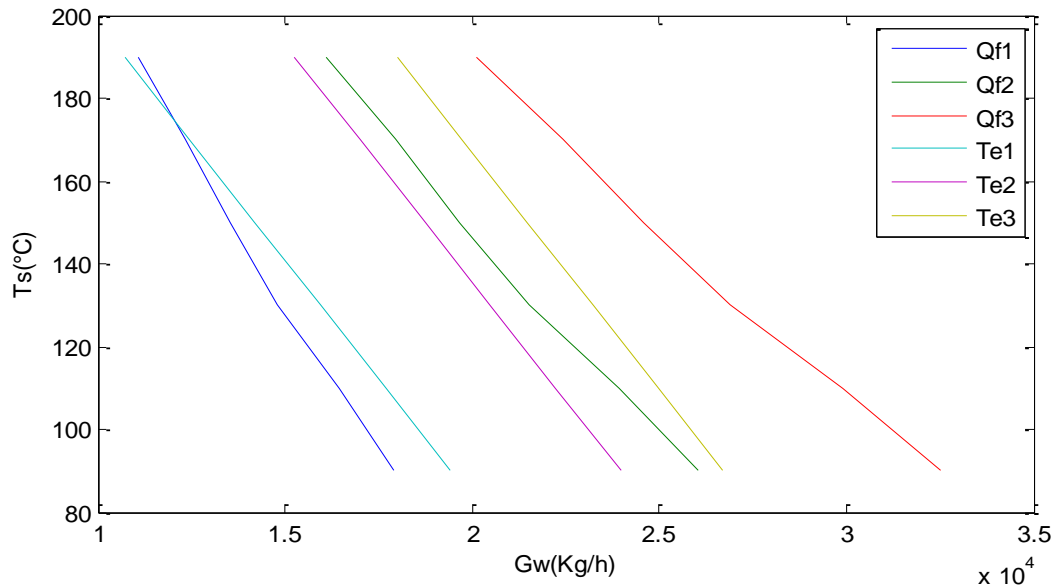
**Tableau 2** : Variation de la température de sortie en fonction de débit d'eau d'entrée et pour des températures d'entrée variable à l'entrée de la tour.

$T_s(^{\circ}\text{C})$	$G_w(\text{Kg/h})$		
	$T_{e1}=300^{\circ}\text{C}$	$T_{e2}=350^{\circ}\text{C}$	$T_{e3}=380^{\circ}\text{C}$
90	19433.19	23980.17	26708.35
110	17689.04	22236.02	24964.21
130	15944.98	20491.87	23206.10
150	14216.52	18747.72	21475.90
170	12456.60	17003.57	19731.75
190	10739.11	15259.42	17987.60



**Figure II.3** La température de sortie  $T_s$  en fonction de débit d'eau  $G_w$  pour une température d'entrée variable.

La figure ci-dessus, montre l'évolution de la température de sortie  $T_s$  en fonction de débit d'eau  $G_w$  pour des différentes températures d'entrées. D'après les résultats obtenues on remarque que la plage d'eau qui permet d'obtenir des températures de sortie  $T_s = 150^{\circ}\text{C}$  est de  $G_w = [14216.52 ; 21475.90]$  (Kg/h).



**Figure II.4** La température de sortie  $T_s$  en fonction de débit d'eau  $G_w$  pour un débit de fumée variable et une température d'entrée variable.

La figure ci-dessus montre l'évolution de la température de sortie  $T_s$  en fonction de débit d'eau  $G_w$  pour des différents débits de fumées et de températures d'entrées. D'après les résultats obtenus on remarque que la plage d'eau qui permet d'obtenir des températures de sorties  $T_s = 150^\circ\text{C}$  est de  $G_w = [13525.12 ; 24591.12]$  (Kg/h).

#### IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le bilan thermique de la tour de conditionnement des fumées, dont on a calculé le débit d'eau  $G_w$  à injecter dans la tour qui est l'entrée de ce système, pour les différents débits de fumées et les températures d'entrées.

La représentation graphique des résultats obtenus nous a permis de vérifier sa caractéristique statique. L'analyse de ces résultats montre que pour un fonctionnement de la tour à des températures avoisinantes les  $150^\circ\text{C}$  en sortie, la variation du débit d'eau nécessaire pour obtenir cette température est presque négligeable. A cet effet, l'élaboration d'un modèle pour la tour au tour de ce fonctionnement ( $150^\circ\text{C}$ ) s'avère possible.

Dans le chapitre suivant nous projetons d'établir un modèle dynamique de ce système en se basant sur l'identification.



# CHAPITRE III

# Elaboration d'un modèle pour la tour de conditionnement des fumées

## I. Introduction

Dans le cadre du contrôle d'un système industriel, une grande importance est accordée à l'identification du processus. En effet, pour procéder à la commande d'un système réel, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique qui le caractérise avec une bonne approximation mais qui doit être suffisamment simple pour faciliter son étude. Le modèle qu'on va obtenir sera élaboré à base de l'identification.

## II. Identification des procédés

Identifier un système consiste à proposer une structure entre son entrée et sa sortie et à déterminer à partir du couple entrée-sortie les valeurs des paramètres du modèle.

### III.2.1.Méthode du premier ordre avec retard [10]

L'allure de cette courbe de la figure III.1 est celle de la réponse indicielle d'un système du premier ordre :

Qui est sous la forme suivante :

$$G(p) = \frac{G_s}{\theta P + 1} e^{-\tau p} \quad (\text{III.1})$$

Pour déterminer les paramètres de modèle, on procède comme suit :

- Le gain statique est mesuré directement

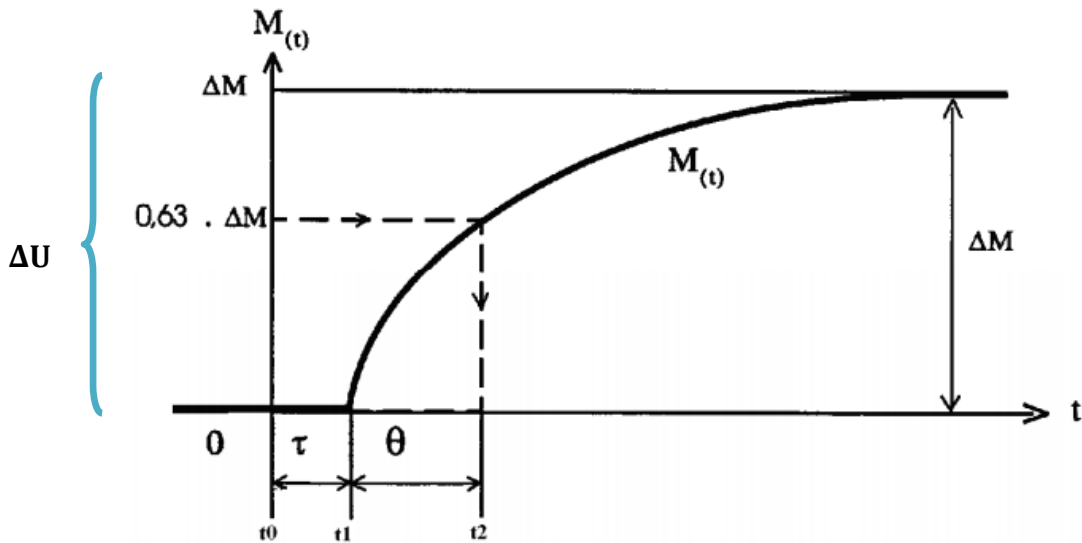
$$G_S = \frac{\Delta M}{\Delta U} \quad (\text{III.2})$$

- Pour déterminer la constante de temps  $\theta$  : On trace conjointement la droite d'ordonnée  $(0.63\Delta X)$  parallèle à l'axe des abscisses.

$$\theta = t_2 - t_1 \quad (\text{III.3})$$

- Le retard :

$$\tau = t_1 - t_0 \quad (III.4)$$



### III.2.2. La méthode de Broida [10]

La méthode d'identification empirique de Broida se base sur l'allure de la réponse indicielle du système en BO. En effet, dans le cas où cette réponse indicielle ressemble à l'allure de la courbe décrite dans la figure suivante.

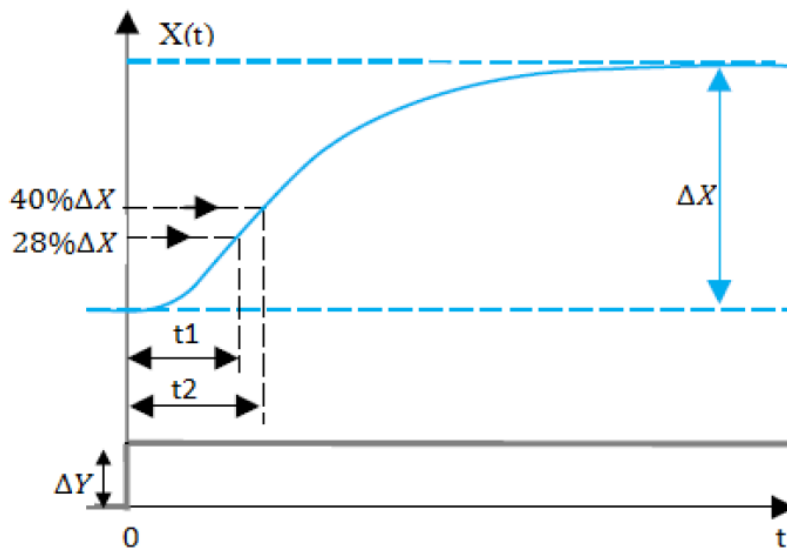


Figure III.2 : Courbe en 'S'analyse par la méthode de Broida

Broida approche le comportement du système par une fonction de transfert de la forme suivante :

$$H(p) = \frac{S(p)}{U(p)} = \frac{G_s}{\theta P+1} e^{-\tau p} \quad (III.5)$$

- Le gain statique ( $G_s$ )

$$G_s = \frac{\Delta X}{\Delta Y} \quad (III.6)$$

- La constant de temps( $\theta$ ):

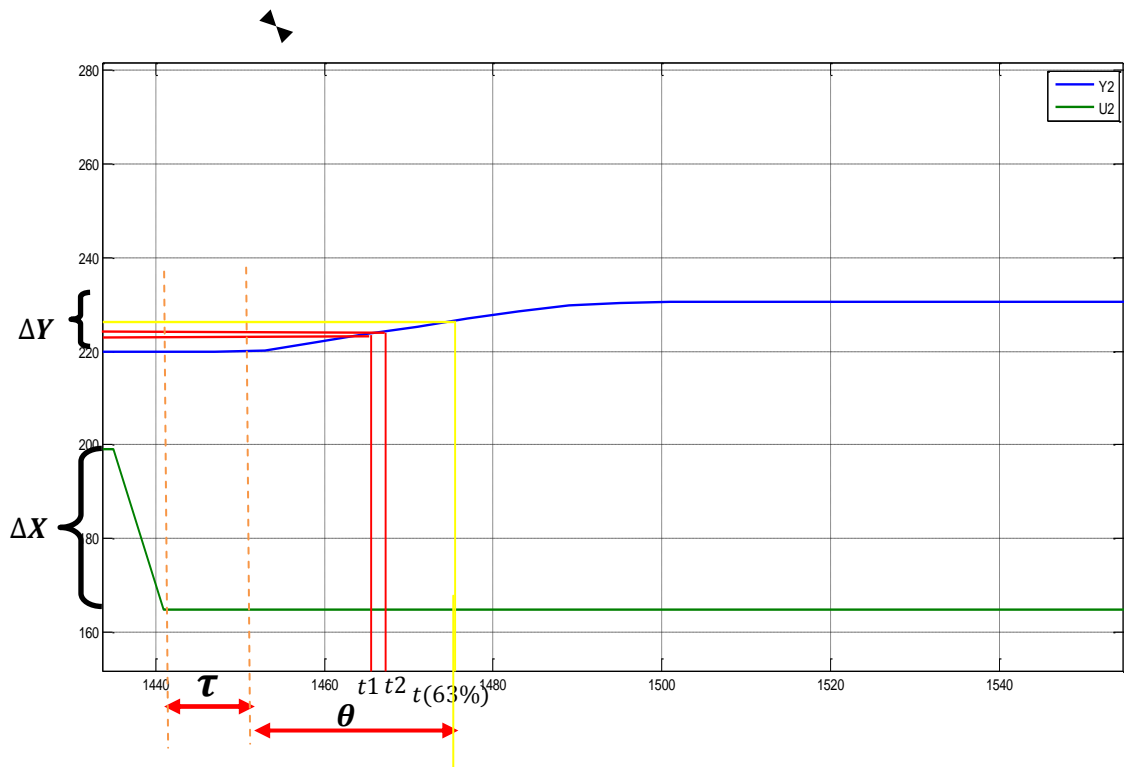
$$\theta = 5.5(t_2 - t_1) \quad (III.7)$$

- Le retard ou temps mort ( $\tau$ ) :

$$\tau = (2.8t_1 - 1.8t_2) \quad (III.8)$$

### III.2.3. Application des méthodes sites sur trois essais différents

**Test 1 :** Application des deux méthodes sur un premier essai de variation de débit d'eau à l'entrée de la tour et la variation de température à la sortie.



**Figure III.3** Réponse du système à une variation de débit d'eau à l'entrée de la tour

### ➤ Méthode de broida

On a:

$$G(p) = \frac{G_s}{\theta p + 1} e^{-\tau P}$$

$$t_1 = t_{28\%} = 18\text{s}$$

$$t_2 = t_{40\%} = 21\text{s}$$

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \text{ où } G_s = \left| \frac{230 - 220}{198 - 164} \right| = 0.29$$

$$G_s = 0.29$$

- La constante de temps ( $\theta$ ) :

$$\theta = 5.5 (t_2 - t_1)$$

$$\theta = 5.5 (21 - 18)$$

$$\theta = 16.5\text{s}$$

- Le retard ( $\tau$ ) :

$$\tau = (2.8t_1 - 1.8t_2)$$

$$\tau = (2.8 \times 18 - 1.8 \times 21)$$

$$\tau = 12.6\text{s}$$

On obtient le modèle suivant :

$$G_{11}(p) = \frac{0.29}{16.5p + 1} e^{-12.6P}$$

### ➤ Méthode du premier ordre

Le système est du premier ordre donc la fonction de transfert est sous la forme suivante

$$G(p) = \frac{G_s}{\theta p + 1} e^{-\tau P}$$

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$G_s = 0.29$$

- La constante de temps ( $\theta$ ) :

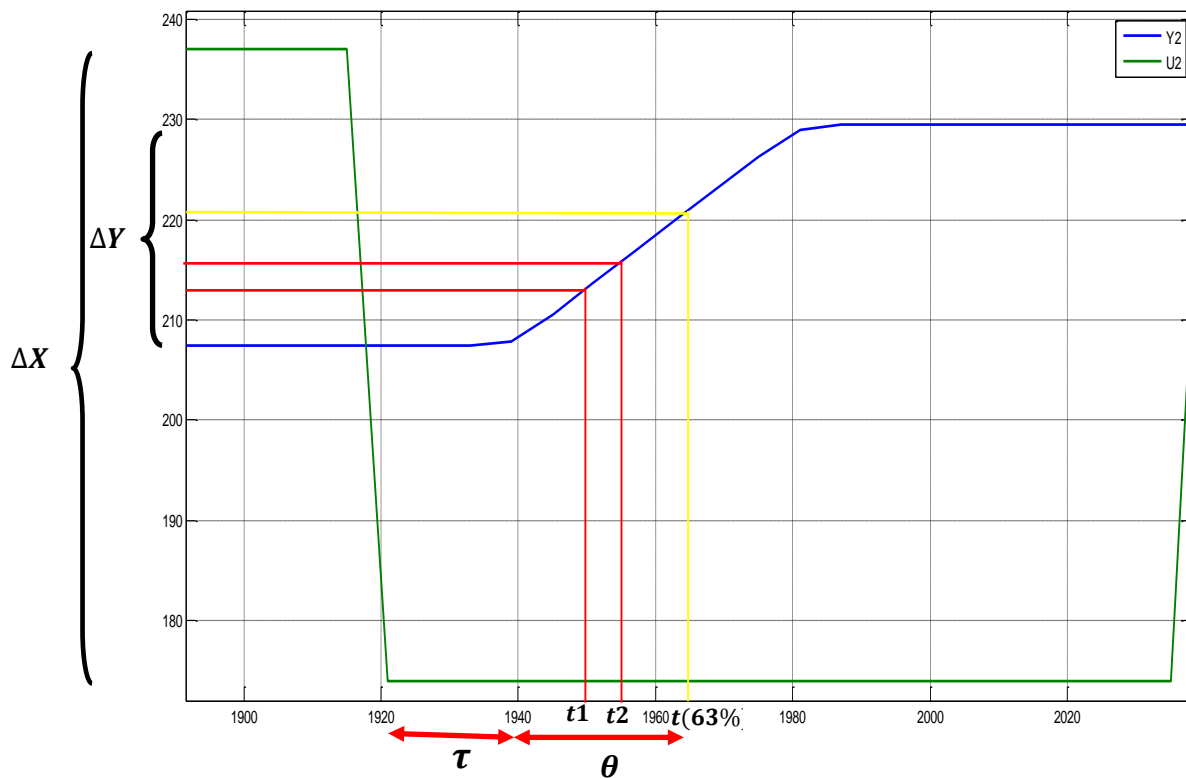
$$\theta = 26\text{s}$$

- Le retard ( $\tau$ ) :

$$\tau = 15\text{s}$$

On obtient le modèle suivant : 
$$G_{12}(p) = \frac{0.29}{26p+1} e^{-15P}$$

**Test 2 :** Application des deux méthodes sur la un deuxième essai de variation de débit d'eau à l'entrée de la tour et la variation de température à la sortie.



**Figure III.4** Réponse du système à une variation de débit d'eau à l'entrée de la tour

➤ **Méthode de broida**

$$t_{28\%} = 29s$$

$$t_{40\%} = 34s$$

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \text{ D'où } G_s = \left| \frac{229 - 207}{174 - 237} \right| = 0.34$$

$$G_s = 0.34$$

- La constante de temps ( $\theta$ ) :

$$\theta = 5.5 (t_2 - t_1)$$

$$\theta = 5.5 (34 - 29)$$

$$\theta = 27.5s$$

- Le retard( $\tau$ ) :

$$\tau = (2.8t_1 - 1.8t_2)$$

$$\tau = (2.8 \times 29 - 1.8 \times 34)$$

$$\tau = 20\text{s}$$

On obtient le modèle suivant :

$$G_{21}(p) = \frac{0.34}{27.5p+1} e^{-20P}$$

➤ **Méthode du premier ordre**

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$G_s = 0.34$$

- La constante de temps( $\theta$ ) :

$$\theta = 30\text{s}$$

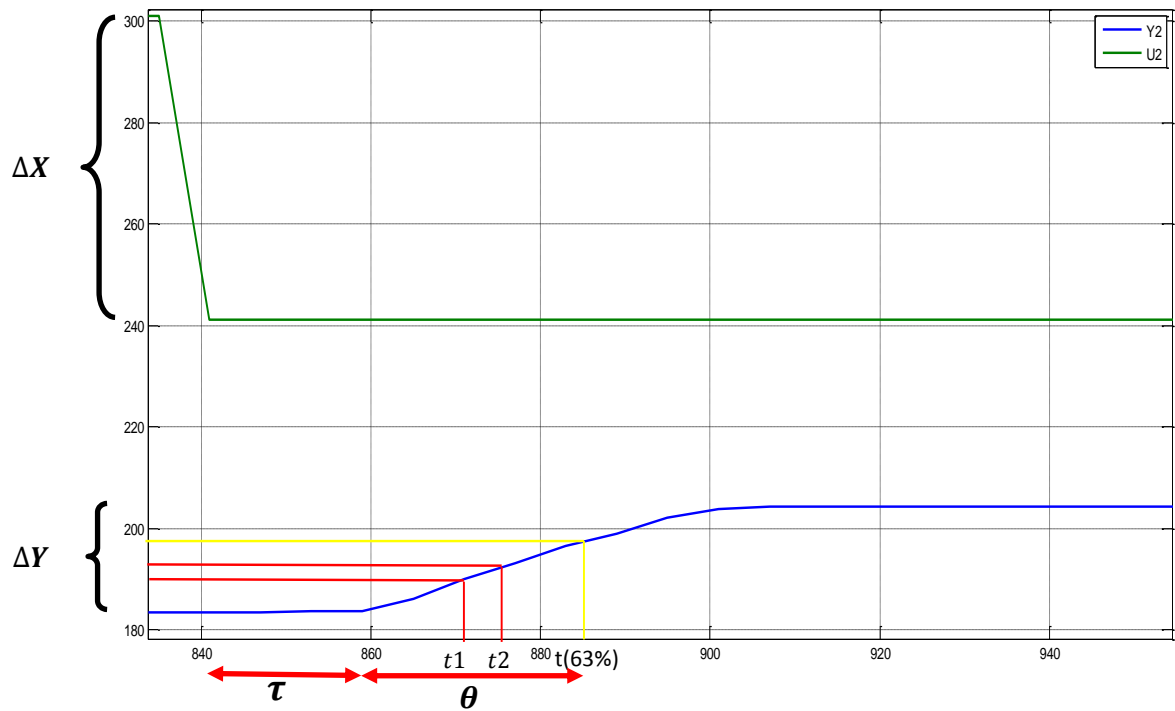
- Le retard( $\tau$ ) :

$$\tau = 14\text{s}$$

On obtient le modèle suivant :

$$G_{22}(p) = \frac{0.34}{30p+1} e^{-14P}$$

**Test 3 :** Application des deux méthodes sur la un troisième essai de variation de débit d'eau à l'entrée de la tour et la variation de température à la sortie.



**Figure III.5** Réponse du système à une variation de débit d'eau à l'entrée de la tour

➤ **Méthode de broida**

$$t_{28\%} = 30s$$

$$t_{40\%} = 34s$$

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \text{ D'où } G_s = \left| \frac{210 - 184}{241 - 301} \right| = 0.43$$

$$G_s = 0.43$$

- La constante de temps ( $\theta$ ) :

$$\theta = 5.5 (t_2 - t_1)$$

$$\theta = 5.5 (34 - 30)$$

$$\theta = 22s$$

- Le retard ( $\tau$ ) :

$$\tau = (2.8t_1 - 1.8t_2)$$

$$\tau = (2.8 \times 30 - 1.8 \times 34)$$

$$\tau = 22.8s$$

On obtient le modèle suivant :

$$G_{31}(p) = \frac{0.43}{22p+1} e^{-22.8P}$$

### ➤ Méthode de Broida

- Le gain statique ( $G_s$ ) :

$$G_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$G_s = 0.43$$

- La constante de temps ( $\theta$ ) :

$$\theta = 26s$$

- Le retard ( $\tau$ ) :

$$\tau = 18s$$

On obtient le modèle suivant :

$$G_{32}(p) = \frac{0.43}{26p+1} e^{-18P}$$

### ✚ Modèle finale de la méthode Broida

- Le gain statique ( $G_{m1}$ ) :

$$G_{m1} = \frac{0.29 + 0.34 + 0.43}{3}$$

$$G_{m1} = 0.35$$

- La constante de temps ( $\theta_{m1}$ ) :

$$\theta_{m1} = \frac{16.5 + 27.5 + 22}{3}$$

$$\theta_{m1} = 22s$$

- Le retard ( $\tau_{m1}$ ) :

$$\tau_{m1} = \frac{12.6 + 20 + 22.8}{3}$$
$$\tau_{m1} = 18.46s$$

Donc :

$$G_1(p) = \frac{0.35}{22p + 1} e^{-18.46P}$$

### ✚ Modèle finale de la méthode du premier ordre

- Le gain statique ( $G_{m2}$ ) :

$$G_{m2} = \frac{0.29 + 0.34 + 0.43}{3}$$

$$G_{m2} = 0.35$$

- La constante de temps ( $\theta_{m2}$ ) :

$$\theta_{m2} = \frac{(26 \times 2) + 30}{3}$$

$$\theta_{m2} = 27.33s$$

- Le retard( $\tau_{m2}$ ) :

$$\tau_{m2} = \frac{15 + 14 + 18}{3}$$

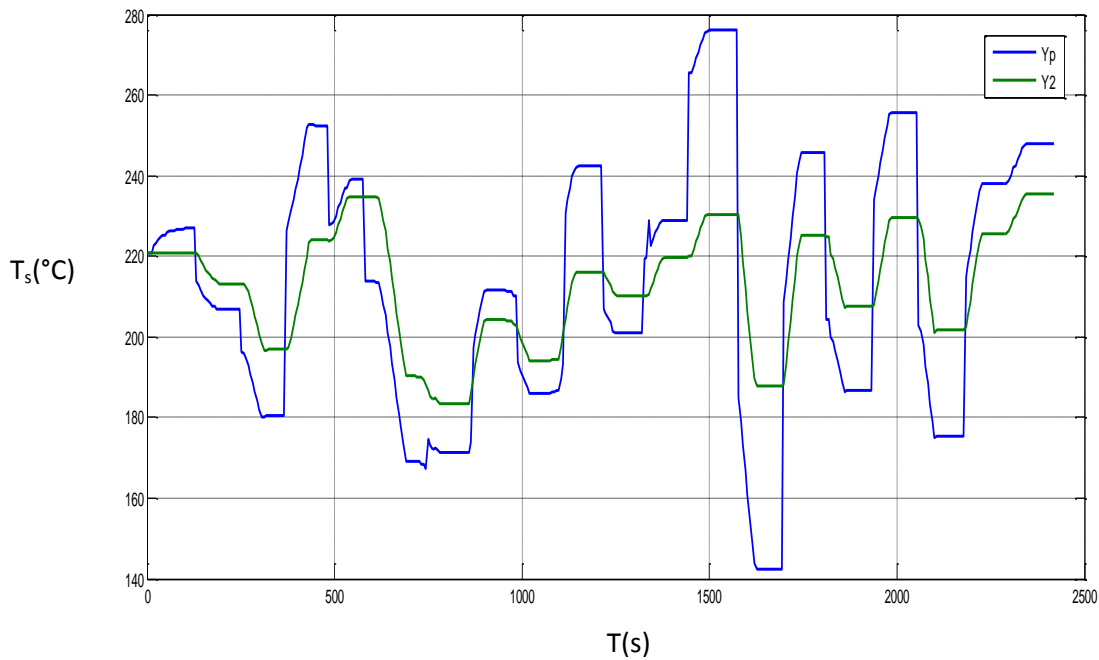
$$\tau_{m2} = 15.66s$$

Donc :

$$G_{m2}(p) = \frac{0.35}{27.33p + 1} e^{-15.66P}$$

D'après les résultats obtenus on choisit le modèle du premier ordre pour le tracer de la réponse du système  $Y_p(p)$ .

$$G_{m2}(p) = \frac{0.35}{27.33p + 1} e^{-15.66P}$$



**Figure III.6** ; comparaison entre la sortie réel et la sortie obtenue du système

On remarque que la réponse obtenue suit correctement la dynamique du système mais avec un écart important.

#### IV. Conclusion

Nous avons appliqué deux méthodes d'identification et nous avons obtenu six modèles pour la tour de conditionnement des fumées.

Les modèles obtenus nous a permis de conclure que les deux méthodes appliquées donnent des résultats très proches.

Néanmoins, la simulation de l'un des modèles comparées aux résultats expérimentaux, montre la limite de la méthode d'identification appliquée.

Nous pensons que pour un tel système, il faut faire appel à des méthodes plus avancées.

***Conclusion  
générale***

## Conclusion générale

---

L'identification occupe aujourd'hui une place importante dans la commande des procédés industriels. Nous nous sommes intéressés dans notre travail à l'étude dynamique du système de conditionnement des fumées dans un processus de fabrication du ciment.

Nous avons commencé par la présentation de la tour de conditionnement des fumées et la définition des différentes stratégies de control.

Ensuite, nous avons présenté le bilan thermique de la tour de conditionnement des fumées, et ceci nous a permis de vérifier sa caractéristique statique.

Enfin, notre étude est portée sur l'utilisation de deux méthodes d'identifications broida et la méthode du premier ordre, afin de déterminer les valeurs des paramètres du modèle.

Ce travail a été bénéfique pour nous car nous a permis d'exploiter les connaissances déjà acquise durant notre formation.

Nous espérons que nos efforts puissent servir à quelque chose et que ce mémoire soit un guide pour les promotions futures.

*Références  
bibliographique*

## Références bibliographiques

- [1] **Schioth M.** 1997, *Better control of cooling tower water injection of electrostatic precipitators*. Cements, Concretes, Plasters, Lime, N° 825-2, P 104-110.
- [2] **Berubre R.A.** *Effective temperature control for cement kiln off-gases*, Online Chemical Engineering Information, web site:.....
- [3] **Reigel S. A. and Doyle C. D.** 1974, *Evaporative Cooler*, United States Patent, N° 3842615, Oct. 22, 1974.
- [4] **Schwab J. J., Riley J. R.** 1999, *Automatic Gas Conditioning Method*, United States Patent, N° 592213, Jul. 13, 1999.
- [5] **Boukhemis Chetate , Cherif Kara, Galina Tcheremechko, Irina Merazka,** 1998, *Development of the industrial expert system and its application for the rational choice of crushing and grinding facilities of a cement factory (Développement du système expert industriel et son application pour le choix rationnel des installations de concassage et de broyage d'une cimenterie)*, Revue Internationale des Technologies Avancées, N°10, PP.49- 54,
- [6] **Boukhemis Chetate , Cherif Kara, Galina Tcheremechko, Irina Merazka,** 1995, *Application of the industrial expert system for the choice of the electric motors of the cement factory of Meftah, Algeria (Système expert industriel d'aide au choix des moteurs asynchrones en cimenterie)* , Ciments Betons Plâtres Chaux,, N°817-6/95, PP. 388-390.
- [7] **EnviroCare**, *MicroMist™ Engineered Systems – Enhanced Dust Collector Performance – Evaporative Gas Conditioning*, Manuel d'utilisation des tour de conditionnement.
- [8] **BIPROMET**, *Les tours d'évaporation d'eau (WIEŻE SCHŁADZAJĄCE PEŁNEGO ODPAROVANIA)*, Manuel d'utilisation des tour de conditionnement. BIPROMET, KATOWICE, POLOGNE.
- [9] **PROUVOST.P**, « Automatique contrôle et régulation ». Edition Dunod, 2004.
- [10] **PROUVOST.P** « Instrumentation et régulation en 30 fiches » Edition Dunod, Paris, 2010.