
Année Universitaire : 2014-2015

**Master Sciences et Techniques GMP
Génie des Matériaux et des Procédés**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques**

**Optimisation du volume des gaz chauds dans la ligne
de cuisson de la cimenterie HOLCIM Fès**

Présenté par:

CHLIF Nisrine

Encadré par:

- Mme Ouafae SQALLI (FST Fès)
- Mr. RAHAT Khalil (HOLCIM Fès)

Soutenu Le 25 Juin 2015 devant le jury composé de:

- Mme O.SQALLI (FST Fès)
- Mr K. MISBAHI (FST Fès)
- Mr EL.EL GHADRAOUI (FST Fès)

Stage effectué à : HOLCIM Fès



Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce travail à toutes les personnes qui ont marqué ma vie :

- *À mes parents :*

Deux personnes qui m'ont tous données sans compter pour le soutien et les encouragements inconditionnels sans oublier les sacrifices moraux qu'ils ont consacrés. J'espère que j'ai été à la hauteur de leurs espérances.

À ma sœur et mon frère :

En témoignage des liens solides et intimes qui nous unissent tout en vous souhaitant un avenir plein de succès et de bonheur.

À tous les enseignants :

Qui n'ont jamais été avares ni par leurs temps, ni leurs connaissances pour satisfaire nos interrogations veuillez trouver dans ce travail, l'expression de ma profonde reconnaissance et ma grande estime.

À mes amis :

Tous mes amis et collègues et particulièrement les plus intimes en témoignage des moments inoubliables, des sentiments purs, et des liens solides qui nous unissent.

Veuillez accepter nos meilleurs vœux de réussite et de prospérité.

Remerciement

*C'est avec gratitude que tiens à remercier Madame **SQALLI OUAFAE** pour son grand effort qu'il a fourni à fin de me donner le meilleur.*

*Le remercie particulièrement mon encadrant Monsieur **RAHAT KHALIL** pour son aide précieuse.*

*Mes remerciements les plus vifs à l'égard de tout le personnel de la société **HOLCIM Ras El Ma** et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

*Je tiens aussi à remercier Monsieur le Pr. **MISBAHI KHALID** Et Monsieur le Pr **EL GHADRAOUI EL Houssine** d'avoir accepté de juger mon travail.*

Je remercie également l'ensemble du corps professionnel du département de chimie de la faculté sciences et technique de Fès, d'avoir veillé à notre formation.

Liste des abréviations

C₃A : alumine tricalcique

C₄AF : Aluminoferrite tétracalcique ou ferrite, composant principale du clinker qui a tendance à noircir le ciment.

CaCO₃ : Carbonate de calcium est le composant principal du calaire.

CaO : Oxyde de calcium, largement connu par la chaux, est un composant majeur du clinker.

CIMA : Ciment Maroc

CIOR : Ciment Orientale

Clinker : est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80% de calcaire et de 20% des argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer.

CPA : Ciment Portland artificiel

CPJ : Ciment Portland avec ajout des constituants secondaires

C₂S : Silicate bi-calcique

C₃S : Silicate tricalcique

Dilution à air : refroidissement des gaz par l'air frais.

f : facteur de friction

Middle air : gaine de gaz médiane.

MPa : c'est le méga pascal est une unité utilisée pour la mesure de haute pression.

ODI : Office de développement Industriel

PGNAA : Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

Ventilateur relai : ventilateur intermédiaire entre le broyeur et le filtre à manche.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Type de ciment fabriqué par HOLCIM Fès	4
Tableau 2 : Température des gaz chauds	14
Tableau 3: Données techniques de ventilateur final.....	23
Tableau 4 : Mesure de la pression totale au mode direct	24
Tableau 5: Mesure de la pression totale au mode composé	24
Tableau 6 : Mesure de débit volumique des gaz chauds et sa valeur limite	25
Tableau 7 : Mesure de la vitesse de rotation de ventilateur et sa valeur limite.....	26
Tableau 8 : Mesure de la température des gaz chauds et sa valeur limite.....	27
Tableau 9 : Puissance de ventilateur en deux modes	28
Tableau 10 : Capacité de ventilateur en deux modes	29
Tableau 11 : Vitesse des gaz chauds	34
Tableau 12 : Section des conduites de la ligne de cuisson.....	34
Tableau 13 : Débit des gaz chauds	35
Tableau 14 : Composition des fumées	35
Tableau 15 : Chaleur spécifique des constituants des fumées	38
Tableau 16 : Paramètres relatif à la vapeur saturée de l'eau	38
Tableau 17 : principaux résultats	44
Tableau 18 : Tranches horaires de fonctionnement des ateliers et les tarifs de ventes	45

Liste des figures

Figure 1 : Organisme générale de HOLCIM Fès	4
Figure 2 : Composition du ciment.....	5

Figure 3 : Extraction et concassage.....	6
Figure 4 : Broyeur cru	7
Figure 5 : Ligne de cuisson	7
Figure 6 : Refroidisseur à grilles	8
Figure 7 : Circuit de fabrication du ciment	9
Figure 8 : Les zones de refroidisseur à grilles.....	12
Figure 9 : Répartition du gaz de refroidissement	13
Figure 10 : Circulation des gaz dans le four.....	13
Figure 11 : Circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson	14
Figure 12 : Tirage et évacuation des gaz chauds.....	15
Figure 13 : Circulation des gaz chauds au mode composé	16
Figure 14 : Diagramme d'ICHIKAWA pour le ventilateur final.....	21
Figure 15 : Ventilateur centrifuge	21

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil et description du processus de fabrication du ciment

I. Présentation	3
II. organigramme de HOLCIM Fès	3
III. Les types de ciments produits par HOLCIM Fès	4
IV. Procédé de fabrication de ciment	5
1. Extraction	5
2. Concassage	6
3. Pré-homogénéisation	6
4. Broyage des matières premières pour la préparation du Cru	6
5. Production et stockage de clinker	7
6. Stockage et expédition	9
V. Conclusion	9

Chapitre II : Circuit des gaz chauds récupérés au refroidisseur à grilles

I. Introduction	11
II. Description du circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson	11
1. Mode directe	12
2. Mode composé	15
III. Conclusion	16

Chapitre III : Etude de ventilateur de tirage cheminé

I. Problématique	18
II. Outils d'analyse	18
1. Le QQOQCP	18
2. Diagramme d'Ishikawa : diagramme de causes et effets	20
III. Ventilateur final	21
1. Constituant de ventilateur final	22
2. Données techniques	22
3. Relevé des mesures	23
IV. Conclusion	30

Chapitre IV : Refroidissement des gaz chauds par pulvérisation de l'eau

I. Introduction	33
II. Refroidissement par pulvérisation d'eau	33

1. Définition de la pulvérisation	33
2. Les types de pulvérisateurs.....	33
3. Positionnement de système de pulvérisation	34
4. Calcul des paramètres relatifs au gaz à refroidir	34
5. Calcul des paramètres relatifs à l'eau de pulvérisation	37
III. Refroidissement des gaz par l'air frais.....	40
1. Calcul de débit de l'air de refroidissement.....	40
2. Le pourcentage d'ouvrage du registre	41
IV. Résultats finals des paramètres de ventilateur	41
1. Débit total aspiré par ventilateur final	41
2. Puissance aéraulique.....	41
3. Puissance absorbée par le ventilateur final	44
4. Interprétation des résultats	44
5. Le gain relatif à la diminution de la puissance de ventilateur	46
V. Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	48

Introduction générale

L'industrie cimentière s'est engagée au cours de ces dernières années dans l'important investissement de telle sorte à augmenter et diversifier la production afin de satisfaire la demande croissante du marché. Pour répondre à cette demande qui est en augmentation continue, il est indispensable de maîtriser le processus de fabrication du ciment, et d'adopter les nouvelles technologies dans ce domaine pour mieux se positionner dans un marché en perpétuelle concurrence.

Comme toute entreprise, HOLCIM cherche toujours à augmenter sans cesse son efficacité tout en minimisant les coûts de la production. Dans la plupart des entreprises industrielles notamment HOLCIM, les ennemis les plus redoutables sont les arrêts, et le gaspillage. En effet, puisque les centres de production sont inter reliés entre eux, une panne dans une des installations, peut engendrer l'arrêt de toute la ligne de production.

Dans ce monde secoué par la crise énergétique et face à l'offre insuffisante par rapport à la demande accrue de nos pays, il importe que toutes les entreprises puissent procéder à une bonne maîtrise de leur consommation énergétique soit électrique ou thermique.

La société HOLCIM Fès cherche toujours à optimiser les conditions de fonctionnement de leurs équipes respectives assurant ainsi un rendement optimal pour cette dernière. C'est la raison sur laquelle est basé le choix de ce sujet intitulé optimisation du volume des gaz chauds dans la ligne de cuisson de la cimenterie HOLCIM Fès.

Cette optimisation de volume des gaz concerne la circulation des fumées au mode direct, où le broyeur cru est en arrêt et la température des fumées est très élevée, d'où la nécessité d'un système de refroidissement des gaz avant sa filtration, afin de les s'aspirer par le ventilateur de tirage cheminé. Ce ventilateur est considéré comme le véritable poumon de l'installation de la ligne de cuisson.

Notre travail s'articule sur quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous allons présenter l'organisme d'accueil de la société et le procédé de fabrication du ciment.
- Le deuxième chapitre décrit le circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson.
- Le troisième chapitre comporte une présentation de la problématique du sujet et l'étude du ventilateur de tirage cheminé.
- Le quatrième chapitre présente la solution proposée pour minimiser le volume des gaz chauds à évacuer.

Chapitre I

Présentation de l'organisme d'accueil et description du processus de fabrication du ciment

I. Présentation

HOLCIM (Maroc), HOL : rappelle les origines du groupe (le village HOLDERBANK) et CIM : symbolise l'activité du ciment. HOLCIM a été créée en 1976 par l'office du développement industriel (ODI) avec le concours de la banque Islamique sous le nom de CIOR(les Ciments de l'Oriental). Sa première cimenterie a été construite à Oujda et elle a démarré en 1979 avec une capacité de production de 1.2 millions de tonnes par ans.

En 1993, HOLCIM (Maroc) a mis en service sa deuxième cimenterie à Ras El Ma dans la région de Fès, lieu de mon stage, avec une capacité de production de 600000 T/ans pour répondre aux besoins croissants du marché national. En outre, deux centres de broyage et de distribution ont été ouverts à Fès et à Casablanca dont la capacité totale est de 800000 T/ans.

Le 15 Avril 2002 CIOR devient HOLCIM (Maroc), ce changement affirme son apparence au groupe International HOLCIM, Groupe suisse leader dans le domaine de fabrication du ciment, du béton et du granulat. La nouvelle vision adoptée par la société permet de tenir ses engagements vis-à-vis de ses clients, de développer le système de formation de ses collaborations et de prendre en considération les problèmes liés à l'environnement.

II. organigramme de HOLCIM Fès

L'organisation opérationnelle de HOLCIM (Maroc) repose sur un comité de direction, présidé par Monsieur Dominique Drouet, dont le rôle est de coordonner l'action de l'ensemble des directions de la Société. Dans un souci d'efficacité fonctionnelle l'ensemble des processus et des tâches à accomplir sont répartis en catégories associées chacune à un service.

La figure 1 présente l'organigramme de la société HOLCIM Fès :

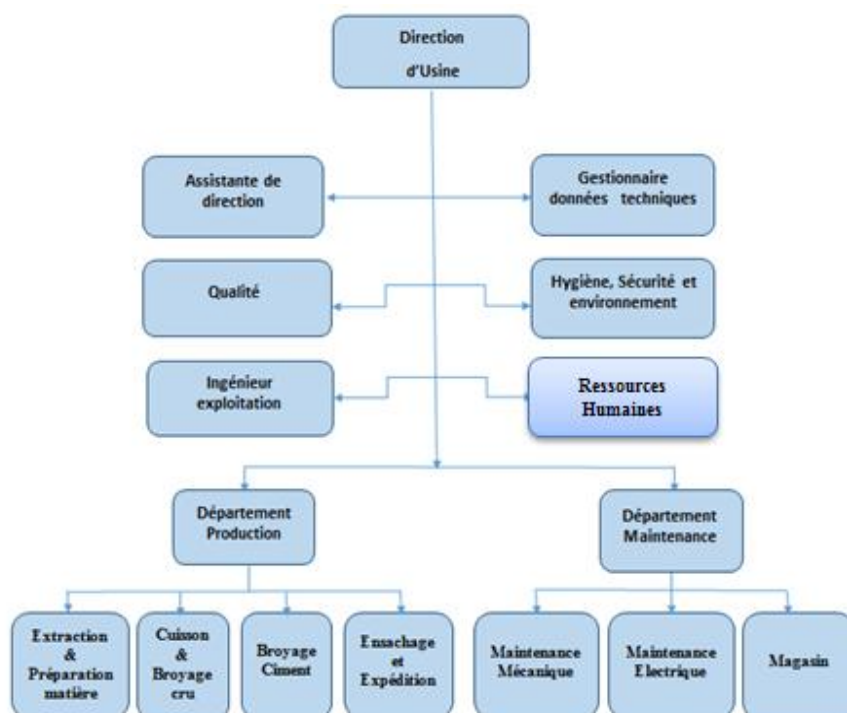


Figure 1 : Organisme générale de HOLCIM Fès

III. Les types de ciments produits par HOLCIM Fès

La société HOLCIM commercialise un produit semi-fini (clinker) et une gamme de ciment adaptée présentée sous forme de tableau 1 :

<u>Produits</u>	<u>Description</u>
CPJ 35	Ciment Portland composé dont les principaux constituants sont le clinker, le filler et le gypse, il est utilisable dans le domaine routier pour la stabilisation des sols et des couches de chaussées.
CPJ 45	Ciment Portland composé dont les constituants principaux sont le clinker, le filler et le gypse. La classe de résistance de 45MPa lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistances mécaniques élevées.
CPA 55	Ciment Portland artificiel composé de clinker et de gypse. La classe de résistance de 55MPa et les résistances élevées du CPA 55 lui confèrent l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés sollicités, les bétons précontraints et les bétons à haute performance.

Tableau 1 : Type de ciment fabriqué par HOLCIM Fès

IV. Procédé de fabrication de ciment

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est à dire une matière inorganique finement moulue qui gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction d'hydratation.

Le ciment est généralement fabriqué en cuisson vers 1450°C des mélanges de calcaire, d'argile et minéral de fer. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment de type Portland.

L'obtention du ciment peut se schématiser comme la figure 2 montre :



Figure 2 : Composition du ciment [1]

1. Extraction

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières qui subissent des transformations pour fabriquer le produit fini. Le ciment est fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer. Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, d'argiles, de schistes, de minéral de fer et de sable.

Constituant la matière première principale, le calcaire, les argiles et les schistes sont extraites dans des carrières situées dans les régions de l'usine.

Le minéral de fer et le sable sont des matières de correction, ils sont exploités dans des carrières relativement éloignées de l'usine ou livrés par des fournisseurs.

2. Concassage

Le concasseur consiste à réduire la dimension des blocs extraits (calcaire et argile) de 1.3m jusqu'à 80mm à la sortie (la figure3). Cela dans le but d'optimiser et de faciliter le stockage et la manutention des matières premières.

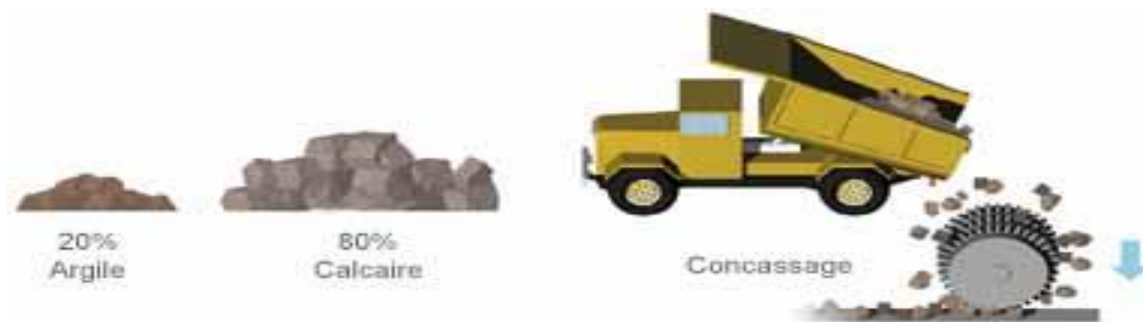


Figure 3 : Extraction et concassage [2]

3. Pré-homogénéisation

Le mélange (calcaire + argile), le schiste, le minerai de fer et l'alumine, concassés alimentent une «sauterelle» située juste à la sortie du concasseur par un transporteur à courroie permettant ainsi de les stocker séparément dans des trémies.

La pré-homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine.

Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières, «Analyse et corrigé par le PGNAA et validé par le chimiste» ce mélange est dénommé le cru.

4. Broyage des matières premières pour la préparation du Cru

Le broyage des matières est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. A l'intérieur du broyeur cru, la matière subit des actions mécaniques par quatre galets qui écrasent les morceaux sur une assiette pour l'obtention de la farine.

Lorsque ce point est atteint, le ventilateur relai tire les gaz contenant la farine. Celle-ci passe par un séparateur, sorte de filtre, qui ne fait passer que de la matière suffisamment broyée. La farine est stockée (figure 4) dans le silo d'homogénéisation.

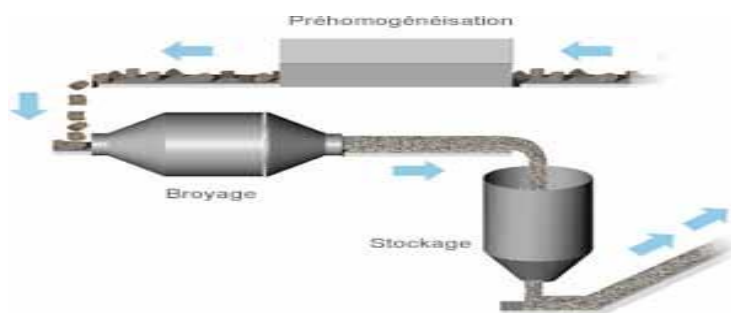


Figure 4 : Broyeur cru [3]

5. Production et stockage de clinker

La ligne de cuisson comprend (figure 5) :

- Deux tours de préchauffage à cinq étages.
- Un four rotatif.
- Un refroidisseur à grilles.

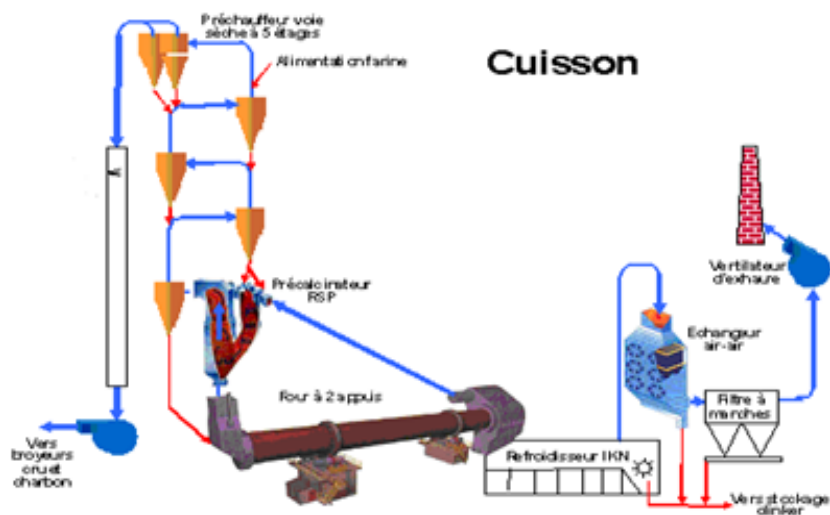


Figure 5 : Ligne de cuisson [4]

a. Tours de Préchauffage

Le préchauffage est une étape incontournable qui permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à déshydrater et décarbonater partiellement la matière crue en réutilisant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gaz sortant du four.

La farine homogénéisée est introduite dans les sommets des deux tours de préchauffage à cyclones à l'aide d'un élévateur à godets. Elle circule par gravité à contre-courant avec les gaz chauds ascendants du four le long des deux tours DOPOL.

b. Four Rotatif

Le four est une grande enceinte circulaire rotative dans laquelle on injecte le combustible sous pression pour produire une flamme. Il permet un échange de chaleur à contre-courant entre la farine et la chaleur cédée par la flamme et les gaz récupérés du refroidisseur.

La farine tombée dans le four rotatif légèrement incliné (pente de 3%) et qui tourne sur lui-même avec une vitesse de 5 tr/min de capacité 1800 t/j. La cuisson se fait à une température voisine de 1450°C. Suite à des réactions chimiques (annexe 1) qui se produisent à l'intérieur du four, la farine va se transformer au clinker que l'on doit faire refroidir.

c. Refroidisseur

Le refroidissement du clinker se fait à l'aide de huit ventilateurs latéraux (figure 6), possède deux grilles équipé d'un concasseur rouleaux.

Le rôle de refroidisseur consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure métallurgique et des dimensions des cristaux favorables. Il permet aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage dans le silo de stockage.

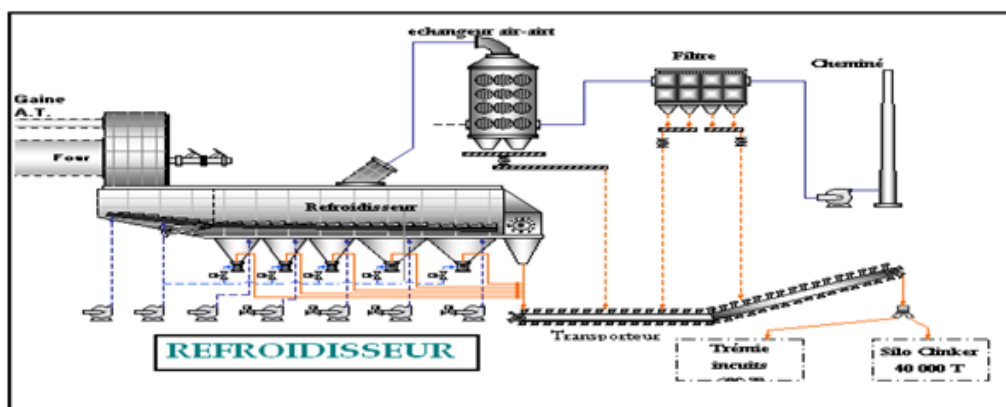


Figure 6 : Refroidisseur à grilles [5]

d. Broyage du ciment

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 à 40 mm environ. Brusquement refroidi, puis finement broyé avec addition du gypse (2 à 5%) pour régulariser la prise donnant le ciment.

Un broyeur à boulets d'un débit de 25 t/h et un autre broyeur vertical d'un débit de 115t/h assurent le broyage à partir d'un mélange de clinker, gypse, calcaire, pouzzolane et cendres volantes.

Le ciment est transféré par voies pneumatique et mécanique vers des silos de stockage de plusieurs milliers de tonnes.

6. Stockage et expédition

- *Ensachage :*

L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de supprimeurs au niveau des silos de stockage. Le ciment est ensuite transporté par des aéroglisseurs et des élévateurs puis passe par des cribles pour l'élimination des corps étrangers.

- *Expédition :*

L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50kg et en vrac soit par route ou par voie ferrée. Le chargement des camions en sacs se fait manuellement. Le chargement des wagons en sac est assuré par des chargeurs de wagons.

V. Conclusion

HOLCIM Fès est une cimenterie dotée d'un processus complet d'une capacité de 1400 tonnes de clinker par jour. Ce processus prend sa source depuis l'exploitation minière jusqu'à l'ensachage expédition en passant par la ligne de cuisson et le broyeur ciment.

En résumé, la fabrication du ciment est schématisée selon le circuit présenté dans la figure 7 :

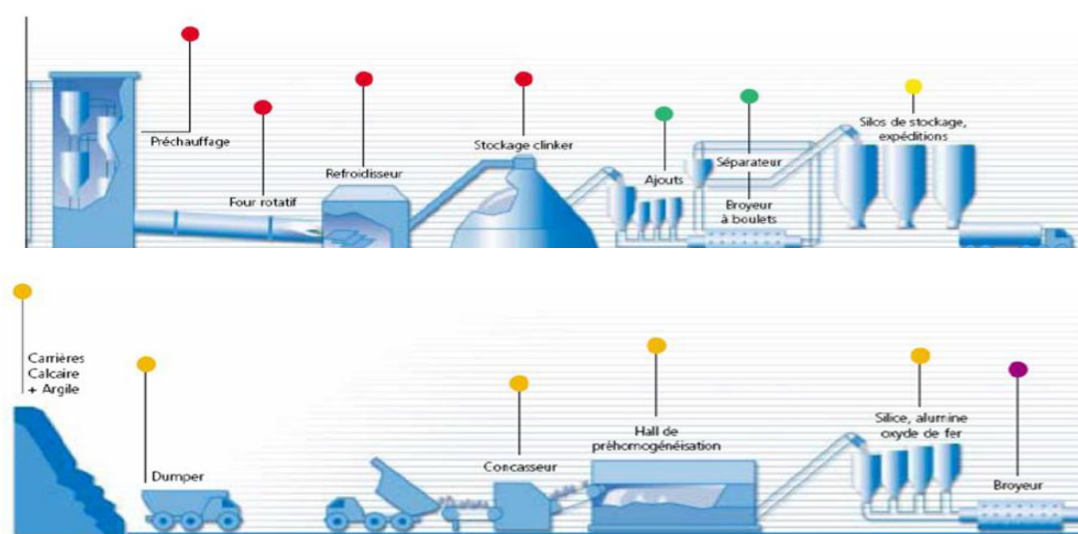


Figure 7 : Circuit de fabrication du ciment [6]

Cette société cherche toujours à optimiser les conditions énergétiques de son procédé de fabrication à fin de diminuer la consommation énergétique qui est synonyme de gain de profit pour l'entreprise. Parmi ces optimisations on trouve la récupération des gaz chauds sortant du refroidisseur du clinker pour exploiter sa chaleur aux plusieurs postes de la ligne de cuisson.

Chapitre II

Circuit des gaz chauds récupérés au refroidisseur à grilles

I. Introduction

L'industrie cimenterie est une grosse consommatrice d'énergie thermique et électrique dont les coûts au niveau mondial sont en constante augmentation.

Ces récentes années, la cimenterie HOLCIM Fès a fait d'importants efforts pour réduire cette consommation et alléger les coûts de production avec des équipements moins énergivores.

Parmi les projets que la société fait pour optimiser la consommation thermique, on trouve la récupération des gaz chauds du refroidisseur du clinker pour le séchage de la matière première au niveau du broyeur cru, avant d'être dépoussiérés dans le filtre à manches.

Cette récupération se fait seulement au cas où le broyeur cru est en marche, car la société est à deux modes de circulation des gaz chauds :

- Mode direct : où le broyeur est en arrêt, et les gaz chauds passe directement du four vers le filtre à manches.
- Mode composé : c'est le mode normale de la ligne de production, où le four et le broyeur cru sont tous les deux en marche.

Donc, dans ce chapitre on va voir le parcours des gaz chauds circulant dans la ligne de cuisson depuis sa récupération au niveau de refroidisseur de clinker jusqu'à son évacuation par la cheminée.

II. Description du circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson

La cimenterie de HOLCIM Fès, dispose d'une ligne de production du ciment. Le procédé de fabrication repose sur la voie sèche qui est la plus rentable et plus optimale au niveau énergétique. Le développement de ce dernier s'est fait dans les années 1960 à l'initiative de la société KHD d'Allemagne qui est une étape décisive dans l'amélioration des performances par la récupération de la chaleur des fumées.

Par ailleurs, ce procédé a permis d'atteindre les avantages suivants :

- Récupération optimale de la chaleur,
- Faible consommation thermique,
- Grande facilité de conduite.

Le circuit de la récupération des gaz chauds est présenté par la société selon deux modes (direct et composé), pour les raisons suivantes :

- La première est d'un point de vue économique, où le broyeur va s'arrêter dans les heures de pointes où les tarifs de vente sont élevés.
- La deuxième raison c'est que la capacité de silo de stockage de la matière broyée est limitée.

1. Mode directe

La récupération de l'énergie thermique libérée par le clinker sortant du four tournant se fait grâce au refroidisseur à grilles jouant le rôle d'un échangeur de chaleur, qui fonctionne selon le principe du courant transversal, c'est-à-dire que la matière traverse horizontalement le refroidisseur tandis que l'air est soufflé verticalement.

Huit ventilateurs fournissent l'air de refroidissement nécessaire à l'obtention de la température finale désirée, chaque chambre est soufflée de l'air frais de l'extérieur par son ventilateur.

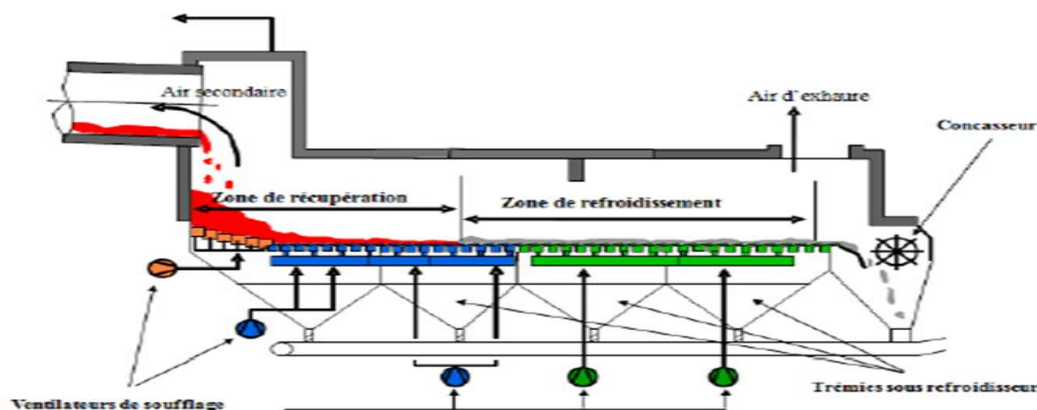


Figure 7 : Les zones de refroidisseur à grilles

Ce schéma de refroidisseur présente deux zones (figure 8) :

- ✚ La zone de refroidissement : assure le refroidissement optimale du clinker et aussi réduire l'impact chaleur sur les processus suivants (transport de clinker et broyage de ciment).
- ✚ La zone de récupération : Permet la récupération des calories pour minimiser la consommation thermique et obtenir la température d'air de combustion, qui doivent être recyclées au four grâce aux petites chambres de soufflages.

Le refroidissement brusque du clinker sortant du four de cuisson permet le réchauffement de l'air ambiant de soufflage qui va se diviser selon divers processus (figure 9) :

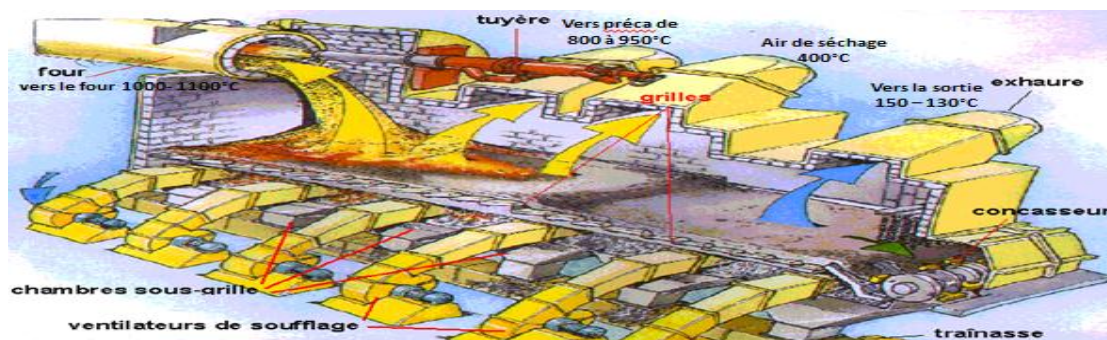


Figure 8 : Répartition du gaz de refroidissement

L'air secondaire : L'air récupéré dans la première partie de la grille sert comme air secondaire de combustion pour le four. Il pénètre par la zone du capot de chauffe, réglé par le registre des gaz.

Le mélange de l'air secondaire et l'air primaire provient des deux suppresseurs permettant une combustion immédiate du combustible qui est le coke de pétrole. La flamme résultante se trouve à l'extrémité plus basse du four (figure 9), ainsi que la matière est introduite à l'autre extrémité, et avance lentement sous l'effet de la rotation et l'inclinaison de ce dernier.

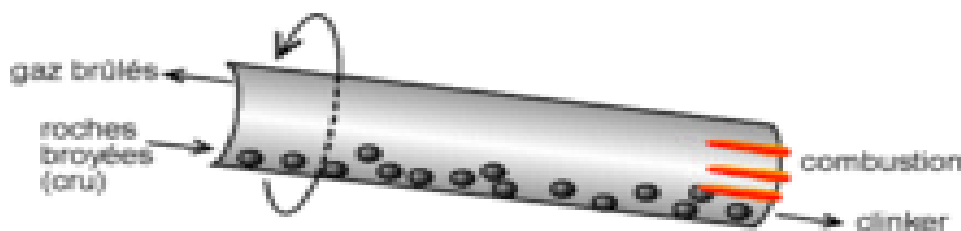


Figure 9 : Circulation des gaz dans le four[7]

Au fur et à mesure de l'avancement de la matière, des réactions chimiques (décarbonatation et clinkérisation) se produisent à haute température s'accompagnant par une libération des gaz pour qu'ils traversent par la suite le four à contre-courant avec la matière, afin de s'évacuer au niveau de pré-calciateur disposé en bas des deux tours.

L'air tertiaire : C'est l'air provenant de la deuxième grille, en traversant une conduite vers le pré-calciateur qui représente le brûleur secondaire de la société, conçu pour mélanger le combustible et l'air tertiaire ainsi que les gaz chauds ascendant du four. La température des gaz à ce point (pré-calciateur) est élevée varie entre 870 à 900°C, favorisant la calcination et la décarbonatation partielle de la matière.

Une ligne de préchauffage est située en haut de pré-calciateur, constitué de deux tours où se réalise le préchauffage, permettant de préparer la farine du point de vue thermique et chimique.

Le courant d'air circulant à contre-courant avec la matière, assurant le chauffage progressif de cette dernière, cet échange se déroule au niveau de plusieurs étages de cyclones (figure11). Chaque cyclone recevant des gaz provenant de l'étage inférieur chargé de la matière récupérée à l'étage supérieur, l'échange thermique s'accompagne des effets suivant:

- Entre 100 et 250°C : élimination de l'eau adsorbée.
- Entre 250 et 750°C : élimination de l'eau chimiquement liée.
- Au-delà de 750°C : décarbonatation partielle de la farine.

Le courant d'air qui passe à la fois dans le four, le pré-calcinateur et les deux tours est contrôlé par deux ventilateurs DOPOL.

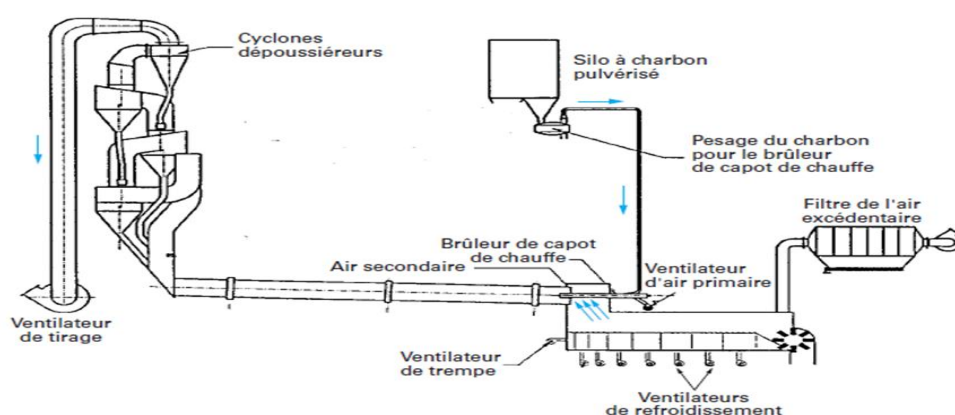


Figure 10 : Circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson

Les gaz chauds aspirés en tête des deux tours se mélangent avec une autre partie de l'air refroidi qui s'appelle l'air de middle air afin de diminuer la température final des gaz.

Le tableau 2 présente la température de chaque gaz de la ligne de cuisson :

Type de gaz	Température °C
Gaz de DOPOL 1	320
Gaz de DOPOL 2	300
Air de middle air	100

Tableau 2 : Température des gaz chauds

Après la rencontre de tous ces gaz dans une conduite principale, la température du mélange gazeux à ce point-là est de 240°C, elle est mesurée par un capteur de température thermocouple. Cette température est encore élevée ce qui présente un risque sur les manches de filtre cru, qui représente la dernière étape dans le circuit avant l'évacuation des gaz vers l'extérieur.

Pour protéger ce dernier contre toute défaillance éventuelle, suite à une température élevée ($>205^{\circ}\text{C}$), les gaz chauds passent tout d'abord dans une conduite où se trouve une tour de refroidissement qui est constituée par un registre de l'air frais assurant la régulation du courant de l'air afin de diminuer la température des fumées pour que les conditions de l'épuration de cet aéroforme poussiéreux soit disponible.

L'opérateur de la salle de contrôle donne toujours une consigne d'ouvrage de registre de l'air de refroidissement à 100%, car la température moyenne des fumées dépasse la température maximale de filtre à manches.

Un ventilateur final est situé en aval de filtre cru (figure 11), aspire les gaz préalablement refroidies et traités pour les rejeter par la suite dans l'atmosphère à travers la cheminée.

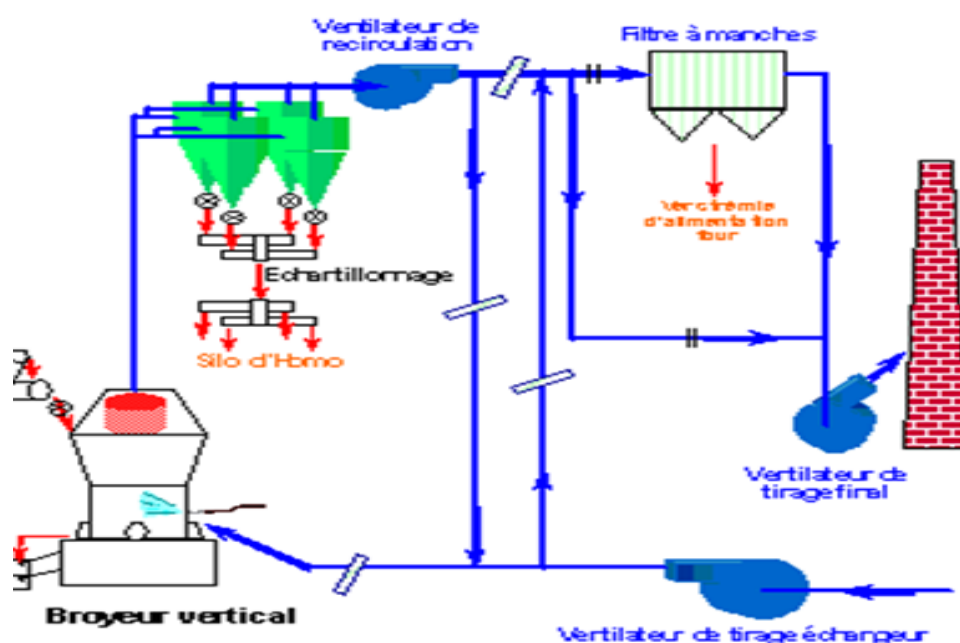


Figure 11 : Tirage et évacuation des gaz chauds [8]

Air de middle air : Cet air vient aussi du refroidisseur et acheminé vers l'échangeur air/air qui assure son refroidissement, afin de diminuer sa température de 200°C à 100°C .

L'air de middle air est tiré par un ventilateur vers la tête des deux tours pour qu'il se mélange avec les gaz chauds montant de la zone de préchauffage.

Air exhaust : C'est l'air qui est en excès et qui n'a plus d'utilisation, il est refroidi et dépoussiéré dans un filtre à manches, puis évacué dans l'atmosphère par la cheminée.

2. Mode composé

C'est le mode normal de la circulation des gaz récupérés au niveau du refroidisseur, dans lequel ils sont transportés vers le broyeur passant par le four et les deux tours DOPOL.

La seule différence entre ce mode et le mode direct se présente au niveau de fonctionnement du broyeur. C'est à dire que si le broyeur est en arrêt les gaz ascendant de la tour s'évacuent directement après sa filtration dans l'atmosphère. Par contre si le broyeur cru est en marche, les gaz chauds sont ventilés à l'intérieur de ce dernier pour évacuer la vapeur de l'eau existante dans la matière cru et à établir à l'entrée de la machine une dépression permettant d'éviter les émissions de poussières dans l'atmosphère.

Les gaz sortent du broyeur avec une température à peu près 110°C, entraînant avec eux des particules fines qui se récupèrent au niveau de filtre à manches (figure13) avant son évacuation à l'aide du ventilateur final.

Remarque :

Dans le mode composé, la température des gaz ne présente plus du risque sur les manches de filtre cru, donc ils n'ont pas besoin de se refroidir.

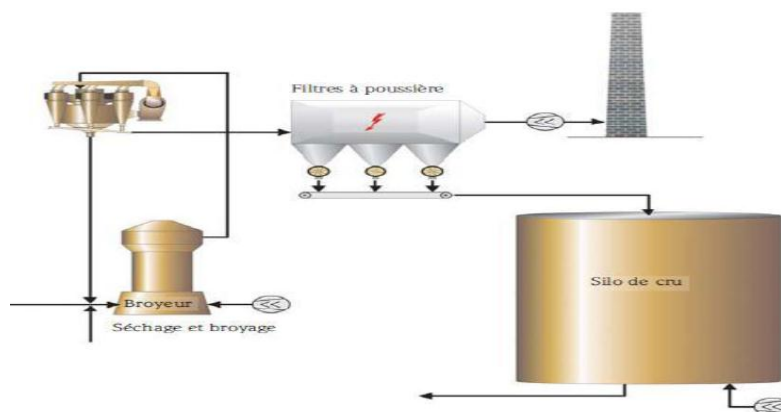


Figure 12 : Circulation des gaz chauds au mode composé [9]

III. Conclusion

La récupération de la chaleur apportée par l'air réchauffé lors de refroidissement du clinker permet l'optimisation de la consommation thermique dans la ligne de cuisson.

Dans ce chapitre, on a vu les directions des différents airs (air secondaire, air tertiaire, air de middle air et l'air exhaure) circulant dans le circuit en deux modes :

Soit en mode direct où le broyeur cru est en arrêt, et les gaz ascendant des deux tours sont refroidis et filtrés pour qu'ils puissent s'évacuer vers l'atmosphère.

Soit en mode composé où les gaz circulent par le même parcours du mode direct, mais la seule différence est que les gaz traversent avant sa filtration le broyeur cru parce qu'il est en marche.

Chapitre III

Etude de ventilateur de tirage cheminé

I. Problématique

Lors de la production du ciment qui est un produit de base élaborée, l'industrie cimentière a dû optimiser son processus de fabrication. Il s'agit d'un procédé très consommateur d'énergie calorifique et énergétique surtout dans la ligne de cuisson. Pour cette raison la société a fait la récupération des gaz chauds pour exploiter leur chaleur apportée au niveau de plusieurs ateliers d'usine.

La totalité des gaz chauds circulant dans la ligne de cuisson en deux modes (direct et composé) sont aspirés par un ventilateur de tirage cheminé (ventilateur final) afin de les évacuer dans l'atmosphère. Pour réduire les pertes de matière et protéger l'environnement, ces gaz doivent être dépoussiérés dans un filtre à manches avant l'évacuation.

Les manches de filtre étant en fibres de verre, sa température maximale est de 205°C. Si les fumées arrivent au filtre avec une température proche de 205°C, le risque de brûlure des manches est très grand, d'où la nécessité d'un système de refroidissement.

La tour de refroidissement se présente sous forme d'un registre qui laisse l'air frais entrer de l'extérieur afin de baisser la température des fumées.

Notre problématique va surtout s'intéresser à l'état de fonctionnement du ventilateur final au mode direct lors de refroidissement des gaz chauds par l'air frais. En effet le débit final des gaz à évacuer devient sensiblement grand ce qui provoque une surcharge du ventilateur et une consommation électrique élevée. Même si le registre de l'air frais lors de refroidissement des gaz chauds s'ouvre à 100%, la quantité de l'air entrante ne permet pas d'atteindre la température finale des fumées imposée par l'opérateur de la salle de contrôle.

II. Outils d'analyse

Un problème bien défini est un problème à moitié résolu. La définition commence alors par une formulation exacte du problème ainsi que la précision des facteurs concernés. On a opté pour l'utilisation des outils suivant :

1. Le QQQQCP

Le QQQQCP c'est une technique de recherche d'informations sur un problème et notamment sur ses causes. Elle sert à identifier le problème dans son ensemble à partir de 6 questions principales : Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Combien ? Pourquoi ?

Le QQQQCP permet d'avoir une idée sur toutes les causes du problème, des informations suffisantes pour déterminer avec exactitude quelle est la cause principale. Ces informations sont souvent basées sur des observations, des faits que l'on consigne au cours d'enquêtes. Cela permet d'identifier les aspects essentiels du problème[10].

a. Qui ?

Qui est concerné ?

HOLCIM Fès.

Qui est intéressé par le résultat ?

HOLCIM Fès, service production, ligne de cuisson.

b. Quoi ?

De quoi s'agit-il ?

L'apparition de la surcharge de ventilateur final lorsque les gaz chauds circulent en mode direct.

Quel est l'état actuel de la situation ?

- Ventilateur de tirage cheminé incapable d'aspirer le volume des gaz après leur refroidissement.
- Le ventilateur travaille à une capacité maximale.
- La température des fumées est élevée.
- Le registre de l'air frais est toujours ouvert à 100%.

Quelles sont les conséquences ?

- La température des gaz chauds après leur refroidissement présente un risque sur les manches de filtre.
- Le débit de l'air frais entrant de l'extérieur est très grand ainsi qu'il ne permet pas d'atteindre la température finale des gaz désirée.
- La surcharge du ventilateur final.
- La consommation électrique de ventilateur est élevée.

c. Où ?

Où cela se produit-il et s'applique-t-il ?

Ce problème concerne la ligne de cuisson, exactement au niveau de la conduite principale qui achemine les gaz chauds de la tour directement vers le filtre de dépoussiérage.

d. Quand ?

Depuis quand le problème est apparu ?

Depuis que le circuit de la ligne de production de l'usine est changé.

e. Comment ?

Comment se produit ce problème ?

La température moyenne des gaz aspirés par les ventilateurs DOPOL et middle air en tête des deux tours est de 240°C. Leurs arrivées au séparateur représente un grand risque sur les manches ce qui nécessite le refroidissement.

Le pourcentage de l'ouverture d'un registre de l'air frais se fait en fonction de la température de fumées gazeuse, et puisque la température des gaz est très élevée le registre s'ouvre au maximum, mais le débit de l'air frais entrant ne répond pas au besoin de la ligne de cuisson, ainsi qu'il provoque une surcharge du ventilateur final et le travail fourni par ce dernier devient maximal.

f. Pourquoi ?

Pourquoi le problème doit être résolu ?

- Pour soulager le ventilateur de tirage cheminé.
- Diminuer la consommation électrique de ventilateur.
- Le refroidissement des gaz soit efficace.

2. Diagramme d'Ishikawa : diagramme de causes et effets

Cet outil se présente sous la forme d'arête de poisson (figure14) classant les catégories de causes inventoriées selon la méthode des 5M (matière, main d'œuvre, méthode, matériel, milieu).

Il permet d'identifier les causes possibles d'un effet constaté et donc de déterminer les moyens pour y remédier[11].

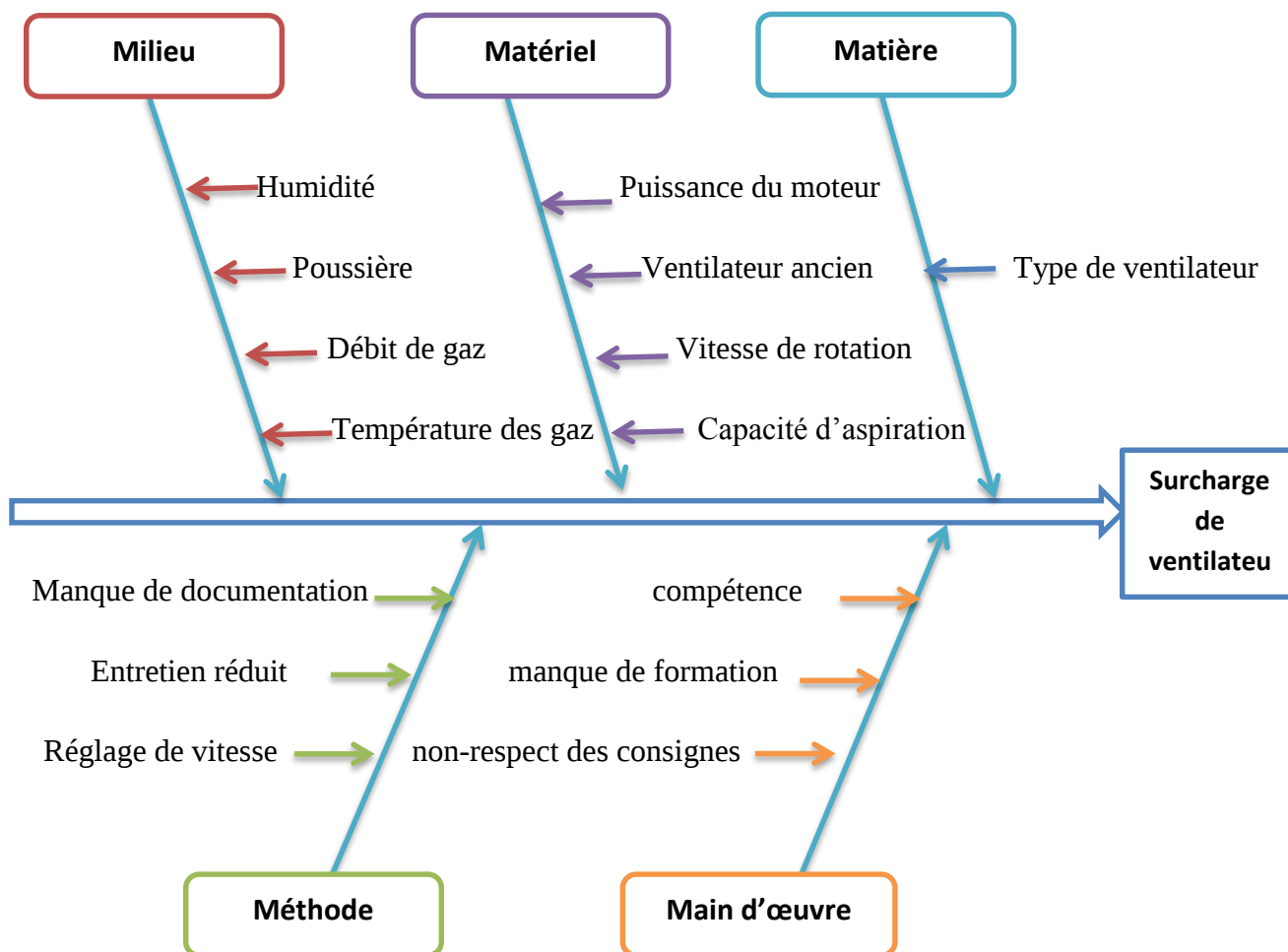


Figure 13 : Diagramme d'ICHIKAWA pour le ventilateur final

III. Ventilateur final

Le ventilateur finale est de type centrifuge (figure15) DHRV 56E-2000/k avec une référence de 12280726, son diamètre est de 3,2m, ce ventilateur comporte une roue à aubes qui renvoie l'air amené axialement en direction radiale.

Le courant d'air subit, dans la roue à aubes équipée d'aubes courbées en arrière, une accélération qui engendre de ce fait une énergie de vitesse plus élevée. Après avoir passé la roue à aubes, le courant d'air entre dans le carter en spirale aux murs latéraux parallèles. Dans ce carter, l'énergie de la vitesse est largement convertie en énergie de pression[12].

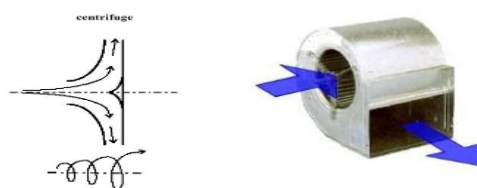


Figure 14 : Ventilateur centrifuge [13]

1. Constituant de ventilateur final

Le ventilateur final présente les caractéristiques suivantes :

Type de construction « K » : pour ce type de construction « K », la roue à aubes est montée sur un arbre à deux supports.

Roue à aubes : la roue à aubes du ventilateur est fabriquée en tôle d'acier.

Carter en spirale : Le gaz entre dans la roue de deux côtés. Pour ceci deux manchettes d'aspiration et une manchette de refoulement sont requises.

La division horizontale facilite le montage de grandes roues à aubes ainsi que le transport de grands ventilateurs.

Arbre/ palier : la chaise de palier équipée avec roulements rend un guidage compact de l'arbre possible. Le palier est équipé avec une lubrification circulaire d'huile. Deux bagues d'alimentation lèvent l'huile par le domaine bas du carter et projette l'huile dans deux cuvettes collectrices. Par les cuvettes l'huile coule encore vers bas par les roulements. En combinaison avec une grande surface de carter cela cause une dissipation excellent de chaleur.

Garniture d'étanchéité de l'arbre : une garniture de charge de d'étanchéité entre le boîtier et le passage de l'arbre. Elle est constituée d'un ou de plusieurs disques en matière plastique séparés par des tôles d'écartement. Ces disques agissent comme joint à labyrinthe.

Moteur d'entraînement transmission de force : le ventilateur est entraîné par le moteur via accouplements d'arbres flexibles. Les accouplements amortissant vibrations et impacts compensent un léger décalage de l'arbre.

Compensateur : équilibreur flexible pour la connexion du ventilateur et des tuyauteries. Le compensateur empêche des transmissions de vibration et compense les dilatations thermiques.

2. Données techniques

Le ventilateur final est caractérisé par des données techniques fournies par les fabricants du ventilateur. Ces données sont figurées dans le tableau 3 :

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Débit d'air maximal à l'aspiration du ventilateur	$Q_{\max}$	690.000	m ³ /h
Masse volumique	ρ	455.964	kg/h
Masse volumique / poussière	ρ'	17.7	kg/h
Pression d'air	p_a	95.539	Pa

Pression différentielle (1-2), statique	ΔP_{1-2}	3.200	Pa
Pression d'air stat. côté aspiration	P_{s_a}	-3.200	Pa
Pression d'air stat. côté refoulement	P_{s_r}	0	Pa
Pression dynamique (à l'aspiration du ventilateur)	P_{d_a}	188	Pa
Pression dynamique (au refoulement du ventilateur)	P_{d_r}	298	Pa
Pression différentielle totale	ΔP_d	3,31	Pa
Densité (à l'aspiration)	d_a	0,661	kg/m ³
Densité (à refoulement)	d_r	0,676	kg/m ³
Vitesse d'aspiration	V_a	23,86	m/s
Vitesse de refoulement	V_r	29,72	m/s
Vitesse de rotation	V_{rot}	743	m/s
Rendement	η	80.00	-
Puissance utile	W_u	626,54	kW
Puissance d'arbre	W_{arbre}	782,44	kW
Température (à l'aspiration du ventilateur)	T_a	213,00	°C
Température (au refoulement du ventilateur)	T_r	219,14	°C

Tableau 3: Données techniques de ventilateur final

3. Relevé des mesures

Pour évaluer la capacité du ventilateur tirage cheminé, on est appelé à mesurer d'une part la vitesse de rotation de ventilateur V_{rot} et sa puissance électrique P , d'autre part la pression totale Δp , le débit volumique Q_v et la température T des fumées circulant en deux modes, à fin de comparer les résultats obtenues au mode direct avec celles qu'on a trouvé au mode composé.

Donc les relevés des mesures sont les suivant :

a. Pression totale des gaz

La pression totale notée (Δp) est la somme de la pression dynamique et de la pression statique, elle est mesurée par le tube de Pitot au niveau de la section d'aspiration.

La conduite où on mesure la pression est à deux axes (1) et (2), chaque axe à deux côtés qui sont (A) et (B) pour l'axe (1) ainsi que (A') et (B') pour l'axe (2). La pression totale et n'est pas uniforme dans toute la conduite, pour cette raison on mesure Δp au niveau de 3 points de chaque côté (150mm, 500mm et 1006mm), afin de calculer la moyenne arithmétique de ce paramètre.

Les pressions totales à l'entrée du ventilateur final au mode direct et au mode composé sont figurées respectivement dans les tableaux 4 et 5.

Mesure	Diamètre (mm)	Mesure sur l'axe 1 (mbar)		Mesure sur axe 2 (mbar)		Moyenne Δp (mbar)
		A	B	A'	B'	
1	150	2,05	1,98	1,87	1,94	1,96
2	500	1,90	1,62	1,79	1,25	1,64
3	1006	1,93	1,86	1,81	1,72	1,83
Valeur de 3 points de mesure						1.81

Tableau 4 : Mesure de la pression totale au mode direct

Mesure	Diamètre (mm)	Mesure sur l'axe 1 (mbar)		Mesure sur axe 2 (mbar)		Moyenne Δp (mbar)
		A	B	A'	B'	
1	150	1,70	1,50	0,90	0,90	1,25
2	500	1,60	1,80	1,10	0,90	1,35
3	1006	1,30	1,20	0,60	0,50	0,90
Valeur de 3 points de mesure						1,16

Tableau 5: Mesure de la pression totale au mode composé

D'après ces deux tableaux 4 et 5 qui représentent les pressions moyennes des gaz de chaque mode, on remarque que la pression moyenne des gaz circulant au mode direct de 1,81mbar est supérieure à celle obtenue au mode composé qui est de 1,16mbar.

b. Débit volumique des gaz

Le débit volumique est la quantité des gaz chauds aspirés par le ventilateur final lors de sa circulation dans la ligne de cuisson. Les valeurs regroupées dans le tableau 6 nous ont été fournis par le responsable de production.

Jours	Débit des gaz au mode direct en (m ³ /h)	Débit des gaz au mode composé en (m ³ /h)
13/04/2015	623366	423185
14/04/2015	647723	495280
15/04/2015	682613	478250
16/04/2015	689797	423678

17/04/2015	673148	475523
18/04/2015	671165	451591
19/04/2015	688422	479521
Débit moyen des gaz	668033	461004
Valeur limite de débit	690000	690000

Tableau 6 : Mesure de débit volumique des gaz chauds et sa valeur limite

Interprétation des résultats

✓ Mode direct

Le débit volumique des gaz chauds obtenu en mode direct présente une valeur de $668033\text{m}^3/\text{h}$. Cette valeur est très élevée par rapport à celle obtenue en mode composé et restée proche de la valeur limite $690000\text{m}^3/\text{h}$.

Cette élévation de la valeur moyenne de débit revient à l'arrêt de broyeur cru, dans lequel le clapet positionné dans la conduite permettant le passage des gaz de séchage vers le broyeur est totalement fermé. Les gaz vont donc s'acheminer complètement vers le filtre à manche.

Puisque la température moyenne des gaz est grande 240°C , il est nécessaire d'avoir un refroidissement des fumées par l'air ambiant entrant du registre de l'air frais. Une autre quantité de l'air s'ajoute donc au volume des gaz ascendant de la ligne de cuisson ce qui explique le grand débit aspiré.

✓ Mode composé

Le débit volumique moyen obtenu au mode composé $461004\text{m}^3/\text{h}$ présente un grand écart à la valeur limite, car dans ce mode le broyeur cru est en marche et la chaleur apportée par les gaz de la ligne de cuisson est exploitée au niveau de ce dernier pour sécher la matière crue broyée. La diminution de la température des gaz exhale. On n'a pas besoin de refroidir les fumées avant l'évacuation, ce qui explique la réduction de débit dans ce mode par rapport au mode direct.

Remarque :

L'arrêt du broyeur cru au mode direct donne naissance à une autre étape, qui est le passage des fumées vers un système de refroidissement qui assure la dilution à l'air des gaz avant l'arrivée au filtre. Donc les débits des gaz chauds à la tête des deux tours pour les deux modes sont égaux et l'écart entre eux est relatif au volume de l'air frais de refroidissement.

c. Vitesse de ventilateur final

La vitesse de rotation de ventilateur est affichée par l’afficheur du variateur de vitesse qui commande le moteur de ventilateur et assure la régularisation de la vitesse selon une consigne imposée par l’opérateur existant au niveau de la salle de contrôle.

Le tableau 7 regroupe les valeurs, relevées sur l’afficheur, de la vitesse de rotation de ventilateur final pendant 7 jours pour les deux modes:

Jours	Vitesse de ventilateur au mode direct tr/min	Vitesse de ventilateur au mode composé tr/min
13/04/2015	638	517
14/04/2015	659	580
15/04/2015	683	562
16/04/2015	707	520
17/04/2015	678	553
18/04/2015	672	520
19/04/2015	701	571
Vitesse moyen de ventilateur	677	546
Valeur limité de la vitesse	720	720

Tableau 7 : Mesure de la vitesse de rotation de ventilateur et sa valeur limite

Interprétation des résultats :

La vitesse de rotation moyenne de ventilateur de tirage cheminé lors de l’aspiration des gaz chauds au mode direct 677tr/min est supérieure à celle trouvé au mode composé 546tr/min. Cette vitesse de rotation est proche à la valeur limite (720tr/min). Cette élévation de vitesse revient au grand débit volumique des fumées circulant au mode direct.

d. Température des gaz

Ce paramètre est obtenu par le biais d’un thermocouple de type K exposé à l’entrée de filtre, afin de garder la température actuelle du gaz inférieur à la température limite de filtre.

Le tableau 8 regroupe les valeurs de la température à l’entrée filtre à manches pour les deux modes direct et composé pendant 7jours :

Jours	Température des gaz au mode direct en °C	Température des gaz au mode composé en °C
13/04/2015	192	124
14/04/2015	190	125

15/04/2015	185	120
16/04/2015	189	115
17/04/2015	183	110
18/04/2015	187	110
19/04/2015	190	115
Température moyenne	188	117
Valeur limite	195	195

Tableau 8 : Mesure de la température des gaz chauds et sa valeur limite

Interprétation des résultats :

On remarque que la température des gaz chauds au mode direct est plus grande que celle du mode composé. L'écart entre eux est de 71°C. Cette différence est reliée à la marche ou l'arrêt du broyeur cru où :

✓ Mode direct :

Au mode direct, les gaz chauds passent directement des deux tours vers le filtre à manches passant par une tour de conditionnement.

Mais à partir de la valeur moyenne de la température obtenue 188°C, on remarque que cette dernière reste encore élevée même s'il y a un refroidissement des gaz. Elle est supérieure à la température consignée par l'opérateur qui est 170°C. La quantité de l'air frais entrée par le registre n'est pas suffisante pour diminuer encore la température des fumées.

Le filtre de dépoussiérage des gaz possède des manches qui ne supportent pas des températures supérieures ou égales à 205°C. Pour cela l'équipe de la ligne de cuisson impose une température limite des gaz qui est 195°C.

La température moyenne des gaz au mode direct est plus proche de la valeur limite ce qui engendre un risque de brûlure du premier compartiment de filtre à manches.

✓ Mode composé :

Au mode composé, le broyeur cru est en marche donc le clapet qui permet le passage des gaz chauds vers le broyeur est ouvert.

La chaleur des fumées est utilisée pour faire sécher la matière crue. Un échange thermique se réalise au niveau du broyeur ce qui explique la diminution de la température des fumées à l'entrée du filtre jusqu'à 170°C.

On n'a pas besoin d'utiliser un système de refroidissement car cette température est inférieure à la température limite 195°C.

e. Puissance de ventilateur final

La puissance de ventilateur final est la puissance consommée par son moteur lors de l'aspiration des gaz chauds, il est affiché par le variateur de vitesse du moteur de ventilateur et transmis vers le tableau de bord de la salle de contrôle.

Le tableau 9 regroupe la puissance électrique consommée par le ventilateur pour les deux modes direct et composé pendant 7 jours :

Jours	Puissance de ventilateur au mode direct en (kW)	Puissance de ventilateur au mode composé en (kW)
13/04/2015	783	382
14/04/2015	781	385
15/04/2015	794	401
16/04/2015	787	437
17/04/2015	783	390
18/04/2015	784	389
19/04/2015	792	408
La puissance moyenne	786,3	398,8

Tableau 9 : Puissance de ventilateur en deux modes

Interprétation des résultats :

D'après les valeurs moyennes de la puissance électrique consommée par le ventilateur final en deux modes, on remarque que la puissance au mode direct est plus que le double de la puissance au mode composé. Cette différence revient au :

Le débit volumique des gaz chauds au mode direct est de 668 033 m³/h, il est grand par rapport à celui du mode composé 461 004 m³/h. Le ventilateur final fournit plus d'énergie lors de l'aspiration des gaz au mode direct. Cette énergie se traduit par l'augmentation de la vitesse de rotation du ventilateur, où elle s'accompagne d'une augmentation de sa consommation électrique.

Plus le débit volumique est grand, plus la vitesse de rotation de ventilateur est grande et par conséquent la consommation électrique va s'agrandir.

f. Capacité de ventilateur

La capacité d'un ventilateur est obtenue en fonction de sa vitesse de rotation, c'est un paramètre qui peut donner une idée sur l'état de fonctionnement de son moteur. Les valeurs de ce paramètre sont affichées au niveau du tableau de bord existant dans la salle de contrôle.

Le tableau 10 regroupe les valeurs de la capacité de ventilateur final pendant 7 jours pour les deux modes :

Jours	Capacité de ventilateur au mode direct en %	Capacité de ventilateur au mode composé en %
13/04/2015	91,05	64,7
14/04/2015	91,1	67,1
15/04/2015	91,1	69,4
16/04/2015	91,2	67,2
17/04/2015	91,1	64,9
18/04/2015	91,1	67,6
19/04/2015	91,1	67,7
Capacité moyenne	91,1	66,9
Valeur limite de la capacité	96	96

Tableau 10 : Capacité de ventilateur en deux modes

Interprétation des résultats :

✓ Mode direct :

La capacité moyenne de ventilateur final au mode direct est de 91%. Elle est très grande par rapport à celle de mode composé, ainsi qu'elle est proche de la capacité maximale donnée par l'équipe de la ligne de cuisson 96%.

La marche à pleine capacité du ventilateur, montre que le débit des gaz aspiré est relativement insupportable pour le ventilateur ce qui le rend en surcharge.

✓ Mode composé :

On observe que la capacité de ventilateur au mode composé est de 66,9%, cette valeur est relativement faible par rapport à la capacité limite imposée par l'équipe de production 96%. On peut dire que le ventilateur fonctionne dans de bonnes conditions, où le débit des gaz chauds est optimal, la température des gaz est faible et la vitesse de rotation est normale.

Remarque :

D'après tout ce qu'on a vu en haut, on remarque que tous les paramètres varient en fonction du débit des gaz chauds aspirés par le ventilateur final. Au mode direct le débit est grand, ce qui provoque l'augmentation de la consommation électrique chez le ventilateur, ainsi que sa capacité tend vers le maximum c'est-à-dire la surcharge.

Ce problème d'élévation de débit au mode direct revient au volume de l'air de refroidissement entré par le registre de l'air frais, mais le vrai problème est que cette quantité

d'air ne satisfait pas les besoins de la ligne de cuisson, qui est la diminution de la température des gaz à celle consignée par l'opérateur qui est de 170°C.

On peut conclure que le système de refroidissement des gaz chauds est la source principale de la surcharge de ventilateur, ce qui nous a permis de chercher un autre moyen de refroidissement, mais avec une conformité d'avoir la température des fumées désirée à l'entrée filtre et avec une optimisation du volume des fumées aspirés par le ventilateur final.

IV. Conclusion

La définition de la problématique relative au ventilateur de tirage cheminé a permis de faire une évaluation de la performance de ce dernier lors de l'aspiration des gaz chauds pour les deux modes (direct et composé), où on a trouvé les résultats suivants :

➤ Mode direct :

Le ventilateur final fonctionne dans des mauvaises conditions qui ont :

- Débit moyen des gaz chauds aspirés est élevé : $Q_m = 668\,033\text{ m}^3/\text{h}$
- La vitesse de rotation de ventilateur est grand ce qui augmente sa consommation électrique : $P = 786\text{ kW}$
- Température des gaz chauds est élevé : $T = 188^\circ\text{C}$
- Capacité de ventilateur : 91,1%

➤ Mode composé :

Le ventilateur final est à l'aise lors de l'aspiration des gaz, car les conditions de fonctionnement sont normales est loin des limites :

- Débit moyen des gaz chauds aspirés est moyen : $Q_m = 461\,004\text{ m}^3/\text{h}$
- La vitesse de rotation de ventilateur est normale car le débit des gaz est n'est pas grand et donc la consommation électrique est convenable : $P = 398,8\text{ kW}$
- Température des gaz chauds est faible : $T = 117^\circ\text{C}$
- Capacité de ventilateur est acceptable : 66,9%

Le système de refroidissement des gaz chauds utilisé au mode direct pour diminuer sa température est responsable de l'augmentation de débit final des fumées. Une question primordiale s'impose :

Comment pourrait-on diminuer la température des gaz chauds circulant au mode direct avec l'élimination de la surcharge de ventilateur par minimisation du volume des gaz aspirés afin de le soulager ?

Chapitre IV

Refroidissement des gaz chauds par pulvérisation de l'eau

I. Introduction

L'étude précédente a montré que le ventilateur final travaille dans des conditions très dure qui le rend en surcharge lorsque les gaz chauds circulent au mode direct qui nécessitent un

refroidissement pour diminuer la température des gaz avant la filtration, afin de protéger les manches de filtre de dépoussiérage.

Lors de refroidissement des gaz exhaure, le débit devient sensiblement très grand ce qui provoque une surcharge du ventilateur final, pour cette raison on a proposé d'effectuer le refroidissement des fumées en deux parties : la première partie est un refroidissement par pulvérisation de l'eau et la deuxième partie est un refroidissement par injection de l'air frais.

La température de l'ensemble gazeux à la tête de la tour est de 240°C, on la baisse jusqu'à une température de 200°C par injection de l'eau, les gaz étant refroidis ensuite de 200°C jusqu'à 170°C par dilution à l'air, afin d'optimiser le débit total des fumées aspirés par le ventilateur de tirage.

II. Refroidissement par pulvérisation d'eau

1. Définition de la pulvérisation

La pulvérisation d'un fluide pour refroidir un gaz ou un produit est un procédé courant dans l'industrie. Le refroidissement est obtenu en pulvérisant un liquide réfrigérant qui absorbe et élimine la chaleur. L'énergie calorifique est transférée au liquide de refroidissement et supprimée par évaporation. Avec de l'eau la capacité de la chaleur latente (énergie pour changer l'eau en vapeur) et la capacité de la chaleur spécifique (énergie nécessaire pour chauffer l'eau dans sa phase encore liquide) sont toutes les deux élevées par rapport à la plupart des autres liquides. Ces propriétés thermiques de l'eau en font un liquide de refroidissement intéressant.

2. Les types de pulvérisateurs

✓ Pulvérisateur mono-fluide :

La manière la plus simple de générer une pulvérisation consiste à procéder par simple détente d'eau pressurisée à travers un orifice calibré.

✓ Pulvérisateur bi-fluide :

Les pulvérisateurs bi-fluides effectuent la détente d'un mélange constitué d'air comprimé additionné du liquide à pulvériser pour le transformer en un film brouillard. La détente s'effectue à travers un ou plusieurs orifices[14].

3. Positionnement de système de pulvérisation

La ligne de cuisson est constituée par deux tours DOPOL, four rotatif et le refroidisseur. Cette ligne est caractérisée par un circuit des gaz chauds récupérés à partir du refroidissement de clinker. Quatre ventilateurs assurent cette circulation des fumées.

Les ventilateurs DOPOL (1) et DOPOL (2) ont un diamètre respectivement 1,8 m et 2,3m, ils sont destinés à l'aspiration et au refoulement au reste du circuit des gaz d'exhaure résultants de la combustion et des autres réactions issus de la tour de préchauffage et du four.

Le refoulement de ces fumées se fait au sein d'une conduite principale, où ils se rencontrent avec une autre partie de l'air aspiré par un ventilateur de middle air après son refroidissement au niveau de l'échangeur.

Un point de la conduite s'éloigne de 3m au point de rencontre de tous les gaz de la ligne de cuisson. Il est considéré comme le meilleur endroit pour l'emplacement des pulvérisateurs de l'eau de refroidissement, car il est plus proche de la terre, il se place à une hauteur de 20m, ainsi que l'accès de l'eau à ce point est facile.

L'ensemble de l'eau nécessaire à cette injection est puisée dans un réservoir de l'eau brute qui alimente le broyeur cru pour assurer le bon fonctionnement (l'injection de l'eau se fait pour mieux étaler et stabiliser le lit de la matière cru).

Puisqu'au mode direct le broyeur cru est en arrêt donc on peut pomper l'eau vers les pulvérisateurs fixés sur la conduite principale des fumées.

4. Calcul des paramètres relatifs au gaz à refroidir

a. Débit des gaz chauds à refroidir

La conduite principale est le point de rencontre de tous les flux gazeux circulant dans la ligne de cuisson, donc le débit gazeux à ce point égale est la somme de trois débits volumiques des fumées provenant de trois conduites où chacune est relié à son ventilateur d'aspiration et de refoulement (DOPOL 1, DOPOL 2, middle air).

$$Q_G = Q_{V1} + Q_{V2} + Q_{V3}$$

Où :

Q_G : débit volumique des gaz refoulés dans la conduite principale.

Q_{V1} : débit volumique des gaz refoulés dans la conduite DOPOL 1.

Q_{V2} : débit volumique des gaz refoulés dans la conduite DOPOL 2.

Q_{V3} : débit volumique des gaz refoulés dans la conduite de middle air.

Les débits Q_{V1} , Q_{V2} et Q_{V3} sont calculés en fonction de la vitesse moyenne de flux gazeux ainsi que la section de la conduite relative à chaque gaz.

- Calcul de la vitesse des gaz : « V »

La vitesse des gaz chauds dans la conduite est calculée à partir de la pression totale Δp du gaz (**annexe2**) et sa masse volumique ρ (**annexe3**). La relation de vitesse est la suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2 * \Delta p * 10^2}{\rho}}$$

Le tableau 11 rassemble la vitesse de chaque gaz :

	Masse volumique (ρ) kg/m ³	Pression total (Δp) Mbar	Vitesse des gaz (V) m/s
Gaz de DOPOL 1	0,59	0,92	17,66
Gaz de DOPOL 2	0,61	0,75	15,68
Gaz de middle air	0,91	0,78	13,09

Tableau 11 : Vitesse des gaz chauds

- Calcul de la section de chaque conduite : « s »

On calcule la section en fonction de diamètre de chaque conduite selon la relation suivante :

$$s = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Le tableau 12 regroupe la section de chaque conduite (DOPOL1, DOPOL2, middle air) :

	Diamètre de la conduite (m)	Section de conduite (m ²)
Gaz de DOPOL 1	1,80	2,54
Gaz de DOPOL 2	2,30	4,15
Gaz de middle air	1,65	2,14

Tableau 12 : Section des conduites de la ligne de cuisson

- Calcul de débit des gaz : « Q_v »

Le débit volumique des gaz chauds dans chaque conduite est calculé par la relation suivante :

$$Q_v = s * V * 3600$$

Le tableau 13 présente les débits des gaz traversant les conduites :

	Section (m ²)	Vitesse des gaz (m/s)	Débit des gaz (m ³ /h)
Gaz de DOPOL 1	2,54	17,66	161483,04
Gaz de DOPOL 2	4,15	15,68	234259,2
Gaz de middle air	2,14	12,88	99227,52

Tableau 13 : Débit des gaz chauds

- Le débit des gaz de la conduite principale : « Q_G »

Le débit des fumées après la rencontre de tous les gaz dans la conduite principale est le suivant :

$$Q_{v.G} = Q_{v1} (\text{gaz DOPOL1}) + Q_{v2} (\text{gaz DOPOL2}) + Q_{v3} (\text{air de middle air})$$

$$Q_{v.G} = 494969,76 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le débit massique des gaz de la conduite principale est calculé par la relation suivante :

$$Q_{m.G} = Q_{v.G} * \rho_G$$

Avec

$$\rho_G = 0,891 \text{ kg/m}^3$$

Donc

$$Q_{m.G} = 441018,05 \text{ kg/h}$$

Donc le débit volumique des gaz chauds traversant la conduite principale qui les achemine vers le filtre à manches est de $494969,76 \text{ m}^3/\text{h}$. A partir de ce débit on peut calculer le débit de l'eau nécessaire pour la pulvérisation.

b. Température des gaz dans la conduite principale

Les gaz circulant dans la conduite principale est la somme des trois gaz (DOPOL1, DOPOL2 et middle air) dans laquelle la température des fumées à ce point est mesuré avec un capteur de température (thermocouple), où on a trouvé que la température du mélange gazeux est de : $T_G = 240^\circ\text{C}$

c. Composition des gaz dans la conduite principale

Dans la conduite principale l'équipe de la ligne de cuisson dispose des détecteurs qui permettent de donner les fractions massiques des constituants des fumées à évacuer.

Les constituants des fumées sont présentés dans le tableau 14 :

Constituant	Fraction massique X_i
O_2	11,6
N_2	72,4
CO_2	13,0
H_2O	3,00

Tableau 14 : Composition des fumées

5. Calcul des paramètres relatifs à l'eau de pulvérisation

Le refroidissement contrôlé d'un gaz ou de fumées par pulvérisation est utilisé pour plusieurs applications. Par exemple pour :

- Refroidir les gaz avant de les traiter dans un filtre.
- Combiner tel refroidissement avec la capture d'un polluant contenu dans les gaz.
- Sécher une suspension aqueuse[15].

Pour notre projet, on veut utiliser ce procédé pour refroidir les gaz chauds depuis 240°C jusqu'à 200°C environ.

Le refroidissement est effectué en injectant une pulvérisation au sein des gaz chauds traversant la conduite de manière à évaporer l'eau injectée.

La transformation qui se produit est à enthalpie constante : l'enthalpie perdue par les gaz refroidis est regagnée sous forme de vapeur d'eau qui se mêle au gaz cela revient au calorifugeage de la conduite principale qui est fabriquée en acier allié au carbone ainsi qu'elle est entouré par une couche d'isolant thermique qui est la laine de roche (un matériau qui a une conductivité thermique très faible) en vue d'éliminer les pertes thermique par les parois.

Le bilan thermique permet de calculer le débit massique d'eau Q_{mL} qu'il faut injecter dans le débit massique de gaz humide Q_{mG} pour refroidir celui-ci de la température T_{G0} à la température T_{G1} afin de protéger les manches de filtre cru.

Le bilan thermique de ce refroidissement des gaz chauds par pulvérisation de l'eau est représenté comme suit :

$$Q_{mL} * C_{pL} * (T_{sat} - T_L) + Q_{mL} * L_v + Q_{mL} * C_{pV} * (T_{G1} - T_{sat}) = Q_{mG,H} * C_{pG} * (T_{G0} - T_{G1})$$

Avec

Q_{mL} : débit massique de l'eau

$Q_{mG,H}$: débit massique du gaz humide

T_L : Température de l'eau

T_{sat} : Température saturante

T_{G0} : Température initial des gaz

T_{G1} : Température final des gaz

L_v : Chaleur latente d'évaporation de l'eau à T_{sat}

$C_{pG,S}$: Chaleur spécifique à pression constante de l'air

$C_{pV,e}$: Chaleur spécifique de la vapeur constitutif du gaz humide

C_{pV} : Chaleur spécifique de la vapeur de l'eau

Le débit massique du gaz humide est la somme de débit de gaz sec et la vapeur de l'eau :

$$Q_{mG,H} = Q_{mG,S} + Q_{mV,e}$$

Le bilan thermique devient :

$$Q_{mL} * C_{pL} * (T_{sat} - T_L) + Q_{mL} * L_v + Q_{mL} * C_{pV} * (T_{G1} - T_{sat}) = Q_{mG,S} * C_{pG,S} * (T_{G0} - T_{G1}) + Q_{mV,e} * C_{pV,e} * (T_{G0} - T_{G1})$$

On peut déduire à partir de ce bilan thermique le débit massique de l'eau nécessaire pour la pulvérisation d'un débit massique des fumées traversant la conduite principale.

$$Q_{mL} = \frac{(Q_{mG,S} * C_{pG,S} + Q_{mV,e} * C_{pV,e}) * (T_{G0} - T_{G1})}{C_{pL} * (T_{sat} - T_L) + L_v + C_{pV} * (T_{G1} - T_{sat})}$$

a. Calcul de débit massique de la vapeur d'eau

Selon la composition du gaz humide, on peut calculer le débit massique de la vapeur de l'eau pour une fraction de 3% de la vapeur existante dans les fumées.

On a :

$$\%(vapeur \text{ de l'eau}) = \frac{\text{débit massique de la vapeur de l'eau } (Q_{mV,e})}{\text{débit massique de gaz Humide } (Q_{mG,H})}$$

Alors

$$(Q_{mV,e}) = \%(vapeur \text{ de l'eau}) * Q_{mG,H}$$

Avec

$$Q_{mG,H} : 441018,05 \text{ kg/h}$$

Donc

$$Q_{mV,e} = 13230,54 \text{ kg/h}$$

b. Calcul de débit de gaz sec

Le débit des gaz sec est la différence entre le débit massique de gaz humide et le débit massique de la vapeur de l'eau.

On a :

$$Q_{mG,H} = Q_{mG,S} + Q_{mV,e}$$

Alors

$$Q_{mG,S} = Q_{mG,H} - Q_{mV,e}$$

Donc

$$Q_{mG,S} = 427787,51 \text{ kg/h}$$

c. Calcul de la chaleur spécifique des gaz sec

La chaleur spécifique des gaz sec est calculée en fonction des fractions massique des constituants gazeux selon la relation suivante :

$$C_p = \sum C_{pi} * X_i \quad [16]$$

Le tableau 15 regroupe les fractions des constituants gazeux et ses chaleurs spécifiques :

Constituant	Fractions des constituants X_i	La chaleur spécifique C_{pi} (j/kg.k)
O ₂	11,6	917
CO ₂	13,0	846
N ₂	72,4	1038
H ₂ O	3,00	1867

Tableau 15 : Chaleur spécifique des constituants des fumées

Donc :

$$C_{pG.s} = 967,86 \text{ j/kg.k}$$

d. Calcul de la chaleur spécifique du gaz humide

La chaleur spécifique $C_{pV.e}$ relative à 3% de la vapeur de l'eau existante dans les fumées est :

$$C_{pV.e} = 56,01 \text{ j/kg.k}$$

e. La chaleur spécifique de l'eau

La chaleur spécifique de l'eau est : $C_{pL} = 4180 \text{ j/kg.K}$

f. Paramètres relatifs à la vapeur saturée

La pression absolue au sein de la conduite est de 0,9 bar, à partir de cette pression on peut déduire plusieurs paramètres qui correspondent à la vaporisation de l'eau pulvérisée comme : la température d'évaporation, la chaleur latente ainsi que la chaleur spécifique de la vapeur de l'eau. Le tableau 16 rassemble tous ces paramètres[17] :

Paramètre	Valeur
Pression absolue (bar)	0,9
Température d'évaporation (°C)	96,71
Chaleur latente d'évaporation (kJ/kg)	2265,65
Chaleur spécifique d'évaporation (kJ/kg.k)	4,1899

Tableau 16 : Paramètres relatif à la vapeur saturée de l'eau

g. Calcul de débit massique de l'eau de pulvérisation

Le débit massique de l'eau pulvérisé de 30°C est :

$$Q_{mL} = \frac{(Q_{m.G.s} * C_{pG.s} + Q_{mV.e} * C_{pV.e}) * (T_{G0} - T_{G1})}{C_{pL} * (T_{sat} - T_L) + L_V + C_{pV} * (T_{G1} - T_{sat})}$$

$$Q_{mL} = 23252,9 \text{ kg/h}$$

Donc 6,4l/s est le débit de l'eau nécessaire pour diminuer la température des gaz chauds de 240°C à 200°C.

III. Refroidissement des gaz par l'air frais

Après le refroidissement des gaz chauds par l'eau pulvérisée la température atteint 200°C. On diminue encore la température de 200°C jusqu'à 170°C, afin de protéger les manches de filtre qui possède une température maximale de 205°C.

La diminution de la température se fait à l'aide d'une tour de refroidissement qui est présentée sous forme d'un registre de l'air frais à ailerons verticaux parallèles qui assure le réglage d'air ambiant de dilution, il est commandé par un servomoteur asservi à la régulation de la température à l'entrée du filtre.

1. Calcul de débit de l'air de refroidissement

Le bilan thermique suivant permet de calculer le débit de l'air frais nécessaire pour refroidir les fumées du 200°C à 170°C:

$$Q_{air} * C_{p_{air}} * (T_f - T_{ambiante}) = ((Q_{m.G.H} * C_{pG.s}) + (Q_{m.V.e} * C_{pV.e})) * (T_i - T_f)$$

Alors

$$Q_{air} = \frac{((Q_{m.G.H} * C_{pG.s}) + (Q_{m.V.e} * C_{pV.e})) * (T_i - T_f)}{C_{p_{air}} * (T_f - T_{ambiante})}$$

Avec

$$Q_{m.G.H} = 427787,51 \text{ kg/h}$$

$$Q_{m.V.e} = 13230,54 \text{ kg/h}$$

$$C_{pG.s} = 967,86 \text{ J/kg.k}$$

$$C_{pV.e} = 56,01 \text{ J/kg.k}$$

$$C_{p_{air}} = 1030 \text{ J/kg.k [18]}$$

$$T_{ambiante} = 27^\circ\text{C}$$

$$T_i = 200^\circ\text{C}$$

$$T_f = 170^\circ\text{C}$$

Donc

$$Q_{m.air} = 84482,2 \text{ kg/h}$$

Le débit volumique de l'air est le suivant :

$$Q_{v.air} = \frac{Q_{m.air}}{\rho_{air}}$$

Avec

$$\rho_{air} : 1,2 \text{ kg/m}^3 [19]$$

Donc

$$Q_{v.air} = 70401,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

2. Le pourcentage d'ouvrage du registre

Le registre de l'air frais s'ouvre en fonction de la température. Dans le cas où le refroidissement des gaz chauds se fait par l'air frais seulement le registre s'ouvre à 100% pour diminuer la température de 70°C de la température initiale qui est 240°C.

Donc on peut déduire le pourcentage d'ouvrage de registre dans le cas où on réduit la température de 30°C de la température 200°C après le refroidissement des fumées par la pulvérisation de l'eau.

Donc

$$\%(\text{ouvrage de registre}) = 43 \%$$

IV. Résultats finals des paramètres de ventilateur

1. Débit total aspiré par ventilateur final

Le ventilateur final aspire tous les gaz circulant dans la ligne de cuisson après son dépoussiérage, donc le débit gazeux aspiré est la somme de débit des gaz humide ainsi que le débit de l'air ambiant.

$$Q_T = Q_{v.H} + Q_{v.air}$$

Donc

$$Q_T = 565371,56 \text{ m}^3/\text{h}$$

2. Puissance aéraulique

La puissance aéraulique est la puissance appliquée au fluide pour remplir les conditions de débit du réseau, la puissance aéraulique (utile) peut être calculée en fonction du débit et de la Hauteur manométrique du ventilateur[20] :

$$P_u = \Delta P * Q_v$$

a. Calcul de la perte de charge (Hauteur manométrique)

Les pertes de charge représentent la chute de pression totale due aux divers frottements inévitables subis par l'air en mouvement et s'expriment en pascal. Les pertes de charge sont directement liées à la vitesse du fluide et on distingue deux types de pertes de charge :

- Les pertes de charge linéaires ou régulières qui sont dues aux frottements de l'air sur les parois des conduites.
- Les pertes de charges singulières qui sont dues aux différentes singularités du réseau (entrée et sortie air, coude, réductions, etc...)

Pour calculer des pertes de charge il faut déterminer le régime d'écoulement de fluide[21].

Détermination du régime d'écoulement

Suivant le régime d'écoulement les pertes de charges varient car le comportement du fluide change. On détermine ce régime à partir du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot Dc}{\mu}$$

Avec :

ρ : La masse volumique de gaz.

V : Vitesse d'écoulement du gaz chauds.

Dc : Le diamètre de la conduite.

μ : La viscosité dynamique en kg/m.s

Calcul de la vitesse d'écoulement des gaz chauds dans la conduite principale:

$$V = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta P}}{\rho}$$

Où :

$$\Delta p = 1,16 \text{ mbar}$$

$$\rho = 0,891 \text{ kg/m}^3$$

Donc

$$V = 16,13 \text{ m/s}$$

Calcul de viscosité dynamique

La viscosité dynamique $\mu = 6,62 \cdot 10^{-5} \text{ Pa/s}$ [22].

Donc le nombre de Reynolds est :

$$Re = 7.10^5$$

On a trouvé que le nombre de Reynolds $Re > 2000$ donc l'écoulement est turbulent.

Expression des pertes de charges totales au niveau de la conduite :

$$\Delta P_{\text{totales}} = \Delta P_{\text{linéaires}} + \Delta P_{\text{singulières}}$$

+ Pertes de charge linéaires :

$$\Delta P_{\text{linéaires}} = 2.f. \rho.L. \frac{V^2}{D}$$

+ Pertes de charges singulières :

$$\Delta P_{\text{singulières}} = \sum K. \rho. \frac{V^2}{D}$$

Donc

$$\Delta P_{\text{totales}} = 2.f. \rho.L. \frac{V^2}{D} + \sum K. \rho. \frac{V^2}{D}$$

Avec

f : Facteur de friction.

V : Vitesse de gaz (m/s).

D_c : Diamètres de la conduite (m).

L : Longueur de la conduite (m).

K : Module de perte de charge.

Calcul des pertes de charge linéaire :

Le facteur de friction : f

On a choisi une canalisation en acier allié au carbone rugueux avec un coefficient de rugosité

$$\varepsilon = 0.045 \text{ [23]}$$

$$\text{Donc la rugosité relative : } \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.045}{3.2} = 0.014$$

En se basant sur le diagramme de Mody (**annexe4**) et en respectant le nombre de Reynolds déterminé $Re = 7.8. 10^5$, on trouve que : $f = 0.042$

Donc

$$\Delta P_{\text{linéaires}} = 285.24 \text{ Pa}$$

Calcul des pertes de charge singulières :

$$\Delta P_{\text{singulières}} = \sum K. \rho. \frac{V^2}{D}$$

Où :

$$\sum K = 37.1 \text{ [24] (annexe5)}$$

$$\rho = 0.855 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 16.27 \text{ m/s}$$

$$D = 3.2 \text{ m}$$

Donc

$$\Delta p_{\text{singulières}} = 2687,63 \text{ Pa}$$

Les pertes de charge totale au niveau de la conduite :

Les pertes de charge totale dans la conduite est donc :

$$\Delta P_{\text{totales}} = \Delta P_{\text{linéaires}} + \Delta P_{\text{singulières}}$$

Donc

$$\Delta P_{\text{totales}} = 2972,87 \text{ Pa}$$

Donc la pression aéraulique devient :

$$P_u = \frac{2972,87 * 565371,56}{3600} = 466,88. 10^3 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-3}$$

Donc

$$P_u = 466,88 \text{ kW}$$

3. Puissance absorbée par le ventilateur final

La puissance absorbée est la puissance électrique consommée par le ventilateur. Elle est calculée par la relation suivante :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta}$$

Avec :

P_u : puissance transmise au fluide.

η : Rendement du moteur de ventilateur.

Où

$$\eta = 0,8$$

Donc

$$P_a = 583,6 \text{ kW}$$

4. Interprétation des résultats

Dans cette partie, on va faire la comparaison entre l'état de fonctionnement du ventilateur au mode direct lors de refroidissement des fumées air/air et le refroidissement eau/air.

Le tableau 17 présente les principaux résultats obtenus pour les deux cas :

Paramètre	Refroidissement air/air (sans pulvérisation)	Refroidissement eau/air (avec pulvérisation)
Débit des gaz aspirés par le ventilateur (m ³ /h)	668033	565371,56
Puissance électrique consommée par le ventilateur (kW)	786,3	583,6
Température des gaz à l'entrée de filtre à manches (°C)	188	170

Tableau 17 : principaux résultats

➤ Débit des gaz aspirés par ventilateur final

D'après les valeurs des débits des gaz représentés dans le tableau 17, on observe que le débit des gaz chauds aspirés par le ventilateur final a diminué de 668033m³/h à 565371,56m³/h, lorsqu'on a effectué un refroidissement des fumées en deux partie eau/air suivi par une dilution à air.

La réduction de volume des gaz exhauve revient au débit de l'air frais entrée par le registre, parce que ce dernier ne va pas s'ouvrir à 100% mais il va avoir une ouverture de 43% seulement

➤ Puissance électrique consommée par le ventilateur final

La puissance électrique absorbée par le ventilateur final lors de l'aspiration des gaz refroidis par le système air/air seul est très élevée par apport à celle consommée dans le cas où le refroidissement est effectué en deux partie eau/ air et air/air.

Puisqu'on est arrivé à diminuer le débit des gaz aspirés par le ventilateur final de 668033m³/h à 565371,56 m³/h, la consommation électrique du ventilateur a diminuée aussi de 786,3kW à 583,6kW car la puissance électrique est relié au débit des gaz aspirés.

➤ Température des gaz à l'entrée de filtre à manches

Par le refroidissement à air/air des fumées, on ne peut pas atteindre la température désirée qui est 170°C. Par contre au refroidissement des gaz par l'eau pulvérisée suivi par une dilution à air, on est arrivé à répondre à la consigne de l'opérateur et on s'est éloigné de la température limite 195°C, qui présente un risque sur les manches de filtre d'épuration des aériformes poussiéreux.

5. Gain relatif à la diminution de la puissance de ventilateur:

Les tranches horaires et les tarifs de vente sont définies dans le tableau 18 comme suit

Tranches Horaires	Heures	Tarifs de ventes (DH/kW)
Heures pleines	07h à 18h	0,9051
Heures de pointe	18h à 23h	1,4965
Heures Creuses	23h à 07h	0,5239

Tableau 18 : Tranches horaires de fonctionnement des ateliers et les tarifs de ventes

Le broyeur cru de la société HOLCIM Fès s'arrête à chaque jour trois heures dans la tranche des heures de pointe c'est dans cette période où le système de refroidissement s'utilise, donc on peut calculer le coût de la consommation annuelle du ventilateur en présence et en absence du système de refroidissement par pulvérisation de l'eau à partir du tarif de vente dans le mode direct.

- En présence de pulvérisation de l'eau :

La consommation électrique de ventilateur par heure est : $P_a = 583,6 \text{ kW/h}$

La consommation électrique de ventilateur par ans est : $P_a = 639917,4 \text{ kW/an}$

- En absence de pulvérisation de l'eau :

La consommation électrique de ventilateur par heure est : $P_a = 786,30 \text{ kW/h}$

La consommation électrique de ventilateur par ans : $P_a = 862177,9 \text{ kW/an}$

Donc la consommation électrique annuelle du ventilateur à diminuer de : $222260,5 \text{ kW/ans}$

Le gain relatif à la réduction de la consommation électrique annuelle du ventilateur final :

$$\text{Gain} = \text{puissance} * \text{le prix (heures de pointe)}$$

$$\text{Gain} = 332\,612,84 \text{ DH/an}$$

V. Conclusion

La proposition de la réalisation du refroidissement des gaz chauds en deux parties ,qui sont la pulvérisation de l'eau dans la conduite pour baisser la température de 240°C à 200°C suivi d'une dilution à air pour atteindre une température des gaz de 170°C , permet d'obtenir les résultats suivants :

- Diminution de débit des fumées de $668033 \text{ m}^3/\text{h}$ à $546533,06 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Réduction de la consommation électrique du ventilateur final de $786,3\text{kW}$ à $583,6\text{kW}$, avec un gain annuel de $332\,612,84 \text{ DH/an}$.
- L'obtention de la température consignée par l'opérateur qui est 170°C .

- Le débit de l'eau pulvérisée nécessaire pour le refroidissement des fumées est de 6,4l/s

Même si l'optimisation du volume des gaz aspirés par le ventilateur de tirage cheminé ainsi que la réduction de la consommation électrique de ce dernier, le débit de l'eau de refroidissement qu'on a calculé est très élevé, donc la société ne peuvent pas utiliser cette solution car l'industrie est soumis à une pression accrue pour optimiser les coûts et minimiser leur consommation de l'eau, tout en respectant des normes environnementales de plus en plus strictes.

Conclusion générale

Ce projet représente une étude sur l'optimisation du volume des gaz chauds circulant dans la ligne de cuisson avant son évacuation afin de soulager le ventilateur final qui souffre du grand volume de gaz qui aspire au mode direct.

Pour réaliser ce projet, un circuit des gaz chauds dans la ligne de cuisson est fait depuis sa récupération au niveau de refroidisseur du clinker jusqu'à l'évacuation des fumées dans l'atmosphère, suivi d'une étude de ventilateur final qui assure l'aspiration de tous les gaz circulant dans la ligne pour les deux modes (direct et composé) afin de déduire la source du problème qui est dans ce cas le débit de l'air frais entrant par le registre de la tour de conditionnement pour refroidir les gaz chauds. C'est pour cette raison on a fait l'étude de la fiabilité du refroidissement des fumées en deux partie :

- ✓ La première partie est un refroidissement par pulvérisation de l'eau pour baisser la température de l'ensemble gazeux à la tête des deux tours DOPOL de 240°C jusqu'à 200°C.
- ✓ La deuxième partie est un refroidissement par injection de l'air frais où les gaz étant refroidis ensuite de 200°C jusqu'à 170°C par dilution à l'air.

Où on a trouvé les résultats suivants :

- ✓ Le débit de l'air frais de la dilution des gaz chauds est : 70401,8 m³/h
- ✓ Le débit total des gaz aspirés par le ventilateur final est : 565371,56 m³/h
- ✓ La température finale des fumées à l'entrée de filtre à manche est : 170°C
- ✓ Le débit de l'eau de pulvérisation pour refroidir les fumées est : 6,4 l/s

Cette étude de la réalisation de refroidissement des gaz chauds par pulvérisation de l'eau qu'on a fait répond à l'optimisation du volume des gaz chauds à évacuer, mais le débit de l'eau nécessaire pour diminuer la température des fumées est très élevé, ce qui rend ce projet couteux et n'est pas rentable pour la société.

Ce stage a été pour moi très enrichissant sur le plan intellectuel, relationnel ou pratique.

- ✓ Sur le plan relationnel, on s'est intégré avec les équipes appartenant aux différents services de l'entreprise, on a pu communiquer avec les cadres, chefs et techniciens et les ouvriers
- ✓ Sur le plan intellectuel, on a été amenés à faire des recherches, à consulter des documents, à partager des points de vue avec différents cadres de l'entreprise.

Sur le plan pratique, nous avons pu concrétiser certaines connaissances acquises lors de mes études au cycle Master Matériaux et Procédée au sein de la FST FES.

Bibliographie et webographie

- [1] : <http://www.planete-tp.com/ciment-generalites-a516.html>
- [2] : <http://www.c-e-s-a.fr/chaux-de-saint-astier/les-chaux-de-saint-astier-procede-de-fabrication/>
- [3] : <http://www.alp-process.fr/broyage-broyeurs-industriels.php>
- [4] : <http://www.google.fr/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org>
- [5] : <http://www.directindustry.fr/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco-gmbh/product-62016-552481.html>
- [6] : <http://slideplayer.fr/slide/174677/>
- [7] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>
- [8] : <http://www.google.fr/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org>
- [9] : <http://www.google.fr/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fcimentquebec.com>
- [10] : <http://www.previnfo.net/sections.php?op=viewarticle&artid=52>
- [11] : <http://www.uae.ma>
- [12] : Documentations internes de HOLCIM Fès.
- [13] : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10869>
- [14] : <https://books.google.co.ma>
- [15] : <https://books.google.co.ma/books?id=ZnvoAwAAQBAJ&pg=PA195&lpg=PA195>
- [16] : <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/gaz-ideaux.html>
- [17] : http://www.thermexcel.com/french/tables/vap_eau.html
- [18] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique
- [19] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique_de_l%27air
- [20] : http://www.mecaflux.com/puissance_absorbee_utile_restitue.htm
- [21] : http://www.wattohm.fr/Perte-de-charge_a69.html
- [22] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9_dynamique
- [23] : http://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc_line.htm
- [24] : <http://pravarini.free.fr/Hydrodynamic2.htm>

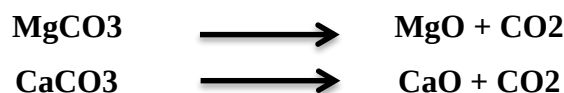
Annexe 1 : Les réactions de la formation du clinker dans la ligne de cuisson

La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée à 60% poursuit son parcours dans le four afin d'obtenir le clinker.

La formation du clinker se fait selon 3 étapes :

➤ Décarbonatation :

A l'entrée du four où s'achève la décarbonatation de la matière selon les deux réactions suivante:



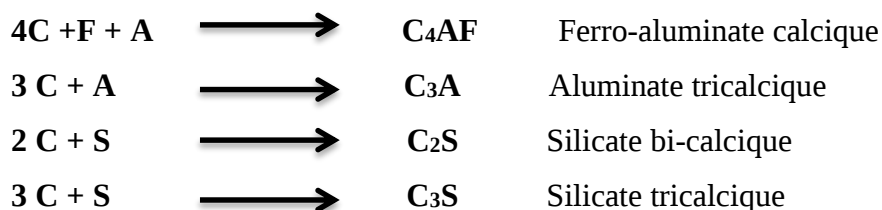
➤ clinkérisation :

Cette réaction se réalise au niveau de la zone la plus importante et la plus chaude du four rotatif qui s'appelle zone de clinkérisation ou de cuisson. En effet, la température peut atteindre 1450°C, ce qui permet la combinaison de $(\text{CaO})_2 \text{SiO}_2$ avec la chaux libre pour donner les cristaux de $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ qui grossissent et granulent, formant ainsi du clinker.

Dans ce qui suit, on notera :

- La chaux : CaO par C.
- La silice : SiO_2 par S.
- L'alumine : Al_2O_3 par A.
- Le ferrite : Fe_2O_3 par F.

Les réactions principales ayant lieu dans cette zone sont :



La chaleur nécessaire pour la réalisation de ces réactions est apportée par les gaz de combustion, qui sont transportés par l'air de transport aux zones de clinkérisation, de calcination et à la tour DOPOL.

Annexe2 : La pression totale des gaz chauds (gaz de DOPOL1, gaz de DOPOL2, gaz de middle air)

La pression totale des gaz chauds est mesurée par le tube de Pitot que l'entre dans un trou qui permet d'avoir l'accès à l'intérieur de la conduite.

L'opérateur mesure la pression totale du gaz au niveau de trois points pour les deux axes du diamètre de la conduite, pour calculer la moyenne de ces mesures afin d'avoir une pression totale précise.

➤ La pression totale du gaz de DOPOL1

Les mesures de la pression totale du gaz sont regroupées dans le tableau suivant :

mesure	Diamètre (mm)	Mesure sur l'axe 1 (mbar)		Mesure sur axe 2 (mbar)		Moyenne Δp (mbar)
		A	B	A'	B'	
1	279	0,79	0,86	1,15	0,92	0,93
2	562	0,91	0,85	0,89	0,87	0,88
3	1338	0,99	1,02	0,86	0,95	0,95
Valeur de 3 points de mesure						0,92

Tableau 1 : la pression totale du gaz de DOPOL1

➤ La pression totale du gaz de DOPOL2

Les mesures de la pression totale du gaz sont figurées dans le tableau 2 :

mesure	Diamètre (mm)	Mesure sur l'axe 1 (mbar)		Mesure sur axe 2 (mbar)		Moyenne Δp (mbar)
		A	B	A'	B'	
1	312	1,05	0,86	0,75	0,79	0,86
2	729	0,96	0,92	0,50	0,41	0,69
3	1271	0,96	0,82	0,44	0,61	0,70
Valeur de 3 points de mesure						0,75

Tableau 2 : Pression totale du gaz de DOPOL2

➤ La pression totale de l'air de middle air

Les mesures de la pression totale du gaz sont figurées dans le tableau 3 :

mesure	Diamètre (mm)	Mesure sur l'axe 1(mbar)		Mesure sur axe 2(mbar)		Moyenne Δp (mbar)
		A	B	A'	B'	
1	257	0,63	0,74	0,90	1,01	0,82
2	518	0,82	0,9	0,58	0,64	0,73
3	1232	0,93	0,9	0,68	0,71	0,80
Valeur de 3 points de mesure						0,78

Tableau 3 : Pression totale de l'aie de middle air

Annexe 3 : masse volumique des gaz chauds (gaz DOPOL1, gaz DOPOL 2 et middle air)

Dans la ligne de cuisson on la circulation de trois types de gaz chacun est caractérisé par sa propre température où la masse volumique des fumées varie en fonction de cette dernière selon la relation suivante :

$$\rho = \rho_0 * \frac{273,15}{T+273,15}$$

Où :

Dans les conditions normales de pression et de la température (CNTP), $\rho_0 = 1,285 \text{ kg/m}^3$, $P_0=1\text{atm}$ et $T = 0^\circ\text{C}$.

T : La température du gaz en $^\circ\text{C}$.

➤ La masse volumique du gaz de DOPOL1

Les gaz refoulés par le ventilateur relié à la tour DOPOL 1 présente une température de $T=320^\circ\text{C}$ donc la masse volumique est :

$$\rho = 1,285 * \frac{273,15}{320+273,15}$$

$$\rho = 0,59 \text{ kg/m}^3$$

➤ La masse volumique du gaz de DOPOL2

La température du gaz de DOPOL 2 est de 300°C , la masse volumique est :

$$\rho = 1,285 * \frac{273,15}{300+273,15}$$

$$\rho = 0,61 \text{ kg/m}^3$$

➤ La masse volumique du l'air de middle air

L'air de middle air subit un refroidissement dans l'échangeur air/air jusqu'à une température de 120°C , la masse volumique de cet air est :

$$\rho = 1,285 * \frac{273,15}{100+273,15}$$

$$\rho = 0,91 \text{ kg/m}^3$$

Annexe 4 : diagramme de Moody

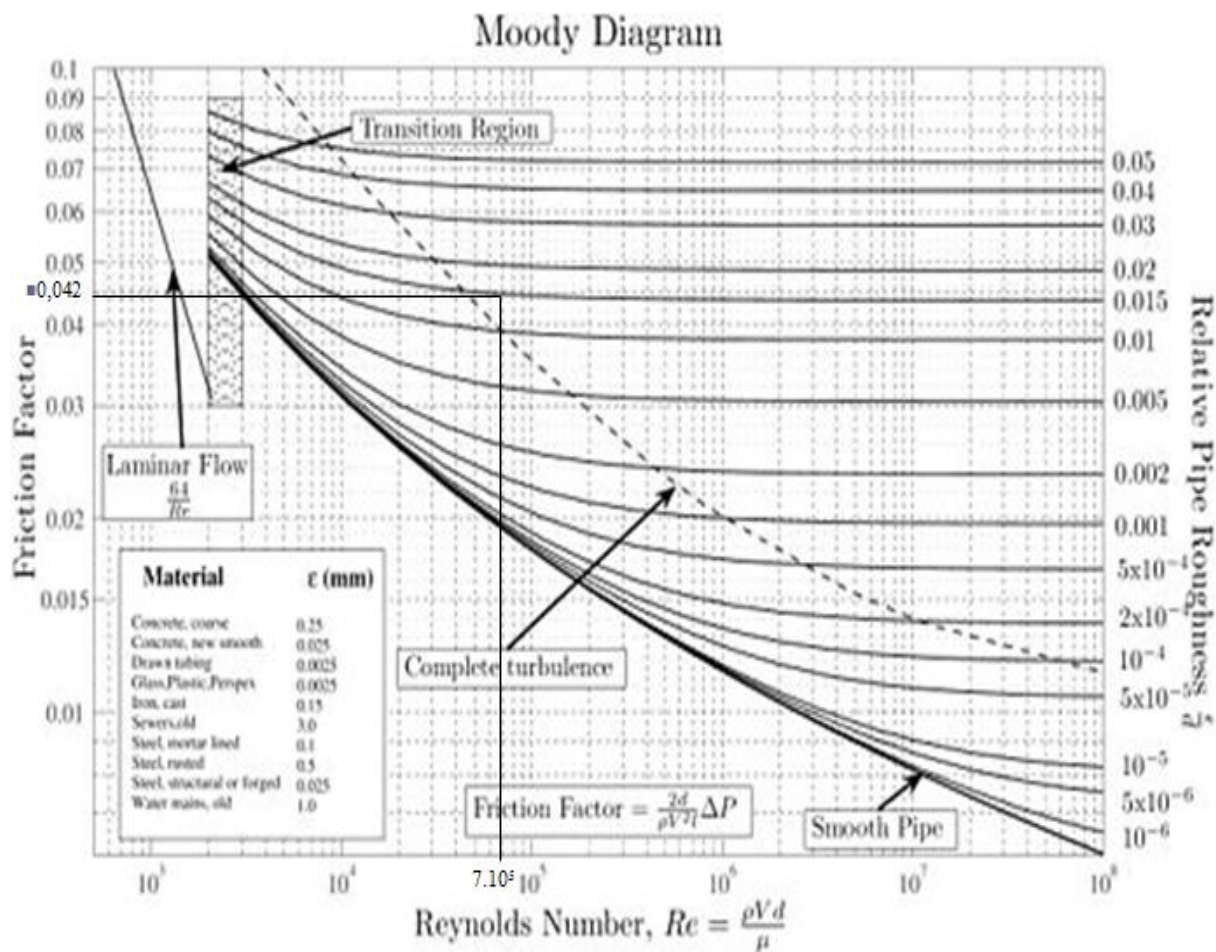


Figure 1 : Diagramme de Moody

Annexe 5 : Les modèles de perte de charge

Les modules de pertes de charge de chaque accident dans la conduite sont les suivant :

➤ Les coudes :

Le tableau suivant présente les coudes existant dans la conduite :

Coude	Nombre de singularités	K
Coude 30°	2	0,2
Coude 75°	1	1
Coude 90°	1	1,5

Tableau 4 : les coudes de la conduite principale

➤ Arrondissement :

Le tableau suivant présente les arrondissements qui existent dans la conduite principale :

	Nombre de singularités	r/D	Angle	k
Arrondissement (1)	1	1,5	135°	0,36
Arrondissement (2)	2	2	45°	0,16

Tableau 5 : Les arrondissements de la conduite principale

➤ Branchement d'amenée :

On calcule le rapport du débit dans le branchement d'amenée et le débit total (Q_a/Q), où :

Q_a : le débit de l'air frais entrant de l'extérieur (m^3/s)

Q : le débit du mélange gazeux circulant dans la conduite avant son refroidissement par l'air frais (m^3/s)

Donc le rapport des débits est :

$$\frac{Q_a}{Q} = \frac{70401,8}{441018,05}$$

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,12 \quad \text{donc : } K = 0,16$$

➤ Symétrique avec réunion des courants :

On calcule le coefficient K relatif à chaque conduite au point du rencontre des gaz de DOPOL1 et DOPOL 2 dans la conduite principale :

Coefficient K pour la conduite DOPOL1 :

On a :

$$K_1 = 2 + 3\left[\left(\frac{Q_{a1}}{Q}\right)^2 - \left(\frac{Q_{a2}}{Q}\right)\right]$$

Où :

Q_{a1} : débit volumique du gaz circulant dans la conduite DOPOL1 en (m³/s)

Q_{a2} : débit volumique du gaz circulant dans la conduite DOPOL2 en (m³/s)

Q : débit du mélange gazeux circulant dans la conduite principale (m³/s)

Donc :

$$K_1 = 2 + 3\left[\left(\frac{161483,04}{441018,05}\right)^2 - \left(\frac{234259,2}{441018,05}\right)\right]$$

$$K_1 = 1,6$$

Coefficient K pour la conduite DOPOL2 :

On a :

$$K_2 = 2 + 3\left[\left(\frac{Q_{a2}}{Q}\right)^2 - \left(\frac{Q_{a1}}{Q}\right)\right]$$

Donc :

$$K_2 = 2 + 3\left[\left(\frac{234259,2}{441018,05}\right)^2 - \left(\frac{161483,04}{441018,05}\right)\right]$$

$$K_2 = 1,74$$

➤ Clapet :

Le clapet qui existe dans la conduite principale d'acheminement des gaz directement vers le filtre à un angle d'ouvrage $\alpha = 30^\circ$

Donc : $K = 30$

Les pertes de charge singulières sont calculées en fonction des modules K relatifs aux accidents d'écoulement du flux gazeux lors de l'aspiration pour notre cas la somme de ces modules est :

$$\sum K = [(2 * 0,16) + 0,36 + 0,16 + (0,2 * 2) + 1 + 1,5 + 1,6 + 1,75 + 30]$$

$$\sum K = 37,1$$