



TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :LAFARGE au niveau mondial.....	12
Figure 2 : plantation de Lafarge au Maroc.....	14
Figure 3 :Répartition des ventes en 2012.....	15
Figure 4 : Organigrammede LAFARGE Meknès.....	17
Figure 5: Les éléments qui entrent dans la composition du ciment.....	23
Figure 6 :carrière	24
Figure 7 : hall de pré-homogénéisation.....	24
Figure 8 : broyeur à galets.....	25
Figure 9 : Préchauffeur a cyclones avec précalcinateur pour l'alimentation du four.....	26
Figure 10 : Aspect de clinker après refroidissement.....	27
Figure 11 : les éléments constitutants du refroidisseur.....	30
Figure 1 2 : Vue en coupe du refroidisseur ETA avec trois zones de flux d'air.....	32
Figure 1 3 : principe de déplacement d'un refroidisseur ETA à cinq couloirs.....	32
Figure 1 4 : Refroidisseur du clinker.....	33
Figure 1 5 : perte de pression d'un refroidisseur.....	34
Figure 1 6 : Répartition du soufflage sur 6 chambres avec 9 ventilateurs.....	34
Figure 1 7 : température clinker en fonction de l'air de refroidissement.....	35
Figure 1 8 : évolution du rendement, facteur de récupération et le débit soufflé au cours des années 2008 à 2012.....	39
Figure 19 :Diagramme causes à effets	40
Figure 20 :Tuyère du four	41
Figure 21 : vue en coupe de la tuyère	42
Figure 22 : effet de la hauteur du lit de kk sur la température de sortie kk	44
Figure 23 : effet de la hauteur du lit de kk sur l'efficacité du refroidisseur	44
Figure 24 : Débit de soufflage avant modification	45
Figure 25 :Débit de soufflage aprèsmodification	46
Figure 26 :évolution des pourcentages des refus à 63 μ m et 200 μ m	47
Figure 27 : évolution de la température aire secondaire et tertiaire	51



LISTE DES TABLEAUX

Tableau1 : les différents types du ciments selon les pourcentages des ajouts.....	23
Tableau2 : Historique de la consommation calorifique.....	39
Tableau 3 : résultat bilan 1- bilan 2	51

ANNEXES

NOMENCLATURE :

AC : Air soufflé
AE : Air exhaure
AS : Air secondaire
AT : Air tertiaire

Cadem : ciment artificiel de Meknès
CC : consommation calorifique (th/t)
Cp : capacité thermique massique a pression constante (J/kg)
h : enthalpie massique (J)
K :facteur de récupération
KK : clinker
KK_{in} : clinker entrée refroidisseur
KK_{out} : Clinker sortie refroidisseur
M : ratio de soufflage
Préca : Précalcinateur
Pré homo : Pré homogénéisation
Q : volume massique (m³/kg)
T : Température

η : efficacité (%)

ρ: rendement de récupération (%)

.

GLOSSAIRE:

Béton :matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats naturels (sable, gravillons) ou artificiels (granulats légers) agglomérés par un liant.

Chaux industrielle: Oxyde de calcium utilisé comme base de nombreuses pierres.

Clinker (kk) : désigne la matière qui sort de la tour de préchauffage et qui pénètre dans le four.

CPA55 : Le ciment portland artificiel 55 est constitué du clinker (95 à 100%) et du gypse. La résistance moyenne minimale à 28 jours est de 52MPa.



CPJ : Le ciment PORTLAND avec ajouts contient au moins 65% de clinker, du gypse, le reste étant des ajouts tel que : le calcaire, les cendre volantes, laitiers de hauts fourneaux et la pouzzolane. Selon la résistance que présentera ce ciment à 28 jours on spécifie :

- **Le CPJ 35** : dont la résistance moyenne à 28 jours est de 35 MPa.
- **Le CPJ 45** : ayant une résistance moyenne à 28 jours de l'ordre de 45 MPa

Cru, encore appelé **Farine** : désigne la matière tout au long du processus de fabrication du ciment.

Enthalpie : une fonction d'état extensive de la thermodynamique, dont la variation permet d'exprimer la quantité de chaleur mise en jeu pendant la transformation à pression constante (isobare) d'un système thermodynamique au cours de laquelle celui-ci reçoit ou fournit un travail mécanique.

Granulats : est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm, destiné à entrer dans la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment.

Module HE : module haute efficacité

PCI: Pouvoir Calorifique Inférieur, c'est la quantité de chaleur libérée par 1 Kg de combustible, tout en conservant l'eau à l'état de vapeur

PCS :

Plâtre : est un matériau de construction ignifuge. Il est utilisé sous forme de pâte constituée d'un mélange de poudre et d'eau, ou préparé sous forme de plaques.

Refus : Représente le pourcentage des grains de combustible après opération de tamisage ayant un diamètre supérieurs à celui du tamis.

Thermie: 1 thermie = $4,18 \cdot 10^6 \text{ J} = 10^6 \text{ Kcal}$

Tuyère : A en croire les techniciens, la tuyère représente « le cœur de l'usine ». Elle est indispensable à la formation du clinker. Une bonne combustion passe par une optimisation de la flamme de la tuyère : il faut en effet que celle-ci ne soit ni trop longue, ni trop large.

La grandeur qui influe sur la longueur est : **l'impulsion**.

Les grandeurs qui influent sur la largeur sont : **leswirlet l'angle de rosace**.

SOMMAIRE

<u>Introduction.....</u>	9
--------------------------	---

CHAPITRE 1 : Présentation de l'organisme d'accueil

<u>I. Lafarge dans le monde.....</u>	12
<u>II- LAFARGE au Maroc.....</u>	12



<u>III-Présentation de LAFARGE de Meknès</u>	9
<u>III.1 Historique :</u>	14
<u>III.2 Fiche Signalétique.....</u>	15
<u>III.3.Micro environnement de l'entreprise.....</u>	16
<u>III.4.Organigramme</u>	17
<u>IV-Présentation des services de LAFARGE de Meknès</u>	18
<u>IV.1 SERVICE CARRIERE</u>	18
<u>IV.2 SERVICE FABRICATION</u>	18
<u>IV.3 SERVICE ELECTRIQUE ET REGULATION.....</u>	18
<u>IV.4 SERVICE COMMERCIAL.....</u>	18
<u>IV.5 SERVICE SECURITE</u>	19
<u>IV.6 SERVICE FINANCE GESTION :.....</u>	19
<u>IV.7 SERVICE RESSOURCES HUMAINES:</u>	19
<u>IV.8 SERVICE D ACHAT</u>	19
<u>IV.9 SERVICE DU CONTROLE QUALITE</u>	19
<u>IV.10 SERVICE BUREAU D ETUDE.....</u>	20
<u>IV.10 SERVICE PROCEDURE.....</u>	20

CHAPTRE 2 : présentation de la ligne de production

Partie1 :Description des produits fabriqués par LAFARGE Meknès

<u>I. Composition du ciment.....</u>	22
<u>1-Définition du ciment.....</u>	22
<u>2-Différents types de ciments.....</u>	22
<u>Partie 2 : Procédé de la fabrication du ciment.....</u>	24



<u>I. La préparation du cru.....</u>	24
<u>A. Carrière et concassage.....</u>	24
<u>B. Pré-homogénéisation.....</u>	24
<u>C. Broyage cru.....</u>	25
<u>D - Homogénéisation.....</u>	25
<u>II. Les différentes étapes de la cuisson.....</u>	26
<u>A. Préchauffage.....</u>	26
<u>B. Pré-calcination.....</u>	26
<u>C. Clinkérisation</u>	26
<u>D. Refroidissement</u>	27
<u>E. Broyage ciment.....</u>	27
<u>F. Stockage et ensachage.....</u>	28

Chapitre 3: REALISATION DU PROJET

<u>I. CONTEXTE.....</u>	30
<u>1- refroidisseur Claudius Peters</u>	30
<u>2- Les différents constituants du refroidisseur “ ETA”</u>	30
<u>3- les fonctions principales du refroidisseur</u>	33
<u>4 - principe de fonctionnement</u>	33
<u>5- Distribution d’air dans le refroidisseur.....</u>	34
<u>6- Comment mesure-t-on la performance d’un refroidisseur?</u>	36
<u>II. premier bilan thermique.....</u>	38
<u>II.1. synthèse</u>	38
<u>II.2. plan d’actions.....</u>	41
🔧 <u>Action 1 : Amélioration de la Qualité de la combustion.....</u>	41
🔧 <u>Action 2 : Changement PID pression de référence.....</u>	43
🔧 <u>Action 3 : Augmentation de la hauteur du lit de clinker.....</u>	44



 Action 4 : Modification de la densité de soufflage des ventilateurs.....	45
 Action 5 :Augmentation de la finesse du coke	46
III. Deuxième bilan thermique.....	47
II.1.synthese	47
II.2.resultat	50
Conclusion.....	52

INTRODUCTION

Avec une croissance progressive du marché cimentier marocain marquée par une stagnation des prix de vente aussi bien qu'une augmentation des prix des entrants, Lafarge et plus particulièrement sa division cimentière ont adopté un système de management par performance dans toutes ses unités de fabrication au Maroc. La consommation calorifique fait partie des indicateurs clés de ce système. L'usine de Meknès est classée comme première consommatrice d'énergie thermique malgré sa modeste capacité de production dans le groupe.

Dans ce contexte, une problématique se pose. Tout d'abord, la consommation calorifique doit être optimisée, vu qu'elle dépasse largement son objectif. Ensuite, donner des directives de l'optimisation globale de la consommation de l'usine.

La question qui se pose dans le cadre de notre sujet est donc :



Quels sont les axes à solliciter afin de proposer et de suivre des plans d'actions, et sur quoi il faut agir pour garantir un bon niveau de performance en terme de consommation calorifique ?

Pour répondre à ces questions nous essayerons d'explicitier davantage le contexte et la problématique de l'étude. Puis, nous proposerons notre démarche. Ensuite, nous détaillerons les résultats que nous avons obtenus avec leurs justifications.

Pour traiter notre sujet nous avons opté à mettre l'accent sur trois chapitres :

Dans le premier chapitre Nous allons présenter l'organisme d'accueil, concernant le deuxième nous allons traiter la ligne de production et finalement nous allons aborder l'optimisation des performances du refroidisseur par récupération des gaz chauds en vue d'Optimiser la consommation calorifique.

abstract

With progressive growth of the Moroccan cement market characterized by stagnation in sales prices as well as an increase in input prices, especially Lafarge cement his division have adopted a system of management by performance in all its manufacturing units in Morocco . The heat input is one of the key indicators of this system.

The plant is classified as Meknes largest consumer of thermal energy despite its modest capacity in the group.

In this context, a problem arises. First, heat consumption of kiln number one must be optimized, for it far exceeds its target. Then, give directions to the overall optimization of the plant consumption.

The question that arises in the context of our topic is:

What are the areas to seek to propose and monitor action plans, and what action is needed to ensure a good performance in terms of heat consumption?

To answer these questions we will try to further explain the context and the problem of the study. Then we propose our approach. After that, we detail the results we have developed with their justifications. Finally, we outline the follow-up to the work of optimization.

To treat our subject we chose to focus on three chapters:



In the first chapter we will present the host organization, on the second we present the production line and finally we discussed performance optimization of regenerative cooling of hot gases to optimize caloric intake.

Chapitre 1: *Présentation de l'organisme d'accueil*



I. Lafarge dans le monde :

Le groupe LAFARGE est le numéro 1 mondial des matériaux de construction, il rassemble 80000 collaborateurs dans 76 pays et a réalisé un chiffre d'affaire de 16 milliards d'euros en 2009. Il exerce des activités dans le ciment, les bétons, les granulats, les plâtres, les produits de spécialités et dans les bios activités. Il occupe la deuxième place mondiale sur le marché du ciment avec 57 usines





réparties dans plus de 15 pays.

Figure 1 : LAFARGE au niveau mondial

II. Lafarge au Maroc :

C'est à partir de 1912 que le ciment commençât à être utilisé au Maroc, d'abord pour certaines réparations, puis pour les constructions principalement à Casablanca. La construction du port de Casablanca nécessita des quantités importantes de ciment, qui était à l'époque importé.

C'est alors que fut décidée en 1913, l'implantation de la première cimenterie à Casablanca avec une capacité de production annuelle de 10 000 tonnes.

L'accroissement des besoins nationaux en ciment a engendré l'extension de l'usine de Casablanca et la création de nouvelles unités. La cimenterie de Casablanca a renforcé son potentiel de production pour atteindre les 19 000 tonnes par an en 1949 :

La création d'une nouvelle usine à Agadir a eu lieu en 1952 avec une capacité de production de 60 000 T/ an.

Le démarrage de la cimenterie de Meknès a eu lieu en 1953 avec un nominal de production de 150 000 T/an.

Dans le Nord du pays, deux unités ont vu le jour à Tanger en 1953 (60 000 tonnes / an) à Tétouan en 1954 (86 000 T / an).

C'est ainsi qu'à la veille de l'indépendance, le niveau de production du ciment au Maroc approchait les 850 000 tonnes. Alors que, de nos jours, le Maroc produit environ 700 000 T/ an, assurant ainsi son autosuffisance depuis 1982.

Ce résultat exemplaire a été obtenu grâce à la conjugaison des efforts des secteurs privés et publics pour doter le pays d'une industrie cimentière capable de faire face aux besoins croissants du Maroc dans tous les domaines de construction : (l'habitat, les travaux publics, l'infrastructure sociale, touristique, agricole...).

Mais la naissance officielle de « Lafarge Maroc » a eu lieu le 01 Juin 1995, lors de la signature d'une convention de partenariat entre SNI¹ (Société Nationale d'Investissement) et Lafarge qui aboutit à la création d'un Holding (50% LAFARGE et 50% SNI), mais notons que la SNI est achetée par ONA² donc (50%LAFARGE et 50%ONA). La première conséquence de ce partenariat pour l'entreprise, est de pouvoir disposer d'une structure financière forte.

Aujourd'hui, Lafarge Maroc occupe la place de leader sur le marché et notons que l'activité essentielle de Lafarge est issue de la production de ciment (85% des ventes de l'entreprise).

¹Société Nationale d'Investissement

²Omnium Nord Africain

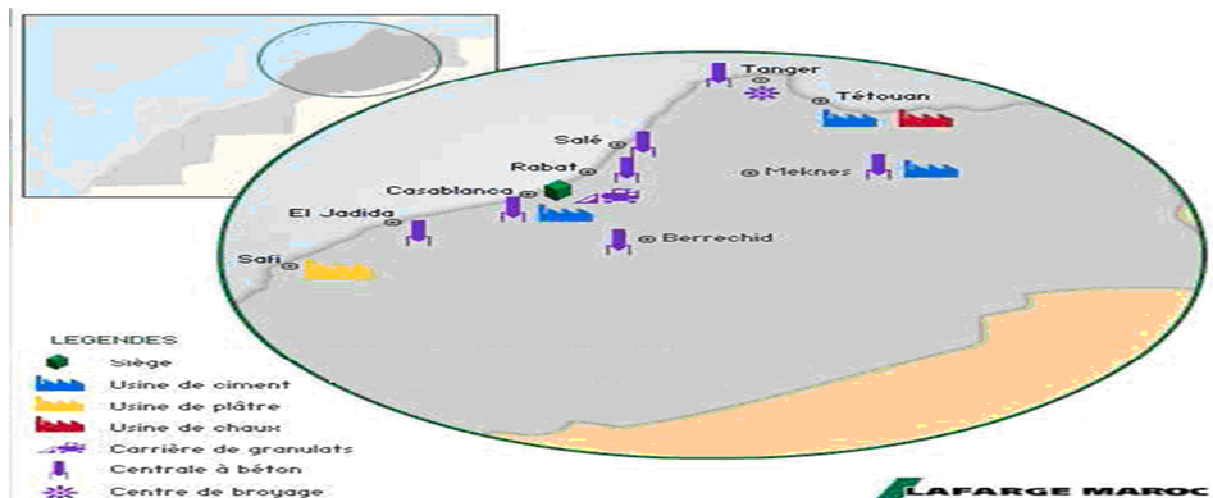


Figure 2 : plantation de Lafarge au Maroc

- **Ciment** : 3 cimenteries (Bouskoura, Meknès, Tétouan) et unestation de broyage (Tanger) d'une capacité annuelletotale de production de 5,4 MT.
- **Plâtre** : Usine de plâtre de construction et de plâtre industriel, decarreaux de plâtre et de dalles pour plafond à Safi, d'unecapacité de production de 200 000 tonnes / an.
- **Béton** : 7 centrales à béton pour une capacité de 1 100 000 m³.



- **Granulats** : Une usine à Berrechid d'une capacité de production de 360 000 m³ conçue pour assurer l'approvisionnement du dispositif bétonnier.
- **Chaux industrielle** : Installée sur l'ancien site de Tétouan, d'une capacité de 80 000 t / an

III. Présentation de LAFARGE de Meknès

III.1. Historique :

La cimenterie de Meknès, où nous avons effectué notre stage, est située au Nord-Est de la ville de Meknès. Elle était créée en 1952 sous le nom de CADEM³ avant son intégration au groupe Lafarge Ciments en 1996. Elle a connu, au fil des années, des augmentations progressives de sa capacité de production en passant de 400 t/j du Clinker⁴ à 3000 t/j actuellement.

³Ciment Artificiel de Meknès

⁴produit de base de fabrication du ciment. Symbole (kk)

⁵Ciment Portland avec Ajouts PM : Prise mère PZ : pouzzolane

Les qualités vendues par l'usine de Meknès sont : CPJ355, CPJ45, CPJ45PM, CPJ45PZ, CPJ55, Ciment Blanc

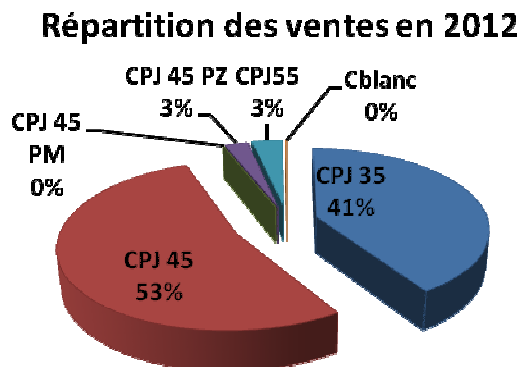


Figure 3: Répartition des ventes en 2012

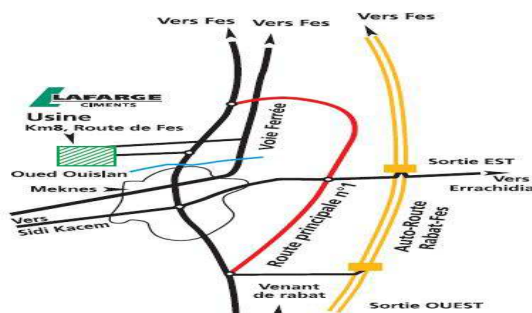
III.2. Fiche signalétique

❖ **Dénomination** : LAFARGE Ciments (Usine de Meknès)



- ❖ **Siège social** : Km 8, route de Fès, BP : 33 Meknès ;
Standard : 05-35-52-26-44/45/46, Fax : 05-35-54-93-07
Direction usine : 05-35-54-92-93, Fax : 05-35-54-92-94
- ❖ **Nature juridique** : Société anonyme
- ❖ **Capital social** : 476 430 500 DH
- ❖ **Répartition du capital** : LAFARGE 50% et ONA 50%
- ❖ **Produits fabriqués** : Ciment portland avec ajouts **CPJ45** en sac et en vrac.
Ciment portland avec ajouts **CPJ35** en sac.
Ciment portland avec ajouts **CPJ55** en vrac.

Localisation :



III.3. Micro environnement de l'entreprise :

Le personnel de l'usine Lafarge est réparti de la façon suivante :

- Cadres : 19
- Agents de maîtrise supérieurs : 13
- Agents de maîtrise moyens : 14
- Agents de maîtrise simples : 29
- Employés : 23
- Chefs d'équipes : 37
- Ouvriers qualifiés : 119
- Main d'œuvres : 17
- Sous traitants : 19



III.4.Organigramme

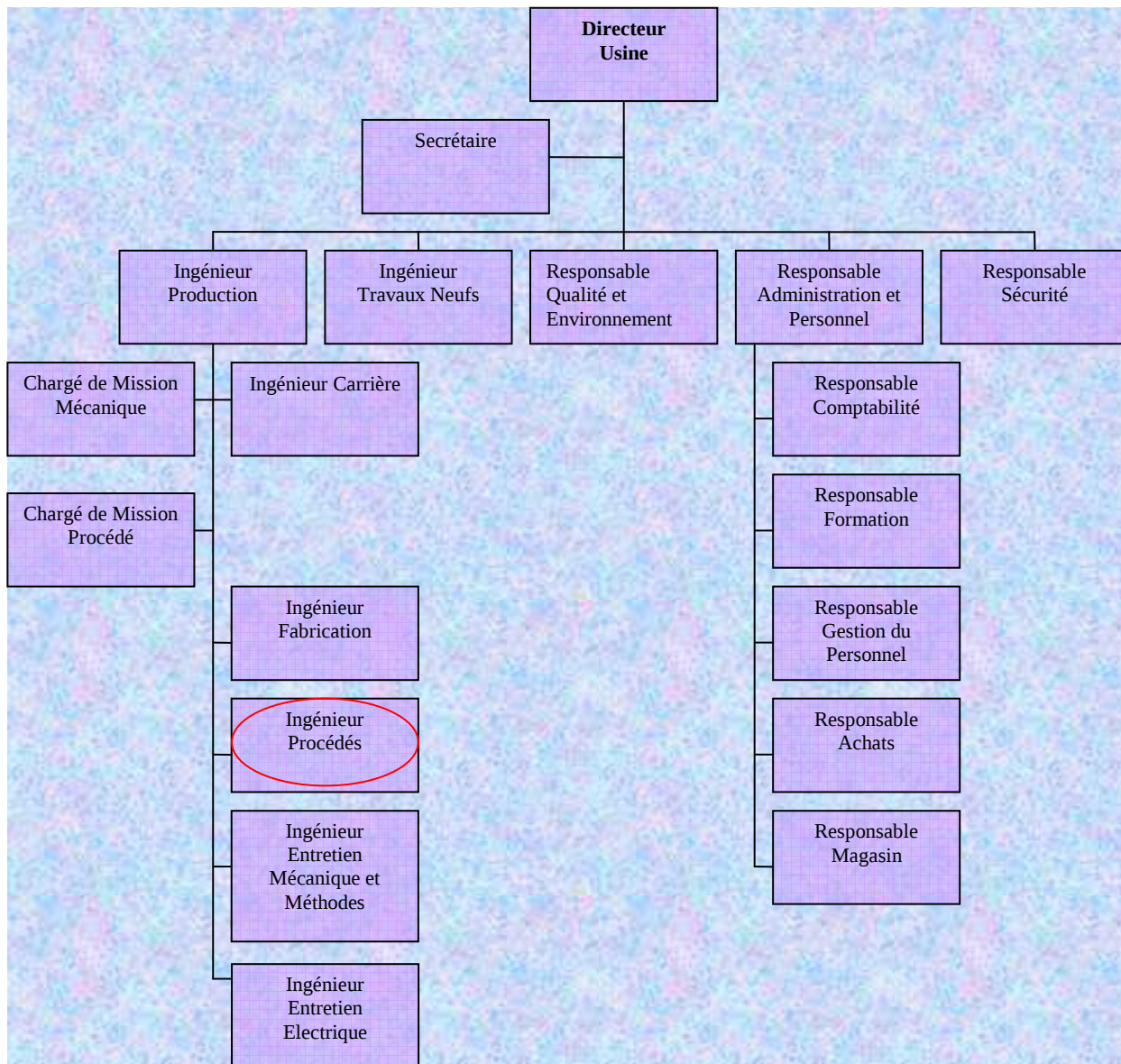


Figure 4 : Organigramme de LAFARGE Meknès



IV. Présentation des services de LAFARGE de Meknès:

En partant de l'extraction des matières premières jusqu'à l'obtention du ciment, ce processus de fabrication nécessite l'existence de plusieurs services s'occupant chacun d'une ou plusieurs tâches.

IV.1. Service carrière:

Il permet l'approvisionnement en matières premières : Calcaire, argile. Celles-ci sont extraites sur un site à 5km de l'usine et sont concassées sur un concasseur appelé l'HAZMAG. Elles sont ensuite acheminées par transporteur de 5km appelé CURVODUC.

IV.2. Service fabrication :

Les ateliers composant la fabrication du ciment (concassage de la matière première, pré homogénéisation, broyage cru, cuisson, broyage cuit...) fonctionnent automatiquement, leur suivi se fait à partir d'une salle de contrôle. Le service fabrication est donc composé de chefs de postes, d'opérateurs et de rondiers qui assurent la production 24h/24h.

IV.3. Service électrique et régulation :

Il intervient à la demande du service fabrication. Il s'occupe de tout ce qui est moteurs électriques, transformateurs, automates, variateurs de vitesses, instrument, régulation permettant de contrôler et d'observer les différents paramètres rentrant en jeu dans la supervision tels que la température, les pressions, les débits...

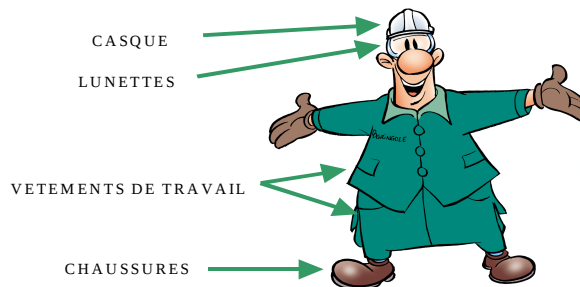
IV.4. Service commercial

Ce service est le plus mouvant car il permet de fixer les objectifs de vente de ciments à une clientèle bien identifiée. Son travail se base sur la réception des bons de commande et des effets de commerce, la saisie des commandes et des bons de livraison.



IV.5. Service de sécurité:

Il est le moteur pour la réalisation et l'encadrement de l'effectif de l'usine pour produire un ciment avec un objectif de zéro accident, il a pour mission l'animation de la sécurité, le soutien de la hiérarchie en matière de sécurité, l'animation d'un comité de sécurité usine, l'instauration des procédures de sécurité, le reporting sécurité et la gestion du réseau sécurité inter usines.



IV.6. Service

finance gestion :

Ce service a pour mission la gestion de la comptabilité générale et analytique dans le but d'assurer une conformité à la réglementation et la législation. Pour se faire, le service assure la gestion des procédures comptables, fiscales et financières, la gestion des processus budgétaires, la consolidation reporting, l'analyse des coûts avec le siège.

IV.7. Service ressources humaines :

Il se charge de la gestion des ressources humaines, et plus précisément la gestion administrative du personnel non cadre, l'application de la législation du travail, la gestion des relations avec les représentants du personnel, l'instauration d'un bon climat social, l'établissement des plans de formation et l'assurance d'une parfaite communication interne.

IV.8. Service d'achat :

Il a pour principale mission la gestion des stocks suivant la politique des achats du groupe et le respect des procédures également du marketing-achats, l'homologation des fournisseurs commandes et le suivi des livraisons.

IV.9. Service du contrôle qualité:

LAFARGE CEMENTS, Usine de Meknès est dotée d'un laboratoire équipé de tous les équipements nécessaires à la réalisation des contrôles depuis la réception des matières premières jusqu'aux



expéditions du produit fini et ce conformément aux normes en vigueur et aux besoins de la clientèle. Le personnel de ce laboratoire ayant en charge le contrôle de la qualité est compétent et suit des formations continues en matière de contrôle de qualité et selon un planning de formation préétabli.

Ce laboratoire est divisé en plusieurs départements, agencés de telle sorte à assurer une bonne réception, identification, et conservation des échantillons ainsi que la réalisation de tous les essais.

IV.10.Service bureau d'étude:

Procédure : Création ou modification d'installation MKS (usine de Meknès).

Objet : Conception et réalisation de nouvelles installations de maintien, progrès, qualité, environnement et sécurité.

Domaine d'application : usine de Meknès.

Pilote du processus : Ingénieur travaux neufs usine de Meknès

Éléments d'entrée : Fiches d'investissement, cahiers de charges fonctionnels, plan développement usine

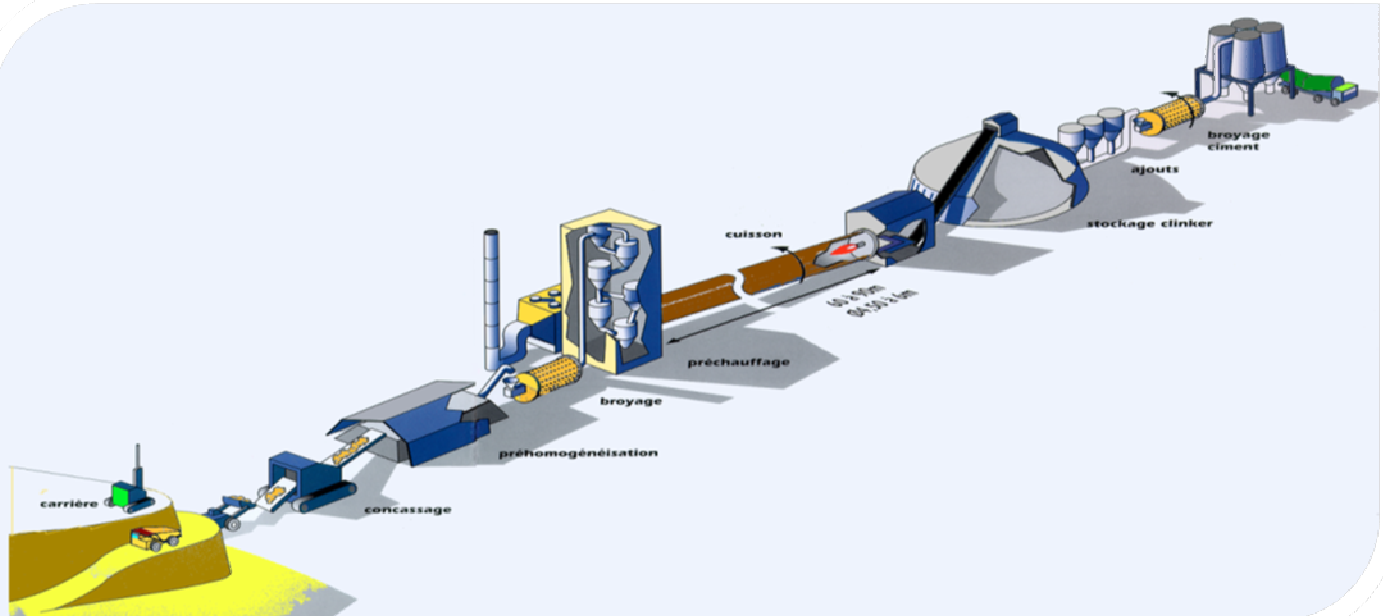
Éléments de sortie : Installation mise à disposition

IV.11.Service procédé:

Le service procédé est un service qui s'intéresse aux différents procédés s'effectuant au sein de l'usine ; il contrôle en collaboration avec les services de fabrication et de qualité le processus de fabrication du ciment, aussi cherche-t-il à optimiser les paramètres de réglage de différentes installations (cuisson, broyage...). En effet des audits et des tests de performance se réalisent systématiquement dans le but d'améliorer le rendement des unités de production.



Chapitre 2: *Présentation de la ligne de production*



Partie1:Description des produits fabriqués par LAFARGE Meknès

I. Composition du ciment :

1. Définition du ciment

Tout d'abord avant de citer les différentes étapes de fabrication du ciment définissant le ciment: il s'agit d'un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment est un constituant de base du béton.

2. Différents types de ciments :

LAFARGE MAROC s'intéresse à la fabrication des trois catégories du ciment, à savoir : CPJ35, CPJ45, CPJ55 et CPA55. Concernant le ciment blanc, le groupe l'importe sous forme de matière cuite (clinker) pour être broyé et mis en sacs en vue de son expédition.

En outre, les trois types de ciments (CPJ35, CPJ45, CPA55) se différencient selon des pourcentages précis des ajouts au clinker.

Ciments Compositions	CPJ35	CPJ45	CPA55
Calcaire	35.60%	24.00%	0.00%
Cendres volantes	3.21%	6.52%	0.00%
Gypse	2.80%	3.14%	5.64%
Clinker	58.39%	66.34%	94.36%

Tableau1 : les différents types du ciment selon les pourcentages des ajouts

La figure suivante résume les éléments qui entrent dans la constitution du ciment:





Figure 5: Les éléments qui entrent dans la composition du ciment

Partie 2 : Procédé de la fabrication du ciment

I. La préparation du cru

1. Carrière et concassage

Lafarge ciments Meknès exploite une carrière qui fournit deux matières premières : le calcaire et le schiste. L'extraction de ces roches se fait par abattage à l'explosif. Il consiste à fragmenter le massif exploité. Les matières concassées sont ensuite stockées par qualité dans le hall de stockage de l'usine.

Le concassage est une opération qui consiste à réduire la granulométrie de la matière première en fragments de faibles dimensions. Elle assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière. En effet, le calcaire et le schiste transportés sont déchargés dans une trémie qui est reliée à un alimentateur à vitesse variable (doseurs) qui permet de réguler le débit d'alimentation.



Figure 6 :carrière d'exploitation de la matière première

2. Pré-homogénéisation

Après concassage des blocs extraits de la carrière, on mélange, de façon aussi homogène que possible, leurs différents composants et les ajouts déterminés lors de la formulation. C'est la phase de pré-homogénéisation.

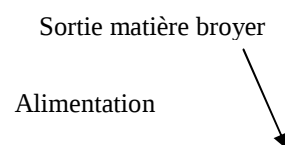


Figure 7 : hall de pré-homogénéisation

3. Broyage cru

Le broyage est nécessaire après l'étape de pré homogénéisation, il procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir la granulométrie adéquate pour faciliter leur cuisson.

La fragmentation de mélange (matière pré homo +les correcteurs) est assurée par deux broyeurs verticaux de type loesche LM27-30 à 3 galets avec une capacité comprise entre 140-180 et 150-190 t/h chacun et une puissance de 1200kw.



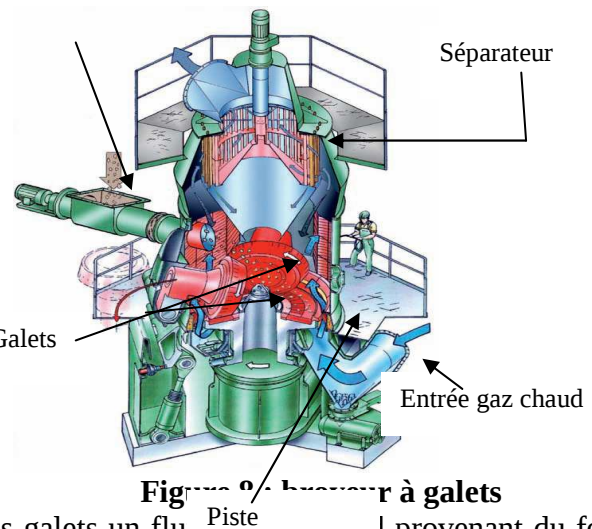


Figure 2 : broyeur à galets

Après écrasement de la matière entre la piste et les galets un flu ^{Piste} provenant du four assure le séchage et le transport pneumatique de la matière, un séparateur intégré à la machine permet de régler la finesse du produit final : les grosses particules retombent sur le plateau de broyage tandis que les fines sont entraînées par le flux de gaz vers des séparateurs afin de faire une séparation solide /gaz, la farine récupérée par les filtres est acheminée vers le silo farine.

4. Homogénéisation

A la suite du broyage et après séparation, les matières premières sont transformées en une poudre de grande finesse appelée dans le jargon cimentier « Farine ». Cette farine doit présenter une composition chimique aussi constante que possible. Ces matières premières sont acheminées vers des silos dans lesquelles elles sont homogénéisées.

L'opération d'homogénéisation complète le processus de pré homogénéisation préalable, elle permet d'obtenir un produit de caractéristiques chimiques uniformes qui permettent la fabrication d'un clinker de qualité constante. La préparation de la matière première est maintenant achevée.

II. Les différentes étapes de la cuisson

1. Préchauffage

L'opération commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation. Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés verticalement sur plusieurs étages, appelée " Préchauffeur". La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C.

2. Précalcination

Elle se fait dans le précalcinateur placé entre le préchauffeur et le four. La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le

four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre 650 et 900°, permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux nécessaire à la fabrication de clinker selon la formule suivante :

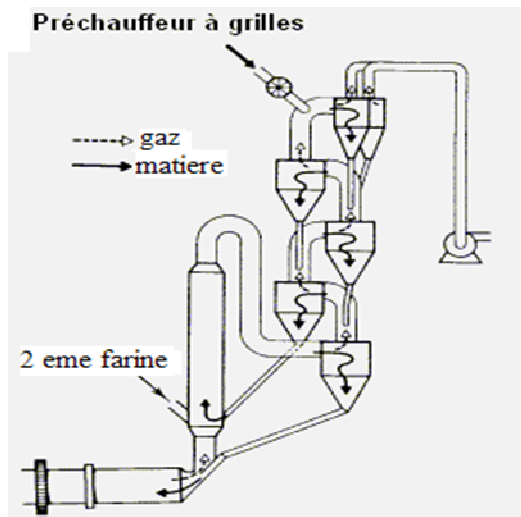
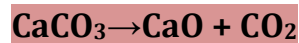
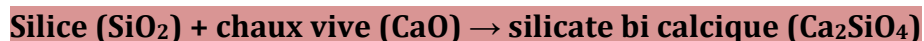
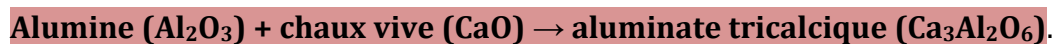


Figure 9: Préchauffeur a cyclones avec précalcinateur pour l'alimentation du four.

3. Clinkérisation

Après un certain temps de progression dans le four (environ 45min), le cru atteint une température de 1450°C, où il se transforme alors en "clinker": c'est la zone dite de clinkérisation.

La transformation du cru en clinker se caractérise par un changement de la structure moléculaire. Les composants de l'argile (principalement silicates d'alumine et oxydes de fer) se combinent à la chaux provenant du calcaire et donnent des silicates et des aluminates de calcium, molécules qui réagiront avec l'eau pour la prise du ciment.



Le clinker qui se trouve sous la forme liquide dans le four, est immédiatement sorti de celui-ci vers le refroidisseur.

4. Refroidissement

Le clinker subit un refroidissement brusque à l'air (trempe) dans un refroidisseur situé à l'aval du four, tout en gardant sa nouvelle structure chimique et se présente finalement sous forme de granules de 2 cm de diamètre .



Figure 10:Aspect de clinker après refroidissement

III. Broyage ciment

Après refroidissement, les granules de clinker sont ensuite broyées avec addition de gypse. Cette addition a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Le pourcentage du clinker permet de conférer au ciment des propriétés spécifiques correspondant aux différentes qualités du ciment (CPJ35 ; CPJ45 ; CPA55).

Le ciment fini est orienté vers les silos de stockage et de livraison. Le transport s'effectue pneumatiquement dans des tuyauteries grâce à des pompes spéciales.

IV. Stockage et ensachage

Le ciment est expédié par des pompes à vis à l'aide des compresseurs d'air vers des silos destockage du produit fini.

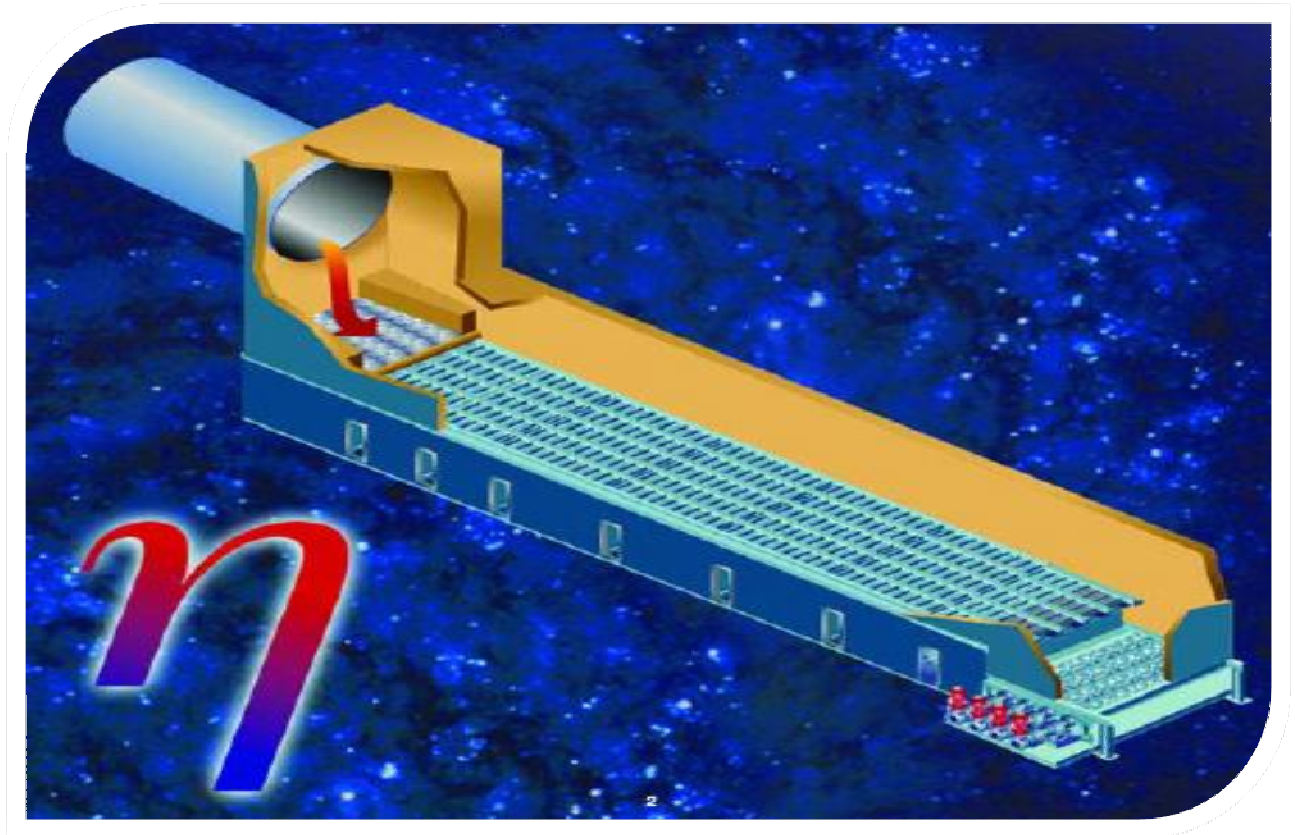
Lafarge dispose de 2 silos d'environ 5000 tonnes, et 4 silos de 2000 tonnes chacun. La capacité de stockage totale est d'environ 18000 tonnes de ciment.

La livraison du ciment se fait soit en sacs, soit en vrac. Pour ceci, l'usine dispose de 3 ensacheuses rotatives (Haver-Bocker), et une station de chargement du vrac.



Chapitre 3:
Optimisation des performances du
refroidisseur par récupération des gaz
chauds en vue d'Optimiser la
consommation

calorique



I. Contexte :

L'optimisation de la consommation calorifique est une politique de Lafarge pour concurrencer le développement du marché cimentier marocain et de maintenir ses performances.

L'élément le plus important à optimiser sur le circuit aéraulique est le refroidisseur, il a une influence déterminante sur les performances et l'économie de l'installation.

1. Refroidisseur Claudius Peters :

Depuis plus d'un demi-siècle, Claudius Peters est reconnu par l'industrie cimentière mondiale comme un spécialiste du refroidissement des matières granuleuses brutes, notamment le clinker de ciment.

Au cours de ces dernières années, Claudius Peters a concentré ses efforts pour obtenir une répartition optimum du clinker sur toute la largeur du refroidisseur.

2. Les différents constituants du refroidisseur “ETA”

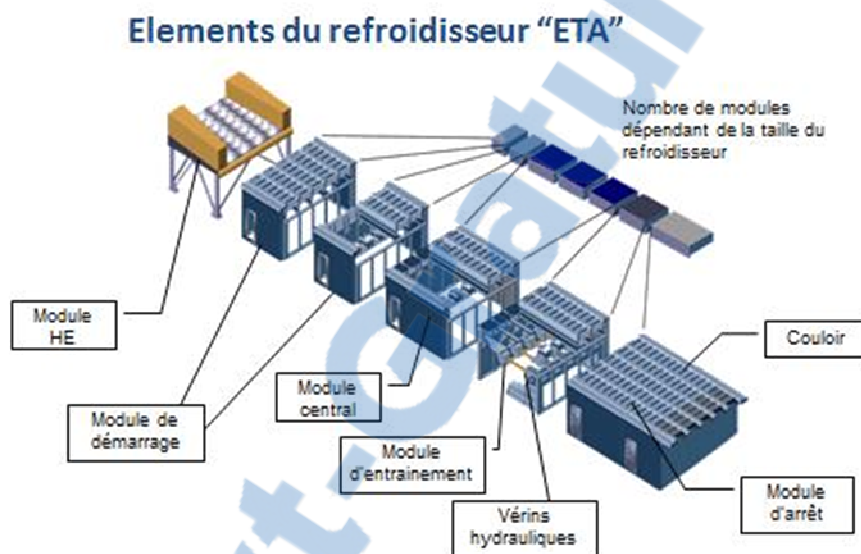
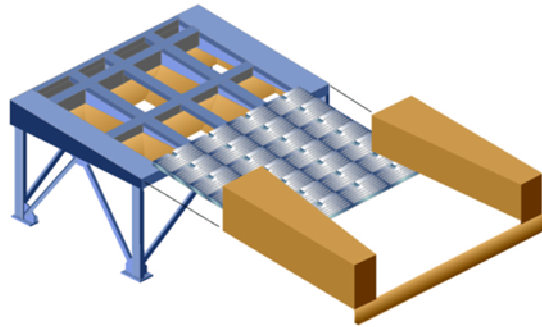


Figure 11: les éléments constituant du refroidisseur

➤ Zone de décharge du four

Il s'agit de la zone sur laquelle le clinker chaud tombe du four. Dans le refroidisseur ETA, c'est la section d'entrée statique nommée module « HE⁶ », ce dernier est constitué d'un cadre avec une boîte d'aération intégrée dans la partie supérieure, laquelle est divisée en différents champs d'aération.

La surface du module HE est généralement inclinée dans le sens d'écoulement du clinker.



➤ Zone de récupération

La zone de récupération est la partie de la zone de refroidissement dont l'air de refroidissement pénètre dans le four et/ou le précalcinateur après avoir quitté le lit de clinker. L'air qui pénètre dans le four est appelé air secondaire, alors que l'air qui pénètre dans le précalcinateur est appelé air tertiaire.

➤ Zone de post-refroidissement

Il s'agit de la zone située à l'arrière de la zone de refroidissement et qui ne fait pas partie de la zone de récupération.

Le clinker y est refroidi à la température de sortie. L'air fourni dans cette zone devient l'air d'exhaure du refroidisseur.

⁶ module haute efficacité

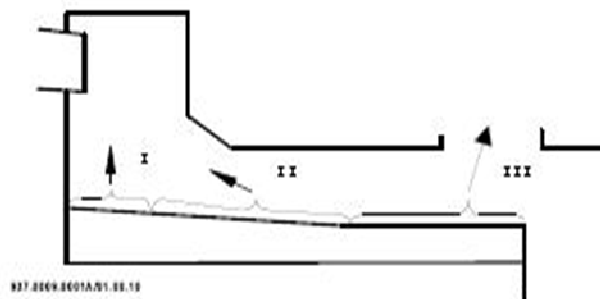


Figure12 :Vue en coupe du refroidisseur ETA avec trois zones de flux d'air

Légende de la Figure : I Air secondaire II Air tertiaire III Air d'exhaure

➤ **Couloirs :**

Eléments au sol sur lesquels le clinker est transporté et simultanément aéré à l'intérieur du refroidisseur. Les couloirs partent juste derrière le module HE pour arriver devant le broyeur de clinker.

Un couloir est entraîné par un ou deux vérins hydrauliques selon la taille du refroidisseur et se déplace vers l'avant et l'arrière pendant le fonctionnement du refroidisseur. Dans un refroidisseur ETA, plusieurs couloirs sont placés parallèlement les uns à côté des autres. Le nombre de couloirs dépend de la capacité de débit de l'installation.

La figure ci-après illustre le principe de déplacement d'un refroidisseur ETA à cinq couloirs :

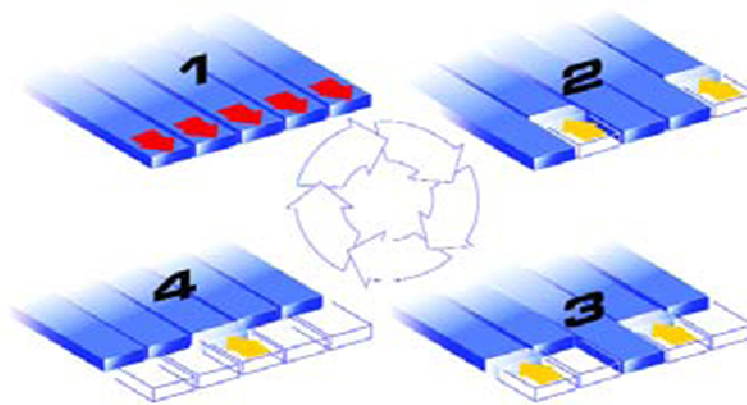


Figure 13:principe de déplacement d'un refroidisseur ETA à cinq couloirs

Cycle de déplacement des couloirs :

- Première étape: déplacement vers l'avant (dans le sens du transport clinker), tous les couloirs se déplacement en même temps ;
- Deuxième étape : déplacement vers l'arrière des couloirs 1 et 4 ;
- Troisième étape : déplacement vers l'arrière des couloirs 2 et 5 ;
- Quatrième étape:déplacement vers l'arrière du couloir 3.

3. les fonctions principales du refroidisseur :



a. Tremper le clinker

Le refroidir rapidement pour figer les réactions chimiques.

b. Refroidir le clinker

Refroidir le clinker de façon continue à la température la plus basse possible, définie en fonction de la quantité requise, de tel sorte que le clinker puisse être transporté, stocké et broyé pour en faire du ciment.

c. Récupérer de l'énergie pour le four et le précalcinateur

Chauffer l'air de combustion requis pour l'air secondaire et tertiaire à la température requise, de façon à ce que la température nécessaire à la formation du clinker soit atteinte dans le four rotatif avec la plus faible consommation de combustible possible.

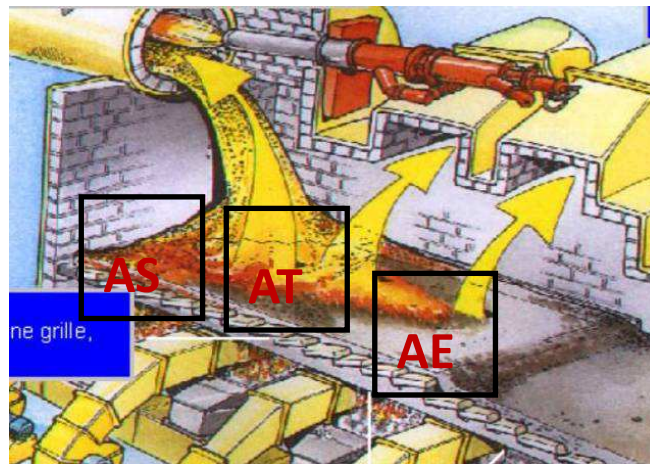


Figure 14: Refroidisseur du clinker

4. principe de fonctionnement :

Les ventilateurs soufflent de l'air dans la chambre située sous les couloirs, cet air de refroidissement circule par les fentes des couloirs traverse la couche de protection authogène puis la couche de clinker qui se trouve sur les couloirs. La pression à atteindre par les ventilateurs correspond à la valeur de la perte de pression du système p_1 (tuyauterie, couloir et couche de protection) et de la perte de pression de la couche de clinker p_2 .

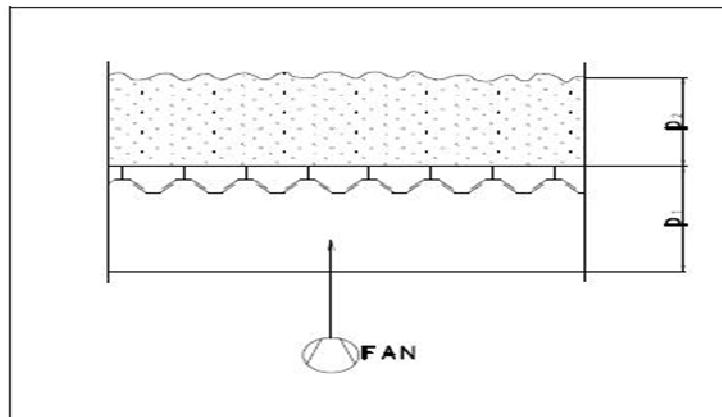


Figure 15 : perte de pression d'un refroidisseur

5. Distribution d'air dans le refroidisseur :

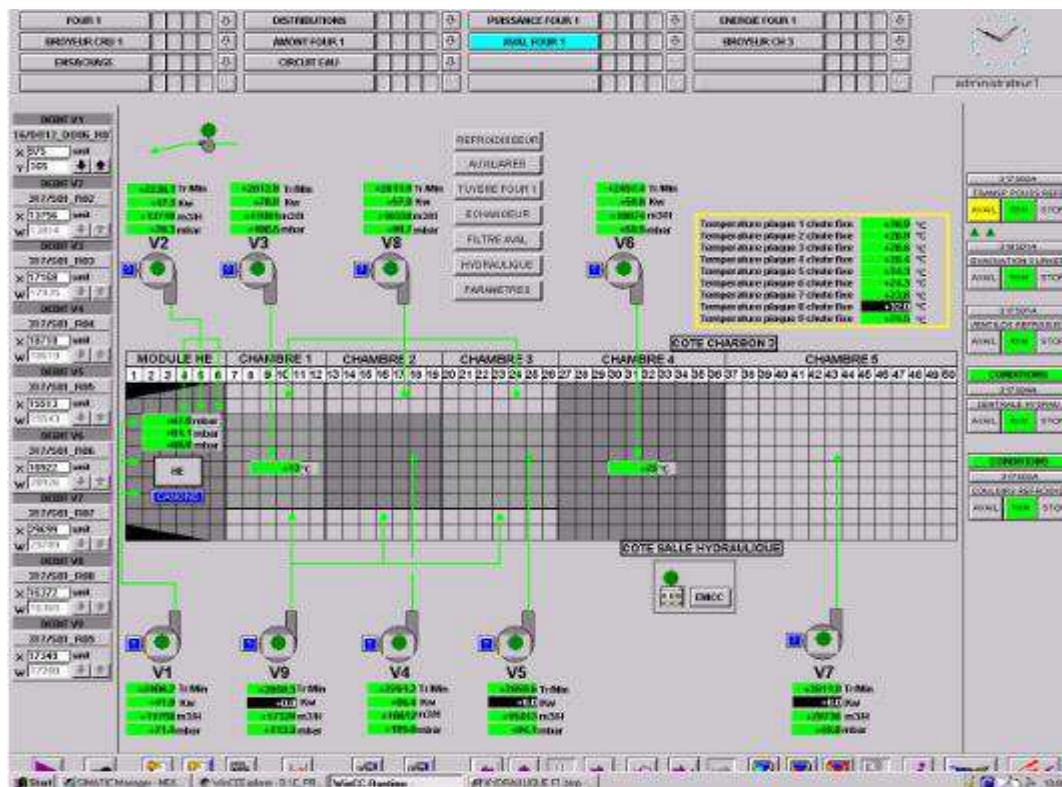


Figure 16: Répartition du soufflage sur 6 chambres avec 9 ventilateurs

La distribution d'air dans le refroidisseur doit être ajustée à la courbe de refroidissement du clinker. A l'entrée du refroidisseur, la différence de température entre l'air de refroidissement et le clinker est plus élevée qu'à la sortie du refroidisseur, ce qui signifie que l'efficacité du refroidissement de l'air est meilleure à l'entrée du refroidisseur qu'à la sortie. L'échange de

chaleur entre le clinker et l'air est donc déterminé principalement par la quantité d'air des premiers ventilateurs d'air de refroidissement.

Pour refroidir le clinker d'environ 1400 °C à l'entrée du refroidisseur à environ 100 ± °C à la sortie du refroidisseur, une certaine quantité d'air de refroidissement est nécessaire, cette dernière dépend de la quantité de farine crue introduite dans le four. Si l'on divise la somme de la quantité d'air de refroidissement de tous les ventilateurs d'air de refroidissement par la quantité de clinker produite, on obtient la quantité d'air de refroidissement. La quantité d'air de refroidissement est indiquée en Nm³/kgkk

$$Q_{\text{air refroidissement}} = \sum_{i=1 \text{ à } 9} Q_{vi} / Q_{\text{farine}}$$

Si l'on augmente la quantité d'air de refroidissement, la température de sortie du clinker diminue, mais la consommation d'énergie de l'installation augmente. Les quantités d'air de refroidissement doivent donc être optimisées

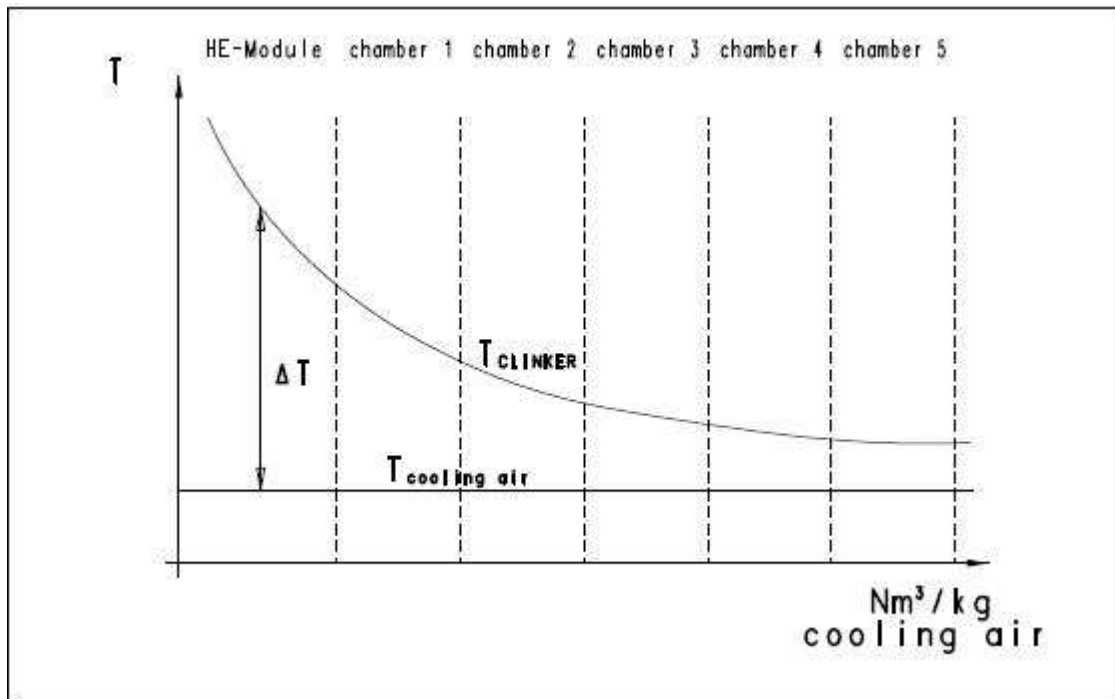


Figure 17: température clinker en fonction de l'air de refroidissement

Si l'on augmente la quantité d'air de refroidissement, la température de sortie du clinker diminue.



6. Comment mesure-t-on la performance d'un refroidisseur?

Le coefficient d'efficacité du refroidissement clinker :

$$\eta_{cool} = 100 (h_{kkin} - h_{kkout}) / h_{kkin} [1]$$

h_{kkin} = Enthalpie de clinker entrée du refroidisseur (J)

h_{kkout} = Enthalpie de clinker sortie du refroidisseur (J)

Le rendement de récupération ρ :

Le rendement de récupération représente la proportion de l'énergie de ventilation que le système permet de récupérer

$$\rho(\%) = 100 * ((h_{AS} + h_{AT}) / [h_{kkin} + ((Q_{AS} + Q_{AT} + Q_{AE}) * h_{ac}) / Q_{ac}]) [2]$$

avec :

$$Q_{ac} = \sum (Q_{AS}, Q_{AT}, Q_{AE})$$

Et : Q_{AE} est négligeable devant Q_{AS} et Q_{AT}

h_{AS} : Enthalpie de l'air secondaire

h_{AT} : Enthalpie de l'air tertiaire

h_{kkin} : Enthalpie du clinker entrée refroidisseur

Q_{AS} : volume massique d'air secondaire (Nm^3/kg)

Q_{AT} : volume massique d'air tertiaire (Nm^3/kg)

Le facteur de récupération : k

C'est le facteur k de récupération des calories vers l'air secondaire et tertiaire, calculé avec la formule suivante :

$$k = -Q_{AE} \ln(1 - \rho) / (Q_{AS} + Q_{AT}) [3]$$



avec :

ρ : Rendement de récupération

Q_{AS} : volume massique d'air secondaire (Nm^3/kg)

Q_{AT} : volume massique d'air tertiaire (Nm^3/kg)

Q_{AE} : volume massique d'air exhaure (Nm^3/kg)

Le ratio de soufflage :

C'est le rapport entre les éléments (K) des airs sortants du refroidisseur et ceux entrants.

$$M = \frac{T^{\circ}AS + T^{\circ}AT + T^{\circ}AE + T^{\circ}kkout}{T^{\circ}kkin + \sum(T^{\circ}V1 \dots V9)/9} [4]$$

AVEC :

T_{AS} : température d'air secondaire

T_{AT} : température d'air tertiaire

T_{AE} : température d'air exhaure

T_{kkin} : température clinker entrée refroidisseur

T_{kkout} : température clinker sortie refroidisseur

$\sum_{i=1 \text{ à } 9} T^{\circ}V_i/9$: la moyenne des températures de l'air soufflé par chaque ventilateur

La consommation calorifique cc :

Il s'agit du nombre de calories consommé par une installation, le calcul se fait de la manière suivante :

$$cc = \frac{\sum(\text{Débit}_{\text{total combustible}} \cdot PCI_{\text{combustible}})}{\text{Débit}_{\text{farine}} \cdot 0,56} [5]$$

0.56 est le ratio du débit clinker par rapport au débit cru (farine) avec :

- $PCI_{\text{combustible}} = PCI_{\text{(coke, grignon)}}$
- $\text{Débit}_{\text{total combustible}} = \text{débit}_{\text{(coke four, coke précalcinateur, grignon précalcinateur)}}$

II. Premier Bilan thermique:



Objectif

Un bilan thermique F1 a été réalisé le 14/02/2012. Cet audit avait pour objectif la caractérisation du niveau de performance de la première ligne de cuisson, tel l'évaluation du rendement du refroidisseur et la récupération des gaz chauds

II.1. synthèse :

Ce bilan a été mené par l'équipe procédé (M. Taibi, M.Manssouri, M.Jalal) et en coordination avec les autres services de l'usine, et ci-dessous les résultats obtenus lors de cet audit :

- Faible coefficient de récupération : $k = 1,06$ (valeur de référence $\geq 1,4$)
 - Rendement thermique médiocre : $\rho = 43.9\%$ (valeur de référence $\geq 70\%$)
 - Température clinker sortie refroidisseur faible : 70°C (valeur de référence $\sim 100^\circ\text{C}$)
 - Ratio de soufflage légèrement faible $1,71$ (1.8 à 2.2)
 - Finesse coke dégradée : $38\ \mu\text{m}$ @ $200\ \mu\text{m}$ (valeur de référence $= 22\ \mu\text{m}$)
 - Température exhaure élevée 467°C . unité T (valeur de référence 250°C)
 - Température air secondaire basse 922°C unité T (valeur de référence 1196°C)
 - Température air tertiaire faible 766°C unité T (valeur de référence 980°C)
 - Consommation calorifique reste élevée $866\ \text{th/tkk}$ (valeur de référence $860\ \text{th/tkk}$)
- ⇒ Depuis plusieurs années, la consommation globale des deux fours demeure instable et dépasse l'objectif fixé à $860\ \text{th/t kk}$. Le tableau suivant présente l'historique des consommations calorifiques entre 2008 et 2011.

Consommation calorifique en th/t kk	Cumul Four1	Cumul Four 2	Cumul Global Moyen	Objectif Global	Ecart Global
Année 2008	868.29	859.91	864.10	860.00	+4.10/860
Année 2009	870.62	851.44	861.03	860.00	+1.03/860
Année 2010	882.00	879.00	880.50	860.00	+20.50/860
Année 2011	868.61	879.81	879.71	860.00	+19.71/860

Table n° 2: historique de la consommation calorifique (2008-2011)



A l'issue de cette comparaison, il est évident que le four 1 consomme plus de thermies par rapport à son objectif fixé à 860 th/t kk, alors que le four 2 reste relativement au-dessous de l'objectif fixé à 860 th/t kk.

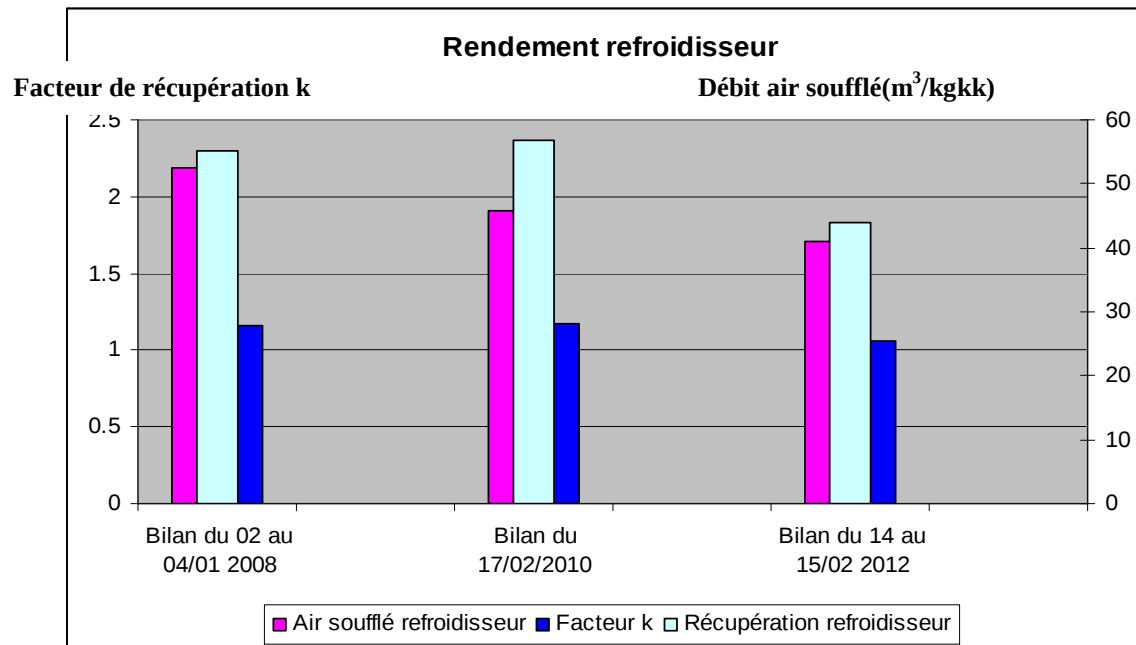


Figure 18:évolution du rendement, facteur de récupération et le débit soufflé au cours des années2008 à 2012

D'après la représentation graphique,on constate clairement :

- Une baisse desoufflage refroidisseur.
- Un facteur k et Rendement de récupération thermique faibles, chose qui nous a amené à se concentrer sur l'optimisation du refroidisseur.

Le diagramme d'Ishikawa suivant présente les causes réelles de l'augmentation de la consommation calorifique de la première ligne de cuisson.

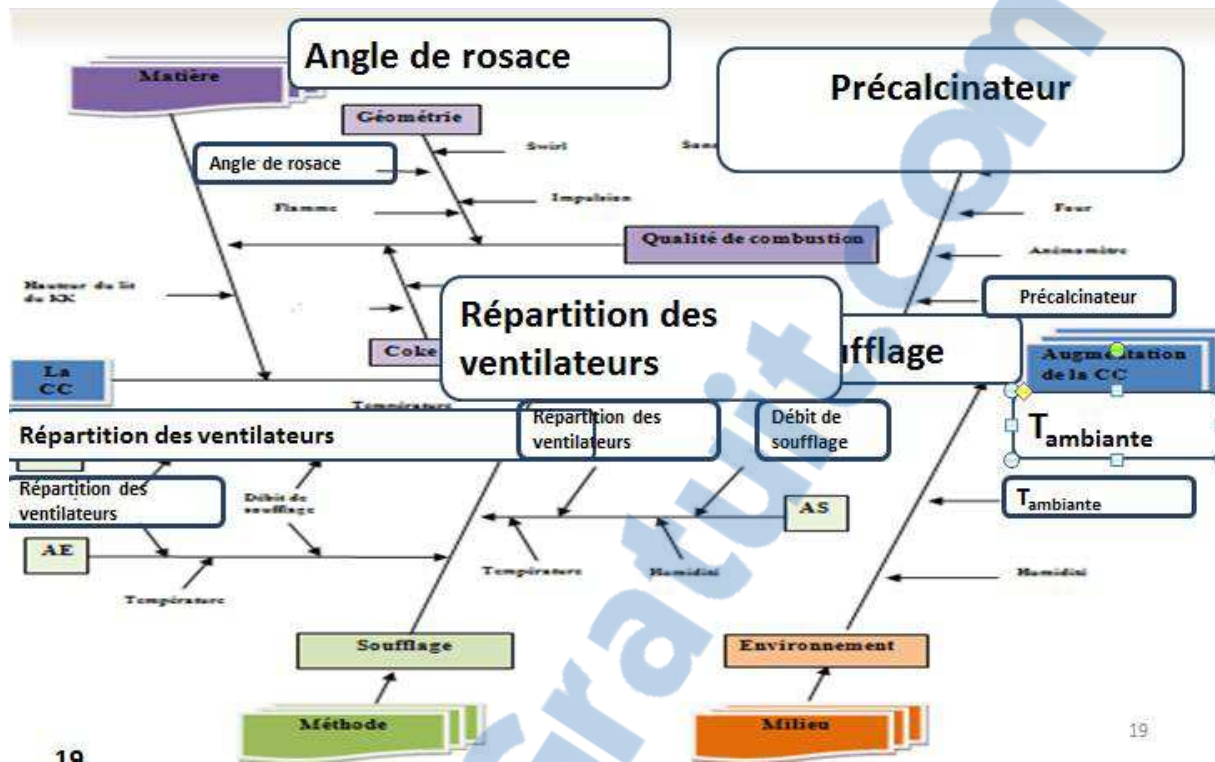


Figure 19 : Diagramme causes à effets ICHIKAWA

D'après ce diagramme, ces constats et résultats insatisfaisants, la question qui se pose est la suivante :

Quels sont les axes à solliciter afin de proposer et de suivre des plans d’actions, et sur quoi il faut agir pour garantir un bon niveau de performance en terme de la consommation calorifique ?

A cet issue,nous avons entamé les actions correctives suivantes :

- Amélioration de la Qualité de la combustion
- Changement PID pression de référence
- Modification de la hauteur du lit de clinker
- Modification du débit de soufflage des ventilateurs
- Amélioration de la finesse du coke

II.2. Plan d'actions :

✚ Action 1 : Amélioration de la Qualité de la combustion

La combustion est un ensemble de réactions chimiques entre le comburant et le combustible. Le comburant est l'oxygène apporté par l'air ambiant, ainsi le coke de pétrole est considéré comme étant le combustible de choix par rapport aux autres combustibles, vu les avantages qu'il présente tel que :

- Haut pouvoir calorifique (supérieur à celui du charbon) ;
- Pour une même unité calorifique, le coût de transport est plus faible ;
- Risque d'explosion plus faible .

Le coke de pétrole est caractérisé par son pouvoir calorifique qui est la chaleur que peut dégager la combustion complète d'une unité de combustible et on peut définir deux types de pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI), mesuré en conservant l'eau à l'état vapeur
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS), mesuré après avoir récupéré la chaleur de condensation de l'eau.

A noter qu'en technologie cimentière, c'est le pouvoir calorifique inférieur qui est à considérer car la cheminée évacue toujours les fumées à plus de 100°C.

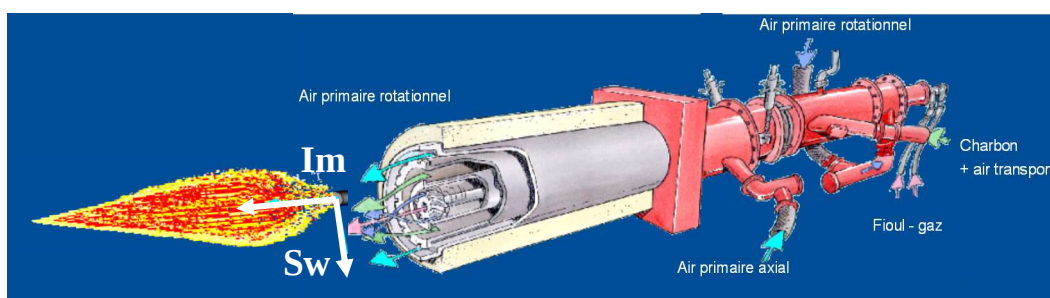


Figure 20: Tuyère du four

A en croire les techniciens, la tuyère représente « le cœur de l'usine », elle est indispensable à la formation du clinker, ainsi Une bonne combustion passe par une optimisation de la flamme de la tuyère : il faut en effet que celle-ci ne soit ni trop longue, ni trop large.

La grandeur qui influe sur la longueur est : l'impulsion.

Les grandeurs qui influent sur la largeur sont : le swirl et l'angle de rosace.

Le but des ingénieurs est d'avoir une flamme la plus courte et la plus chaude possible, le réglage correspondant est :

- une impulsion $I=8N.Gcal/h$,
- un swirl $S=0.08$,

A Lafarge Meknès l'angle de rosace est de $\alpha=20^\circ$.

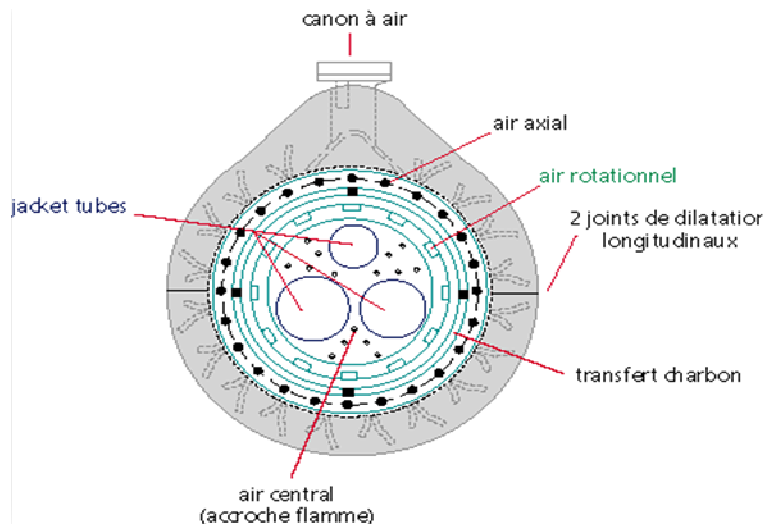


Figure 21:vue en coupe de la tuyère

La vue en coupe de la tuyère laisse apparaître les conduites par lesquelles passent les différents airs qui permettent de faire varier la forme de la flamme.

Il y a deux sources d'air différentes qui jouent sur la constitution de la flamme:

- L'air primaire, qui est l'air de transport des combustibles, le coke ou le pétrole, cet air se décompose en un air axial, lié à l'impulsion, un air central, aussi appelé air combustible, et un air rotationnel, lié à l'angle de rosace.
- L'air secondaire, qui provient du refroidisseur et qui est responsable de la turbulence de la flamme. Ainsi, l'optimisation de la flamme passe aussi par l'optimisation de la température du refroidisseur.

Action 2: Changement PID pression de référence

Rapport-gratuit.com



LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

Faculté des Sciences et Techniques - Fès

☒ B.P. 2202 – Route d'Imouzzar – FES

☎ 212 (0) 35 60 29 53 Fax : 212 (0) 35 60 82 14



L'enjeu prépondérant dans la bonne marche du refroidisseur est de maintenir une marche plus stable pour assurer une régularité de production et pour pouvoir faire des optimisations.

Ceci permettra également d'améliorer la régularité de la qualité du produit fini. Pour cela certaines boucles de régulations ont été créées et mises en service, elles sont disponibles basiquement sur le système contrôle commande sous formes de régulations PID. L'usine dispose également dans un cadre d'optimisation plus poussée d'un système expert de conduite automatique plus performant (LUCIE) caractérisant l'état de marche, ainsi l'optimisation des paramètres de marche et par conséquent d'atteindre les objectifs cherchés.

Ce système (LUCIE) permet de gérer plusieurs paramètres à la fois prenant en compte les contraintes qui se présenteraient quand il s'agit par exemple d'une certaine charge ou d'un certain dépassement à ne pas atteindre. Lucie fait une lecture de tous les paramètres de marche et obéit à celui qui reflète réellement le vrai besoin en terme d'action à faire. En effet, les paramètres de marche sont pondérés au niveau Lucie en fonction de leur importance et leur représentativité de la marche de l'atelier.

Toutefois, il faut signaler que la connexion de Lucie est impérativement conditionnée par une bonne fiabilité d'abord de l'atelier (capteurs fiables, matière première bien maîtrisée,...).

L'atelier Refroidisseur contient plusieurs boucles de régulation qui se distinguent par leurs potentiels d'influence sur la marche de l'atelier, citons :

- ❖ Contrôle de la hauteur du lit de clinker
- ❖ Contrôle de la quantité d'air de refroidissement
- ❖ Surveillance de la couche protectrice (gousset)

Pour assurer les régulations nécessaires, des capteurs procès (débit, pression, température,...) ont été installés sur place dont l'information est remontée en salle de contrôle. Cela permet de mieux caractériser le fonctionnement de l'atelier et d'assurer le bon fonctionnement de ses équipements.

Action 3 : Augmentation de la hauteur du lit de clinker

- ***L'effet de l'augmentation de la hauteur du lit de clinker sur la réduction de la température de sortie du clinker***

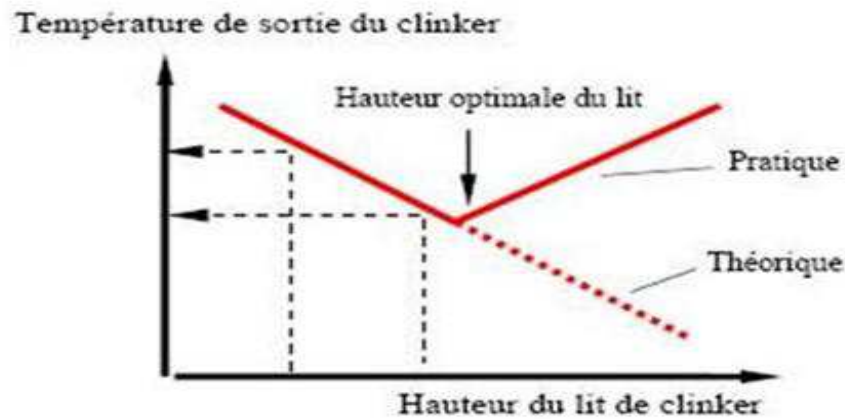


Figure 22 : effet de la hauteur du lit de clinker sur la température de sortie

L'augmentation de la hauteur du lit de clinker entraîne une augmentation de la durée de rétention de l'air de refroidissement dans le lit de clinker. L'échange de chaleur s'en trouve amélioré et donc augmentation de la température de l'air secondaire et réduction de la température de sortie du clinker, Si la limite de hauteur du lit du clinker est dépassée, l'échange de chaleur et l'efficacité du refroidisseur diminue.

- *Effet de l'augmentation de la hauteur du lit de clinker sur l'amélioration de l'efficacité du refroidisseur :*

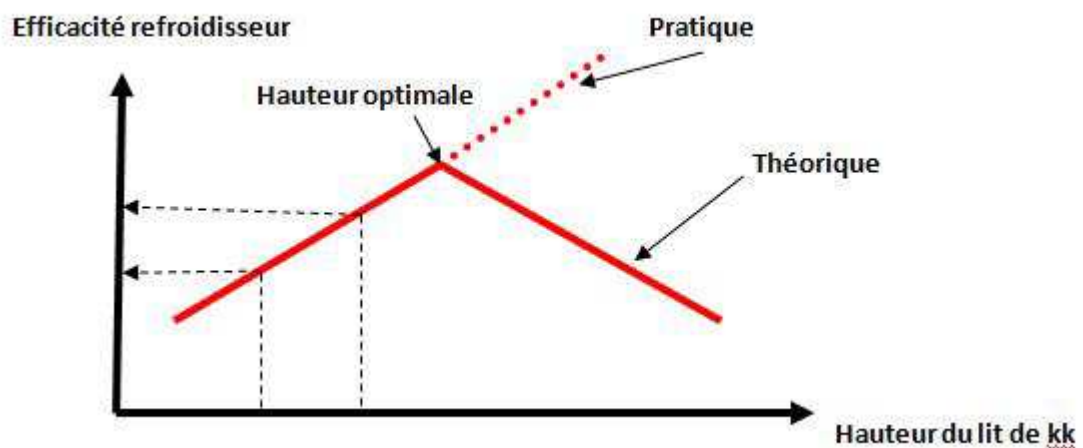


Figure 23: effet de la hauteur du lit de clinker sur l'efficacité du refroidisseur



L'amélioration de l'échange de chaleur obtenue avec un lit de clinker plus haut augmente la température de l'air de récupération, ce qui à son tour améliore l'efficacité du refroidisseur. Si la limite de hauteur du lit du clinker est dépassée, l'échange de chaleur et l'efficacité du refroidisseur diminuent.

✚ Action 4 : Modification du débit de soufflage des ventilateurs :

L'alimentation en air au niveau des ventilateurs en amont doit être maximale pour que l'échange thermique entre gaz matière soit maximal et donc la température au niveau de la zone de récupération augmente.

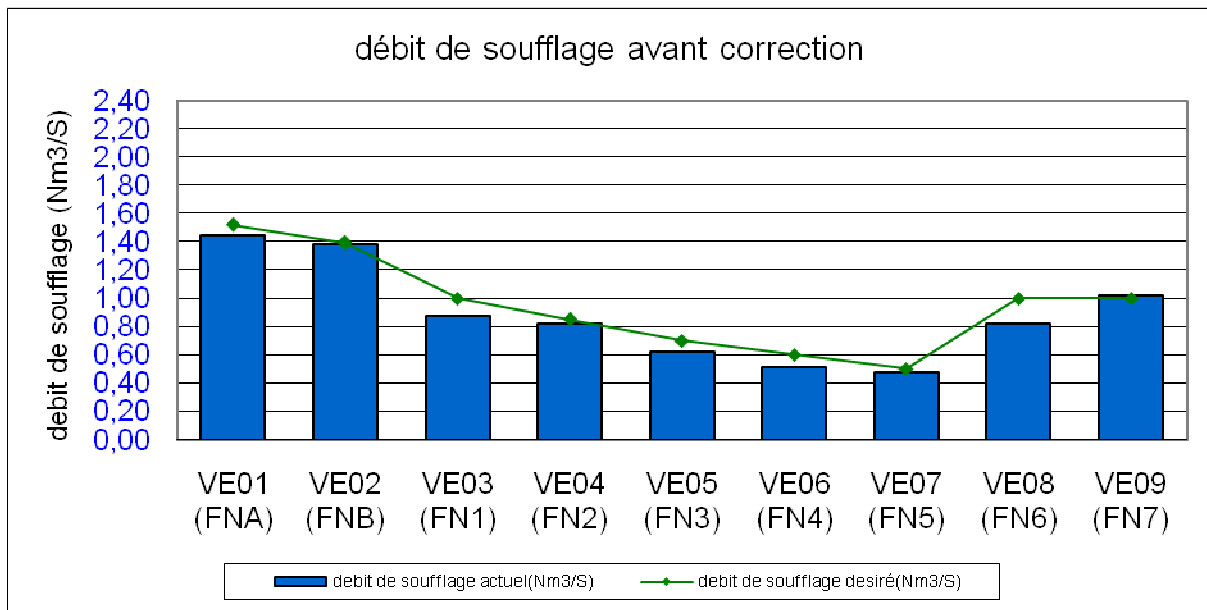


Figure 24 : Débit de soufflage avant modification :

Avant la mise en marche de la modification du débit de soufflage au niveau des différents ventilateurs comme c'est illustré dans la figure ci-dessus, il est bien clair que les débits de soufflage actuels s'écartent de ceux souhaités.

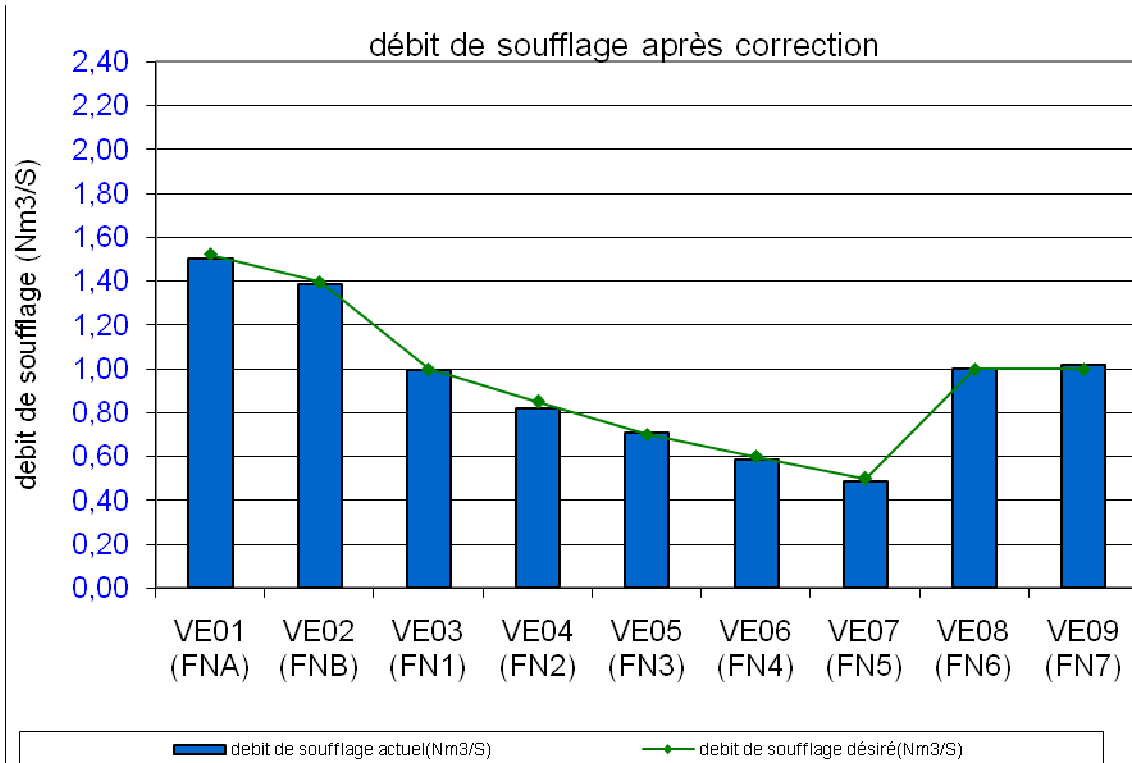


Figure 25 : Débit de soufflage après modification

Après discussion avec les cadres du service procédé, nous avons établi ensemble un protocole d'essai portant sur la modification du débit de soufflage en augmentant le débit de soufflage des ventilateurs en amont.

A signaler que les ventilateurs V1, V2, V3, V5, V8 et V9 présentent les ventilateurs en amont, et les autres ventilateurs (V4, V6, V7) présentent ceux en aval. **Action 3 :**

Action 5 : Augmentation de la finesse du coke :

La granulométrie du coke de pétrole a un rôle jugé significatif sur le procédé de combustion. Elle présente un aspect environnemental très important, car un combustible pulvérisé plus finement peut entraîner une diminution de la formation des NOX : il permet de réaliser également la combustion avec de plus faibles excès d'air tout en maintenant la stabilité adéquate de la flamme

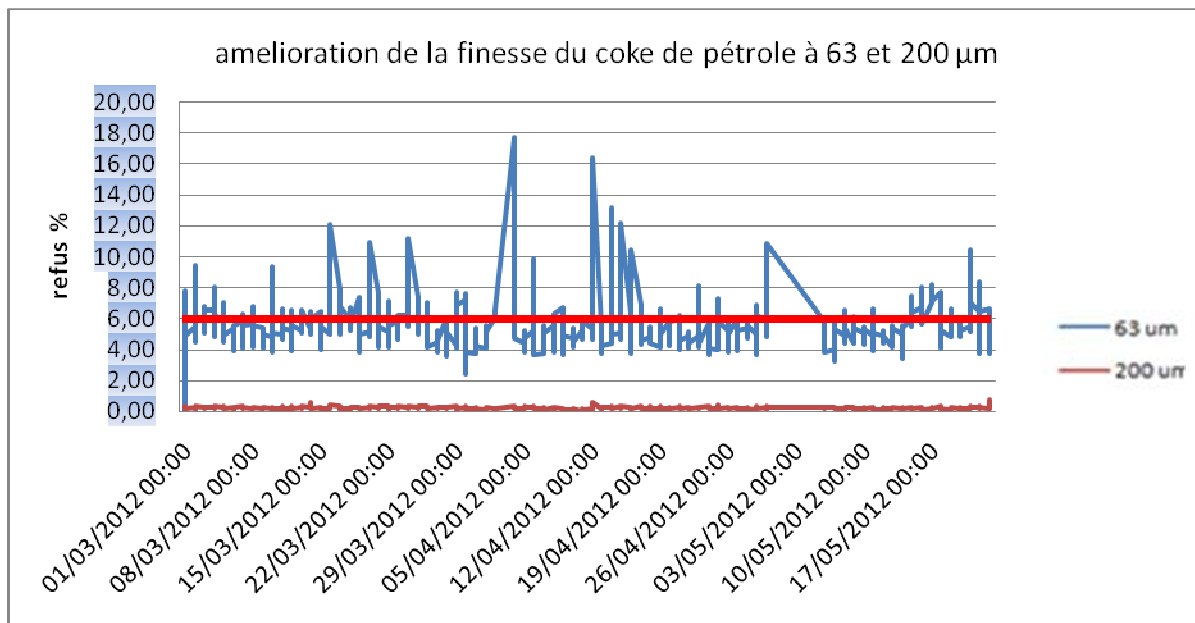


Figure 26 : évolution des pourcentages des refus à 63 μm et 200 μm

Le refus est l'image de la qualité de la finesse du combustible, à signaler que la valeur de référence de ce paramètre est de 0% à 200 μm et 6% à 63 μm .

Ce qui veut dire que la finesse du coke a bien évidemment amélioré et est restée relativement stable, chose qui a participé efficacement à l'optimisation de la consommation calorifique.

I. Deuxième Bilan thermique:

III.1. synthèse :

Après la prise en compte d'un brainstorming et l'organisation d'une réunion avec les interlocuteurs, nous avons défini ensemble l'axe prioritaire à traiter, il s'agit d'un deuxième bilan thermique effectué le 25/04/2012 afin d'améliorer le niveau de performance de la ligne de cuisson y compris le fonctionnement du refroidisseur, vu les résultats insatisfaisants obtenus lors du premier bilan thermique qui a eu lieu du 14 au 15/04/2012.

Ce deuxième bilan avait comme résultats :

- coefficient de récupération correct : $k = 1,55$ (valeur de référence $\geq 1,4$)
- Rendement thermique amélioré : $\rho = 58.5\%$ (valeur de référence $\geq 70\%$)
- Température clinker sortie refroidisseur : 110°C (valeur de référence $\sim 100^\circ\text{C}$)
- Ratio de soufflage légèrement faible $1,63$ (Vs 1.8 à 2.2)
- Température exhaure 370°C (valeur de référence 250°C).
- Température air secondaire 1192°C (valeur de référence 1196°C)
- Température air tertiaire 870°C (valeur de référence 980°C)
- Finesses coke : $24 \mu\text{m}$ @ $200 \mu\text{m}$ (valeur de référence $= 22 \mu\text{m}$)

Ces résultats présentés ci-dessus étaient calculés automatiquement dans le service procédé, et recalculés manuellement en se basant sur des formules déjà signalées dans la partie concernant le calcul des performances du refroidisseur, Ci-dessous les calculs détaillés :



Le coefficient d'efficacité du refroidissement clinker :

$$\eta_{\text{cool}} = 100 (h_{\text{kin}} - h_{\text{kkout}}) / h_{\text{kin}}$$

Avec $h_{\text{kin}} = C_p \cdot T_{\text{kin}}$ et $h_{\text{kkout}} = C_p \cdot T_{\text{kkout}}$

Avec $T_{\text{kin}} = 1360^\circ\text{C}$ et $T_{\text{kkout}} = 110^\circ\text{C}$

C_p : capacité thermique massique

$C_{p_{\text{kkint}}} = 0.25 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ et $C_{p_{\text{kkout}}} = 0.185 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

D'où $h_{\text{kin}} = 350.9 \text{ J}$ et $h_{\text{kkout}} = 20.4 \text{ J}$

On obtient : $\eta_{\text{cool}} = 94.2\%$

Le rendement de récupération ρ :

$$\rho(\%) = 100 * ((h_{\text{AS}} + h_{\text{AT}}) / [h_{\text{kin}} + ((Q_{\text{AS}} + Q_{\text{AT}} + Q_{\text{AE}}) * h_{\text{AC}}) / Q_{\text{AC}}])$$

avec : $Q_{\text{AC}} = \sum (Q_{\text{AS}}, Q_{\text{AT}}, Q_{\text{AE}})$

Et : Q_{AE} est négligeable devant Q_{AS} et Q_{AT}

$h_{\text{AS}} = 157.4 \text{ J}$

$h_{\text{AT}} = 50.5 \text{ J}$

$h_{\text{kin}} = 350.9 \text{ J}$

$Q_{\text{AS}} = 0.393 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

$Q_{\text{AT}} = 0.170 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

$T_{\text{AC}} = 25^\circ\text{C}$

$C_{p_{\text{AC}}} = 0.311 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

D'où $\rho = 58.5$

Cette valeur est améliorée en la comparant avec la valeur obtenue lors du premier bilan, mais elle reste relativement faible par rapport à la valeur de référence (70%).

Le facteur de récupération : k

$$k = -Q_{\text{AE}} \ln(1 - \rho) / (Q_{\text{AS}} + Q_{\text{AT}})$$

avec :



$$\rho = 58\%$$

$$Q_{AS} = 0.393 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$Q_{AT} = 0.17 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$Q_{AE} = 1.01 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$\text{D'où : } k = -1.01 \cdot \ln(1 - 0.585) / (0.393 + 0.17)$$

$$k = 1,56$$

Le ratio de soufflage :

$$M = \frac{T_{AS} + T_{AT} + T_{AE} + T_{kkout}}{T_{kkin} + \sum(T_{Vi} \dots V_9)/9}$$

AVEC :

$$T_{AS} = 1192 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{AT} = 870 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{AE} = 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{kkin} = 1360 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{kkout} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\sum_{i=1 \text{ à } 9} T_{Vi}/9 = (24 + 24 + 24 + 26 + 25 + 25 + 25 + 24 + 26)/9$$

$$= 24.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

D'où :

$$M = \frac{1192 + 870 + 380 + 110}{1360 + 25}$$

$$= 1.84$$

La consommation calorifique cc :

$$CC = \frac{\sum(\text{Débit}_{\text{total combustible}} * PCI_{\text{combustible}})}{\text{Débit}_{\text{farine}} * 0,56}$$

0.56 est le ratio du débit clinker par rapport au débit cru (farine) avec:



- Débit clinker = 75.04 t/h
- Débit farine = 134 t/h
 $75.04/134 = 0.56$
- PCI coke=7800 kcal/kg , PCI grignon =4009 kcal/kg
- débit coke four =3500 kg/h
- débit coke précalcinateur = 3400 kg/h
- débit grignon précalcinateur =2500 kg/h

AN :

$$CC = \frac{((3500 + 3400) * 7800) + (2500 * 4009)}{134 * 0,56}$$

$$= 850\,779 \left(\frac{\text{cal}}{\text{t}} \right)$$

$$D'ou \quad CC = 851 \frac{\text{th}}{\text{t}}$$

III.2. Résultat :

Le tableau comparatif suivant résume les résultats obtenus lors des deux bilan :

Colonne1	Valeur de garantie	Bilan 14/02/2012	Bilan 25/04/2012	Observation
Consommation calorifique(Th/t)	<=860	866	850	Gain
efficacité du refroidisseur(%)		96.3	94.2	Amélioration
Facteur K	>= 1,4	1.06	1.55	Gain
Récupération thermique(%)	>= 70	43.9	58.5	Amélioration
Température air tertiaire(°C)	>=980	766	870	Amélioration
Température air secondaire(°C)	>=1196	922	1192	Amélioration
Température clinker sortie refroidisseur(°C)	100	70	110	Amélioration
Température exhaure (°C)	<= 250 °C	467	370	Amélioration

Tableau 3 : Résultat bilan 1-bilan 2

En comparant les résultats des deux bilans, il est bien évident qu'il y a une amélioration des différents paramètres en vue de l'optimisation de la première ligne de cuisson.

La réalisations des plans d'actions nous a permis donc de gagner **10th/t** en terme de consommation calorifique dans le mois d'avril par rapport au mois de février et faire augmenter la température de l'air secondaire de **922°C à 1192°C**.

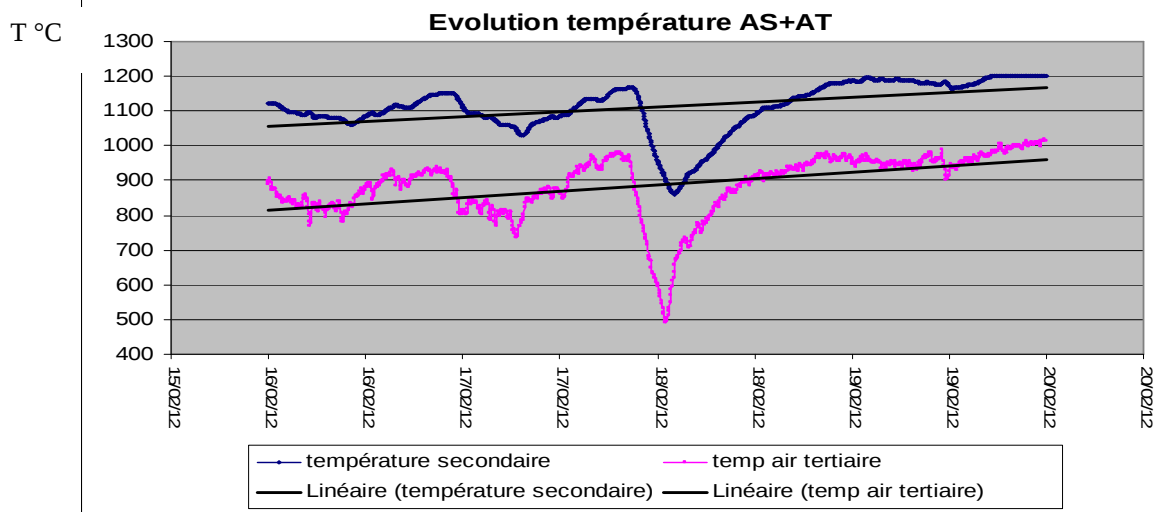


Figure 27 : évolution de la température aire secondaire et tertiaire

La représentation graphique montre clairement que la température de l'air secondaire reste de loin plus élevée que celle de l'air tertiaire, les deux températures sont en amélioration continue sauf le 18/02/2012 où on constate une diminution brusque des 2 températures due à une panne mécanique au niveau des ventilateurs VE03 et VE09

conclusion

Le sujet de notre projet de fin d'étude était une grande réussite pour nous, car il nous a permis de mettre en jeu un ensemble de concepts et d'actions d'optimisation pour garantir un bon niveau de performance en terme de la consommation calorifique.



Dans cette optique, nous nous sommes attaquées à la compréhension du processus de fabrication du ciment ainsi que l'étude des problématiques liées à l'optimisation de la consommation calorifique chez Lafarge ciment usine de Meknès,

C'est ainsi que nous avons pu tirer plusieurs constats tel que :

- Augmentation de la température de l'air d'exhaure ;
- Diminution de la température de l'air secondaire et tertiaire ;
- Augmentation de la consommation calorifique.

Au terme de cette analyse, nous nous sommes interrogées sur l'impact de :

- Amélioration de la Qualité de la combustion
- Changement PID pression de référence
- Modification de la hauteur du lit de clinker
- Modification du débit de soufflage des ventilateurs
- Amélioration de la finesse du coke

En plus de ces actions, il y en avait d'autres que nous n'avons pas pu réaliser tel que l'impact des airs faux, Réglage tuyère,..... vu l'insuffisance du temps.

A vrai dire, la période de stage que nous avons passée au sein de cet industrie, nous a permis d'acquérir des connaissances qui ont été absolument nécessaires pour notre formation professionnelle, ceci afin d'approfondir notre savoir sur le plan technique et pratique et d'être opérationnel dans le travail tout en se conformant à la discipline générale qui règne au sein de l'entreprise.

Notre vœu est que ce travail puisse permettre à LAFARGE Ciments, Usine de Meknès de réaliser relativement les progrès souhaités.

ANNEXE1 : BILANS

2^{ème} bilan

Air soufflé sous refroidisseur	VE 01	VE 02	VE 03	VE 04	VE 05	VE 06	VE 07	VE 08	VE 09	Total
Débit (Nm ³ /h)	12 997	14 059	14 318	12 594	13 442	13 904	13 390	16 759	14 183	125 647
Débit (Nm ³ /s)	3,61	3,91	3,98	3,50	3,73	3,86	3,72	4,66	3,94	34,90
Débit (Nm ³ /KgKk)	0,176	0,191	0,194	0,171	0,183	0,189	0,182	0,228	0,193	1,71
Température	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Surface utile (m ²)	2,10	2,70	3,87	4,05	4,05	10,10	13,75	3,99	3,99	48,60
Densité de souff. (Nm ³ /s/m ²)	1,72	1,45	1,03	0,86	0,92	0,38	0,27	1,17	0,99	0,98
Pression sous chambre	970	863	356	355	137	76	47	-	-	

Bilan refroidisseur											
Entrées	Nm ³ /kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpie	Sorties	Nm ³ /kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpie
Clinker sortie four		1,00	1360	0,258	350,9	Air secondaire	0,393		1192	0,336	157,4
Poussières sortie four		0,00	1360	0,258	0,0	Poussières refroidisseur		0,00	1192	0,234	0,0
Poussières sortie AT		0,00	1360	0,258	0,0	Poussières sortie AT		0,00	870	0,232	0,0
Air soufflé	1,629		24,9	0,311	12,6	Exhaure 1	0,000		0	0,000	0,0
						Exhaure 2	1,01		380	0,318	122,6
						Exhaure 3	0,00		0	0,311	0,0
						A.tertiaire	0,17		870	0,334	50,5
						Indéterminées 2,95%	0,05		22	0,311	0,3
						Pertes par parois ref.					8
						Clink. sortie refroidisseur		1,00	110	0,185	20,4
Total	1,63	1,00			363,5	Total	1,63	1,00			359,1

Rapport-gratuit.com

LE NUMERO 1 MONDIAL DES MEMOIRES

Faculté des Sciences et Techniques - Fès

B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES

212 (0) 35 60 29 53 Fax : 212 (0) 35 60 82 14



Bilan ligne de cuisson											
Entrées	Nm3/kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpie	Sorties	Nm3/kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpie
Combustibles						Sortie prechauffeur					
Combustible aval		0,047			359,4	Fumées	1,592	2,058	378	0,359	216,1
Combustible amont		0,079			475,7	chaleur sens poussières		0,205	378	0,225	17,5
Chaleur sensible combustibles		0,125	46	0,257	1,5	chaleur lat poussières		0,000			1,0
						H2O vap. cru		0,013			7,5
Cru						H2O vap. eau granules		0,000			0,0
Cru		1,786	71	0,193	24,4	H2O vap. combustible		0,001			0,8
Chaleur latente du cru		0,0011			8,4	CO	0,0021				6,4
Eau granules		0,0000	71	1,002	0,0	Pertes par parois tour					24,5
						Pertes par parois four					47,5
Air						Chaleur théorique					413,0
Air soufflé	1,629		25	0,311	12,6	Refroidisseur					
Air primaire four	0,059		115	0,312	2,1	Exhaure 1	0,000		0	0,000	0,0
Air primaire préca	0,038		22	0,311	0,3	Exhaure 2	1,014		380	0,318	122,6
Air aéropol	0,000			0,000	0,0	Exhaure 3	0,000		0	0,311	0,0
Air tertiaire	0,174		870	0,334	50,5	A.tertiaire	0,174		870	0,334	50,5
Air caméra + hublot + Pyro.	0,000		10	0,311	0,0	Indéterminées	0,048		22	0,311	0,3
Air entrant nosering aval	0,037		21	0,311	0,2	Pertes par parois ref.					8,0
Entrées d'air amont	0,573		20	0,311	3,6	Clink. sortie refroidisseur		1,000	110	0,185	20,4
Total					938,6	Total					935,9

AS+AT	K = 1,55	et un rendement de	58,5%	Consommation calorifique	850	Kcal/Kgkk	dont	43,0%	au four
AS + AT+ Exhaure 1	K = 1,55	et un rendement de	58,5%	Rendement de refroidissement égal à	94,2%				

workshop : Air primaire préca
Condition of the test : démarrage gas froid
Origin of the source :
Measurement point : X

DUCT

Circular : DIAMETER 0,18 m
Tapping 0,00 m
Rectangular : WIDTH
Rectangular : HEIGHT
Temperature 25 °C
Static Pressure 768 mmWG
Pilot Tube Ratio 1,000
Dust concentration 0,0 g/m3
Dust concentration 0,00 kg/Nm3
Dust flow (t/h) 0,006

Barometric Pressure
Atmospheric Pressure Ratio 0,0
Elevation "m" 800 m
Atm. Pressure @ "h" 9688,1 mmWG
Atm. Pressure @ "h" 93993,20 Pa

75%Rule :

GAS COMPOSITION

M : Gas Molecular Weight (Wet)	M : Gas Molecular Weight (dry)	% H2O	dry	humid
28,963 g/mole	28,963 g/mole	0,00	0,00	0,00
Standard Atmospheric Composition	0,03%	% CO2 dry	0,03	0,03
	20,93%	% O2 dry	20,93	20,93
	0,93%	% N2 dry	0,93	0,93
	78,10%	% N2 dry	78,11	78,11

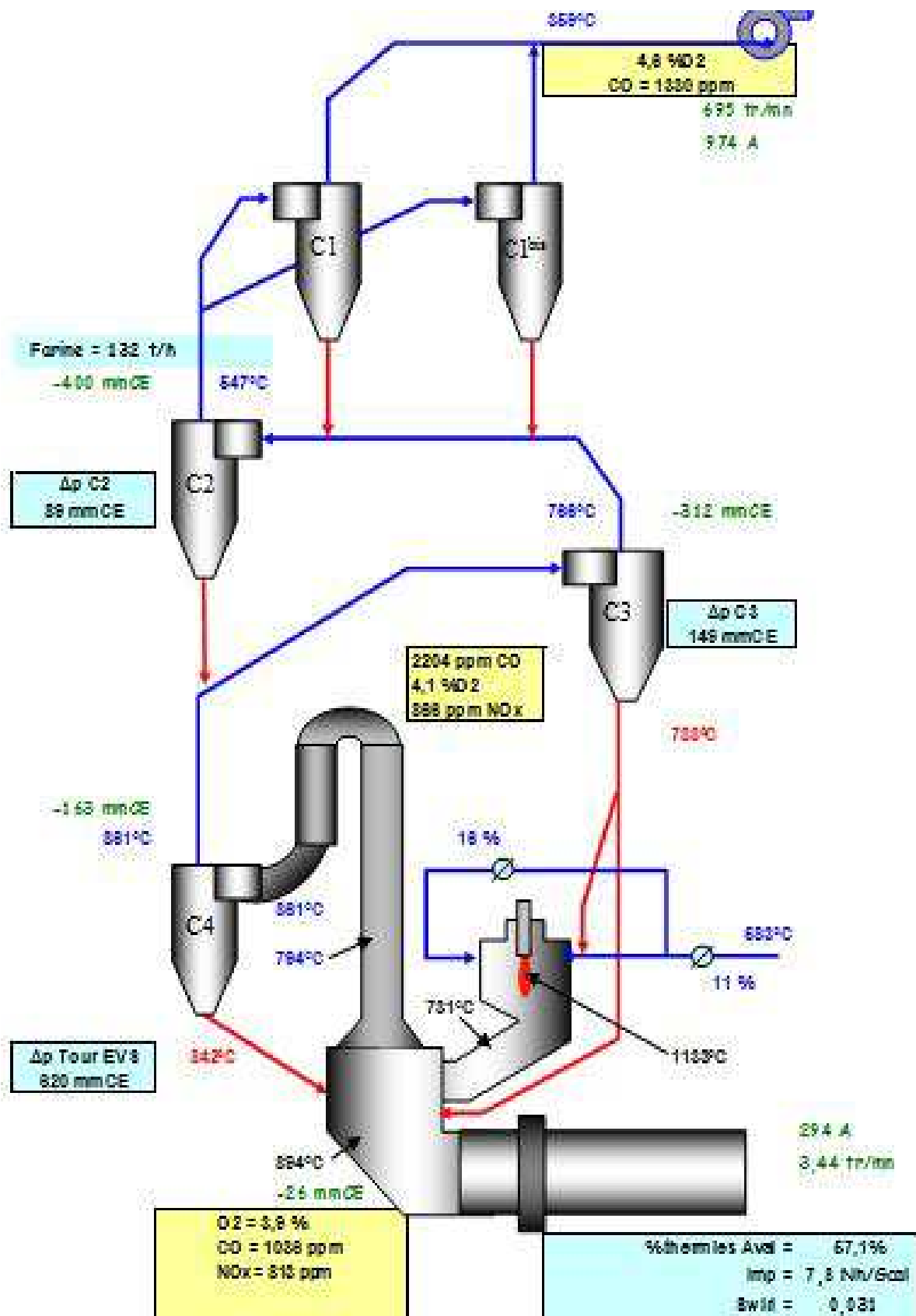
Calculation of gas flow at reference conditions

% H2O ref	0,00
Flow (H2O ref)	1,483 Nm3/h
% O2 ref	10,00
Flow (H2O ref @ % O2 ref)	0,000 Nm3/h
Flow (H2O ref @ % O2 ref)	0,000 Nm3/h

Gas Density (wet) 1,293 kg/Nm3
P&T RHO corr. w/o dust (wet) 1,187 kg/m3
Gas Density (H2O ref) 1,293 kg/Nm3
P&T RHO corr. w/o dust (H2O ref) 1,187 kg/m3

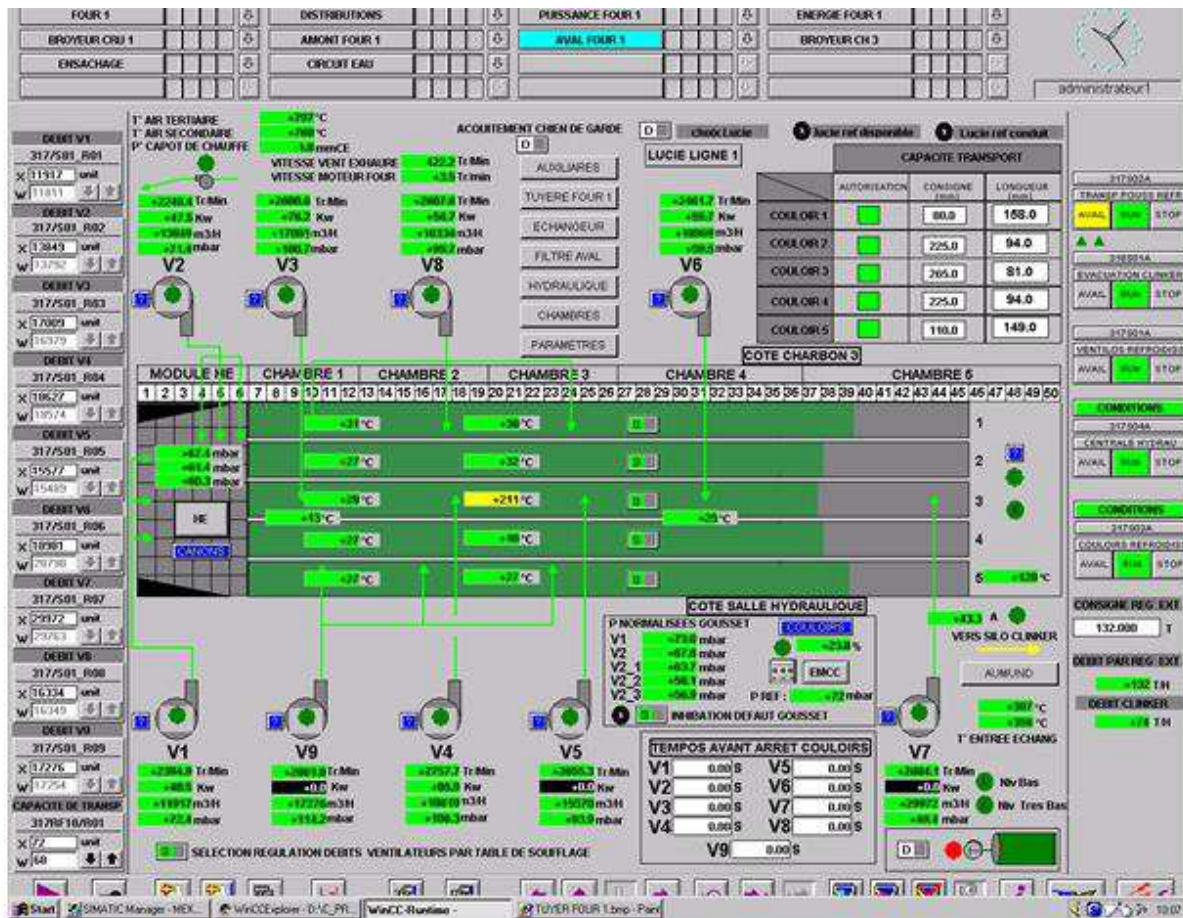


ANNEXE2 : LA TOUR EVS





ANNEXE3 : REFROIDISSEUR



ANNEXE 4 : FINESSE COKE



févr-12	> 63 μ m	>200 μ m
01/02/2012 00:00	9,68	0,48
01/02/2012 02:00	11,52	0,36
01/02/2012 04:00	10,80	0,32
01/02/2012 06:00	8,36	0,24
01/02/2012 08:00	9,16	0,36
01/02/2012 10:00	5,40	0,16
01/02/2012 12:00	5,92	0,24
01/02/2012 14:00	6,48	0,28
01/02/2012 16:00	6,20	0,24
01/02/2012 20:00	8,48	0,40
01/02/2012 22:00	4,72	0,40
02/02/2012 00:00	5,04	0,36
02/02/2012 02:00	4,32	0,36
02/02/2012 04:00	5,44	0,28
02/02/2012 06:00	5,84	0,28
02/02/2012 08:00	5,36	0,20
02/02/2012 10:00	5,92	0,40
02/02/2012 12:00	5,66	0,36
02/02/2012 14:00	5,84	0,32
02/02/2012 16:00	6,00	0,40
02/02/2012 20:00	4,08	0,32
02/02/2012 22:00	5,16	0,32
03/02/2012 00:00	5,04	0,36
03/02/2012 02:00	5,28	0,32
03/02/2012 04:00	6,68	0,40
03/02/2012 06:00	6,44	0,32
03/02/2012 08:00	6,56	0,36
03/02/2012 10:00	6,24	0,32
03/02/2012 12:00	5,92	0,28
03/02/2012 14:00	6,60	0,44
03/02/2012 16:00	6,16	0,40
03/02/2012 18:00	5,16	0,28
03/02/2012 20:00	6,36	0,32
03/02/2012 22:00	5,88	0,28
04/02/2012 00:00	5,92	0,28
04/02/2012 02:00	6,12	0,32



01/03/2012 00:00	7,80	0,32
01/03/2012 02:00	7,76	0,36
01/03/2012 04:00	7,28	0,32
01/03/2012 06:00	6,80	0,28
01/03/2012 16:00	4,88	0,32
01/03/2012 18:00	4,52	0,24
01/03/2012 20:00	5,12	0,28
01/03/2012 22:00	4,84	0,20
02/03/2012 00:00	5,48	0,28
02/03/2012 02:00	5,32	0,24
02/03/2012 04:00	5,88	0,28
02/03/2012 06:00	9,44	0,24
02/03/2012 10:00	4,51	0,16
02/03/2012 12:00	4,44	0,16
02/03/2012 16:00	5,04	0,32
02/03/2012 16:58	5,04	0,32
02/03/2012 18:00	4,56	0,28
02/03/2012 20:00	5,88	0,32
02/03/2012 22:00	6,12	0,36
03/03/2012 02:00	5,76	0,32
03/03/2012 04:00	5,52	0,28
03/03/2012 06:00	5,04	0,24
03/03/2012 08:00	5,36	0,28
03/03/2012 10:00	5,20	0,24
03/03/2012 12:00	5,48	0,20
03/03/2012 14:00	6,80	0,32
03/03/2012 16:00	5,72	0,24
03/03/2012 18:00	6,16	0,28
03/03/2012 20:00	6,56	0,28
04/03/2012 00:00	6,52	0,32
04/03/2012 02:00	6,44	0,28
04/03/2012 04:00	6,76	0,32
04/03/2012 06:00	5,52	0,24
04/03/2012 08:00	5,24	0,20
04/03/2012 10:00	5,76	0,24
04/03/2012 12:00	5,44	0,28



avr-11	> 63 μ m	>200 μ m
01/04/2012 00:00	4,04	0,16
01/04/2012 04:00	5,52	0,32
01/04/2012 06:00	5,12	0,28
02/04/2012 12:00	6,00	0,20
02/04/2012 14:00	6,36	0,24
02/04/2012 16:00	6,28	0,20
02/04/2012 18:00	6,52	0,24
04/04/2012 10:00	17,68	0,36
04/04/2012 12:00	10,88	0,32
04/04/2012 14:00	5,40	0,28
04/04/2012 16:00	5,08	0,24
04/04/2012 18:00	4,80	0,24
04/04/2012 20:00	5,96	0,28
04/04/2012 22:00	4,72	0,20
05/04/2012 00:00	4,36	0,24
05/04/2012 04:00	5,20	0,28
05/04/2012 06:00	4,72	0,28
05/04/2012 08:00	3,76	0,28
05/04/2012 10:00	4,20	0,32
05/04/2012 14:00	4,86	0,36
05/04/2012 16:00	4,48	0,24
05/04/2012 18:00	4,72	0,28
06/04/2012 00:00	5,20	0,28
06/04/2012 02:00	4,96	0,32
06/04/2012 04:00	4,52	0,28
06/04/2012 06:00	5,72	0,20
06/04/2012 10:00	7,20	0,28
06/04/2012 14:00	9,84	0,36
06/04/2012 16:00	7,88	0,32
06/04/2012 18:00	8,16	0,36
06/04/2012 20:00	8,64	0,40
06/04/2012 22:00	3,60	0,24
07/04/2012 00:00	3,68	0,20
07/04/2012 04:00	5,12	0,28
07/04/2012 06:00	4,84	0,08
07/04/2012 08:00	4,56	0,12



mai-11	> 63 μ m	>200 μ m
01/05/2012 02:00	8,40	0,36
01/05/2012 04:00	8,76	0,28
01/05/2012 06:00	7,16	0,40
01/05/2012 08:00	6,92	0,36
01/05/2012 10:00	7,68	0,60
01/05/2012 12:00	7,28	0,48
01/05/2012 14:00	6,44	0,36
01/05/2012 16:00	5,56	0,32
01/05/2012 20:00	6,08	0,36
01/05/2012 22:00	6,88	0,32
02/05/2012 00:00	5,72	0,28
02/05/2012 02:00	5,32	0,20
02/05/2012 06:00	6,88	0,32
02/05/2012 08:00	5,64	0,28
02/05/2012 10:00	6,36	0,28
02/05/2012 12:00	5,60	0,36
02/05/2012 14:00	5,20	0,32
02/05/2012 16:00	5,28	0,32
02/05/2012 18:00	5,16	0,32
02/05/2012 20:00	5,44	0,36
03/05/2012 02:00	6,88	0,32
03/05/2012 04:00	7,04	0,28
03/05/2012 06:00	7,24	0,24
03/05/2012 08:00	6,92	0,24
03/05/2012 10:00	7,44	0,24
03/05/2012 12:00	7,84	0,32
03/05/2012 14:00	6,52	0,24
03/05/2012 16:00	6,04	0,20
03/05/2012 18:00	5,96	0,20
03/05/2012 20:00	6,44	0,24
03/05/2012 22:00	7,12	0,28
04/05/2012 00:00	6,72	0,20
04/05/2012 04:00	7,88	0,32
04/05/2012 06:00	7,88	0,36
04/05/2012 08:00	7,24	0,32
04/05/2012 10:00	8,00	0,36



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ☞ Reporting marche- répartition de la consommation calorifique atelier four1.
- ☞ Dépouillement Bilan thermique 14-02-2012.
- ☞ Dépouillement Bilan thermique 25-04-2012.
- ☞ Process book refroidisseur
- ☞ Touil-1487
- ☞ Théorie calcul bilan thermique
- ☞ Quelques rapports de stage de fin d'étude effectué à LAFARGE ciment usine de Meknès
- ☞ [1] process book refroidisseur
- ☞ [2] service procédé de Lafarge
- ☞ [3] service procédé de Lafarge
- ☞ [4] service procédé de Lafarge
- ☞ [5] service procédé de Lafarge

RÉFÉRENCES WÉBOGRAPHIQUES

@ <http://www.lafarge.com>;

@Christine.Frances@ensiacet.fr