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

Détermination et optimisation des pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson

Présenté par:

MCHACHI Chaimae

Encadré par:

- **M. Abdelhakim JALAL**
- **Pr. Jamal HAZEM FST Fès**

Soutenu Le 25 Juin 2015 devant le jury composé de:

- **Pr. Jamal Eddine HAZM**
- **Pr. Abdeslam MELIANI**
- **Pr. Fouad KHALIL**

Stage effectué à : LAFARGE Meknès

2014/2015

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: MCHACHI Chaimae

Titre: Détermination et optimisation des pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson

Résumé

Le stage que j'ai effectué à la cimenterie LAFARGE Meknès à pour objectifs de déterminer et d'optimiser les pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson.

L'étude comparative des éléments de la ligne de cuisson indique que les pertes d'énergie thermique par les parois au niveau du four et de la tour de préchauffage sont les plus importantes et nécessitent un plan d'action impérieux.

L'analyse des causes montre que seules les qualités des briques réfractaires et la substitution des briques par des bétons sont responsables de l'augmentation de ces pertes.

La substitution des briques réfractaires de l'année 2014 par ceux utilisées en 2003 au niveau du four et de la tour était la solution approchée pour réduire de ces pertes.

Mots clés:

Cuisson, four, pertes thermiques par parois, brique réfractaire, tour de préchauffage

Dédicace

A nos parents, la lumière de notre vie, pour leur amour et leurs sacrifices ;

A nos chers frères symbole de la fraternité ;

A nos adorables amies pour leur soutien ;

A ceux que nous aimons ;

A ceux qui nous aiment ;

A toute personne qui nous a appris quelque chose ;

Et en fin à toute personne et à toute bonne foi ;

On dédie ce que nous sommes…

Remerciements

C'est avec gratitude que tiens à remercier Pr .Jamal Eddine HAZM pour son grand effort qu'il a fourni à fin de me donner le meilleur.

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

Le remercie particulièrement mon encadrant M. Abdelhakim JALAL pour son aide précieuse.

Je tiens aussi à remercier Pr. Abdesalam MELIANI Et Pr. Fouad KHALIL 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

Glossaire

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

Clinker : Composant du ciment résultant de la cuisson, dans un four de calcination, d'un mélange dosé de calcaire et d'argile.

CaO : Oxyde de Calcium CaO, largement connu par la chaux, est un composant majeur du Clinker

CPJ : Ciment Portland avec ajout de constituants secondaires

C2S : Silicate bi-calcique ou Bélite, est un composant du clinker.

C3S : Silicate tricalcique ou Alite, est le constituant principale du clinker.

C4AF : Alumino-ferrite tétra-calcique ou Ferrite, composant principale du clinker qui a tendance à noircir le ciment.

EVS : Échangeur à voie sèche

KK : Clinker.

MgO : Oxyde de magnésium, est un composant mineur de clinker.

MPa : Le méga pascal est une unité utilisée pour la mesure de haute pression.

SiO2 ou Silice : Oxyde de silicium, est un composant majeur de clinker.

Liste des figures

Figure 1:Organigramme de LAFARGE Meknès 3
Figure 2:Composantes du ciment 4
Figure 3: Schéma simplifié de procédé de fabrication du ciment 5
Figure 4:Ligne de cuisson a voie sèche 6
Figure 5:Mouvement de la matière à l'intérieur du cyclone 6
Figure 6:Différentes zones du four 7
Figure 7:Refroidisseur à grille 10
Figure 8:Consommation calorifique de la ligne de cuisson 11
Figure 9:Pyromètre infrarouge Fluke 568 17
Figure 10:Anémomètre Mini Air 2 Multiprobe 18
Figure 11:Répartition d'escargot du cyclone 22
Figure 12:Variation de la température au niveau de la ligne de préchauffage 28
Figure 13:Variation de la vitesse du vent au niveau de la tour de réchauffage 29
Figure 14:Variation de la température au niveau de la virole 29
Figure 15:Variation de Températures à la surface du refroidisseur et du capot de chauffe 30
Figure 16:Variation de la température à la surface de la gaine d'exhaure 31
Figure 17:Analyse Pareto des pertes d'énergie thermiques par les parois 33
Figure 18:Diagramme Ishikawa des pertes d'énergie thermique par les parois 35
Figure 19:Fiche de vote pondéré 36
Figure 20:Pareto des criticités 38
Figure 21:Historique de briquetage du four 42
Figure 22:Suivie de la résistance thermique du four 44
Figure 23: Pertes des éléments de la tour de préchauffage en Kcal/Kg KK 45
Figure 24:Répartition des briques 46

Liste des tableaux

Tableau 1:Fiche signalétique de LAFARGE Meknès 3
Tableau 2:Formules de calcul du coefficient d'échange naturel 15
Tableau 3:Valeur d'exp 16
Tableau 4:Caractéristiques du pyromètre infrarouge Fluke 568 18
Tableau 5: Caractéristiques de l'anémomètre Mini Air 2 Multiprobe 19
Tableau 6: Équations utilisées pour le calcul des gaines de jonctions C2 -C3 et C3-C4 22
Tableau 7: Équations utilisées pour le calcul de la gaine de jonction entre C4et la boite à fumées..... 23
Tableau 8:Équations utilisées pour le calcul de la boite à fumées 23
Tableau 9:Calcul de la surface de la tour de préchauffage 24
Tableau 10:Calcul de la surface, de la température et de la vitesse du vent du four 25
Tableau 11:Équations de calcul du refroidisseur et du capot de chauffe 26
Tableau 12:Calcul de la surface du refroidisseur 27
Tableau 13: Pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson 32
Tableau 14:Pertes d'énergie thermique cumulées au niveau de la ligne de cuisson 32
Tableau 15:Pertes d'énergie thermique par les parois des Usines de cimenterie 34
Tableau 16: Détaille du vote pondéré 37
Tableau 17: Criticités des causes des pertes d'énergie thermique par les parois 38
Tableau 18: Caractéristiques des briques réfractaires 43
Tableau 19:comparaison des pertes d'énergie thermique entre l'année 2003 et 2014 45
Tableau 20: Coût d'investissement de l'année 2003 des briques réfractaires du four 46
Tableau 21: Coût d'investissement de l'année 2014 des briques réfractaires du four 46
Tableau 22: Coût des pertes d'énergie thermique par parois du four 47
Tableau 23:Coût d'investissement en 2003 des briques réfractaires de la tour 47
Tableau 24 : Coût d'investissement en 2014 des briques réfractaires de la tour 48
Tableau 25: Coût des pertes d'énergie thermique par parois du four 48

Sommaire

Introduction générale : 1

Chapitre 1 : Généralités et Contexte général du projet 2

I. Présentation de Lafarge Meknès : 3

I.1 Fiche signalétique : 3

I.2 Organigramme de LAFARGE Meknès: 3

I.3 Produits fabriqués : 4

II. Processus de fabrication du ciment : 4

II.1 Rappel : 4

II.2 Composition chimique du ciment : 4

II.3 Production du ciment : 5

II.4 Ligne de Cuisson : 5

II.4.1 Principe de fonctionnement des cyclones : 6

II.4.2 Four Rotatif: 7

II.4.3 Refroidisseur à clinker : 9

III. Présentation du projet : 10

III.1 Variation de la consommation d'énergie calorifique en 2014 : 10

III.2 Problématique: 11

III.3 Étapes du déroulement du projet : 12

Chapitre 2 : Étude des transferts thermiques et des appareils de mesure 13

I. Modes de transfert thermique : 14

I.1 Transfert thermique par conduction : 14

I.2 Transfert Thermique par convection : 15

I.2.1 Expression du coefficient de transfert thermique par convection naturelle : 15

I.2.2 Expression du coefficient de transfert thermique par convection forcée : 16

I.3 Transfert par rayonnement : 17

II. Les appareils de mesure : 17

II.1 Pyromètre infrarouge : 17

II.1.1 Caractéristiques techniques : 18

II.1.2 Principe de fonctionnement : 18

II.2 Anémomètre : 18
II.2.1 Caractéristiques techniques : 19
II.2.2 Principe de fonctionnement : 19
Chapitre 3 : Détermination des pertes et Identification des causes 20
I. Calcul des surfaces et mesure des températures des parois et les vitesses du vent des éléments de la Ligne de cuisson : 21
I.1 Principe de l'expérimentation : 21
I.2 Tour de préchauffage : 21
I.2.1 Calcul de la surface des cyclones : 21
I.2.2 Calcul de la surface de la gaine de jonction entre les cyclones : 22
I.2.3 Calcul de la surface de la boite à fumées : 23
I.2.4 Résultats de calcul de la surface et mesure de température et de la vitesse du vent de la tour de préchauffage : 23
I.3 Four : 25
I.4 Refroidisseur : 26
II. Analyse des variations de température et la vitesse du vent au niveau de la ligne de cuisson: 28
II.1 Tour de préchauffage : 28
II.2 Four : 29
II.3 Refroidisseur et capot de chauffe: 30
II.4 Gaine d'exhaure : 31
III. Calcul des pertes d'énergie thermique par parois : 31
III.1 Résultats du calcul effectué : 32
III.2 Évaluation des pertes par les parois des éléments de la ligne de cuisson : 32
IV. Étude de Benchmarking : 33
IV.1 Objectifs : 33
IV.2 Analyse des résultats : 34
V. Identification et analyse des causes ayant impact sur les pertes d'énergie thermique par les parois au niveau du four et de la tour : 34
V.1 Élaboration du diagramme d'ISHIKAWA : 35
V.2 Élaboration du vote pondérée : 35
V.3 Analyse Pareto des pertes : 37
Chapitre 4 : Étude de solution et gain du projet 40
I. L'action mise en place pour la réduction des pertes d'énergie thermique : 41
I.1 Historique de briquetage du Four : 41

I.2 Caractéristique des briques réfractaires : 42
I.3 Calcul et comparaison des résistances thermiques du four : 43
I.4 Comparaison des pertes d'énergie thermique de la tour de préchauffage : 45
I.5 Mise en œ pour traiter les causes qui sont à l'origine : 45
II. Évaluation économique du projet : 46
Conclusion générale : 49

Introduction générale :

LAFARGE, connu par son excellence en matière de politique, de gestion et de maintenance et de sa vision stratégique d'amélioration, on ne cesse de fournir les efforts pour mieux contrôler les pertes, et mettre en évidence sa place de « leader » mondiale dans le domaine du ciment.

Dans le cadre de sa politique d'amélioration continue et compte tenu de ses engagements, LAFARGE entreprend une démarche qui vise à perfectionner la productivité par la minimisation des coûts de fabrication du clinker et du ciment tout en maintenant la qualité du produit final.

Dans ce sens, et sous la supervision du service Procédé au sein de l'usine de LAFARGE Meknès. Notre objectif sera donc l'optimisation des pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson, le présent mémoire se décline en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons l'organisme d'accueil en commençant par la présentation générale de l'Usine Lafarge Meknès. Ensuite nous décrierons la problématique. Une partie de ce chapitre sera consacré aussi à la description de procédé de fabrication de ciment.

Tandis que le deuxième sera consacré à l'étude des modes de transfert thermique ainsi que la présentation des appareils de mesure utilisés pour les analyses.

Le troisième chapitre permettra d'analyser les résultats obtenus, de détecter les causes qui amènent à ce problème.

Le quatrième chapitre comporte une solution approchée que nous proposons pour minimiser les pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson en estimant le gain prévu.

Chapitre 1 :

Généralités et Contexte général du projet

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. Dotée d'équipements de bonne technologie, l'usine de LAFARGE Meknès occupe la place de leader sur le marché.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter LAFARGE Meknès en commençant par à une brève présentation de l'entreprise et une description du produit qu'elle fabrique. Ensuite nous tenterons de mettre un bref aperçu des diverses étapes de traitement de ciment en général, et en particulier sur le fonctionnement de la ligne de cuisson qui va faire l'objet de notre étude. Finalement nous passerons à la présentation du sujet, en énonçant la problématique autour de laquelle s'articulent notre projet et les raisons du choix de projet

I. Présentation de Lafarge Meknès :

I.1 Fiche signalétique :

La fiche signalétique de LAFARGE Meknès est représentée dans le tableau 1.

Tableau 1:Fiche signalétique de LAFARGE Meknès

Dénomination :	**LAFARGE – Usine de Meknès**
Raison sociale	Société anonyme (S.A.)
Capital	476 430 000,00 DH
Secteur d'activité	Industrie chimique et para-chimique
Date de création	1953
Ressources humaines	328
Adresse postale	Km 8, route de Fès, Meknès
Tél	0535 52 26 44
Fax	0535 54 93 07
Directeur d'usine	Abdel-ileh Chouar

I.2 Organigramme de LAFARGE Meknès:

Lafarge Meknès se compose de plusieurs services comme le montre la figure 1.

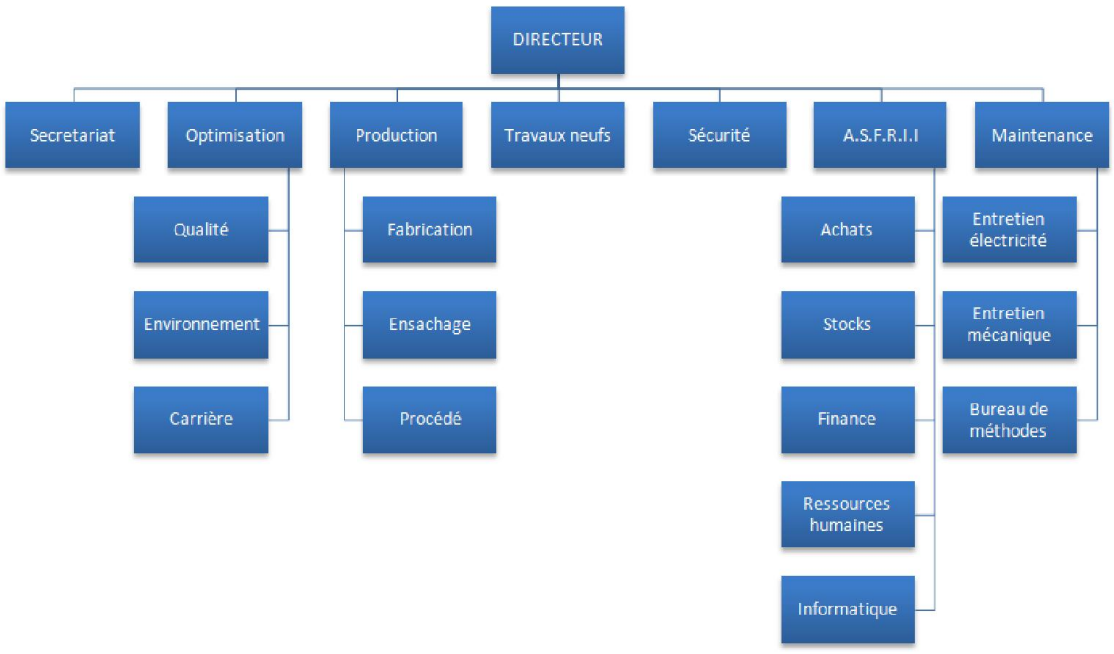

Figure 1:Organigramme de LAFARGE Meknès

I.3 Produits fabriqués :

L'usine de Meknès se spécialise dans la fabrication de trois types de ciment le CPJ35, le CPJ45 et le CPJ55.

CPJ35 est un Ciment portland avec ajouts, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 65%, le reste étant constitué d'ajouts comme le calcaire et le gypse. Parmi les principales caractéristiques garanties par la norme, sa résistance à 28 jours doit être supérieure à 22,5 MPa.

CPJ45 : est un Ciment portland avec ajouts, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 72%, le reste étant constitué d'ajouts comme le calcaire et le gypse. Parmi les principales caractéristiques garanties par la norme, sa résistance à 28 jours doit être supérieure à 32,5 MPa.

CPJ55 est un Ciment portland avec ajouts composé principalement de clinker et de calcaire, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 83%. Sa résistance à 28 jours doit être supérieure à 48 MPa.

II. Processus de fabrication du ciment :

II.1 Rappel :

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 et processus d'hydratation. Après durcissement, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le terme « hydraulique » est généralement réservé aux liants qui ont la propriété de faire priser et durcir même lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, les autres liants sont généralement désignés sous l'appellation de liants aériens.

II.2 Composition chimique du ciment :

Le ciment résulte du broyage de clinker qui est une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique, et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse et une faible quantité de cendres volantes.

Figure 2:Composantes du ciment

II.3 Production du ciment :

Nous pouvons distinguer 5 étapes principales dans le processus de fabrication du ciment :

1. L'extraction de la matière dans la carrière et son homogénéisation.
2. La préparation des matières premières afin de constituer le cru (ou la pâte).
3. La cuisson aboutissant à la création du clinker.
4. Le broyage du clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment.
5. Le stockage et l'expédition des ciments.

Les différentes transformations qui passent par la matière première jusqu'à l'obtention du ciment et son expédition sont résumées dans la figure 3.

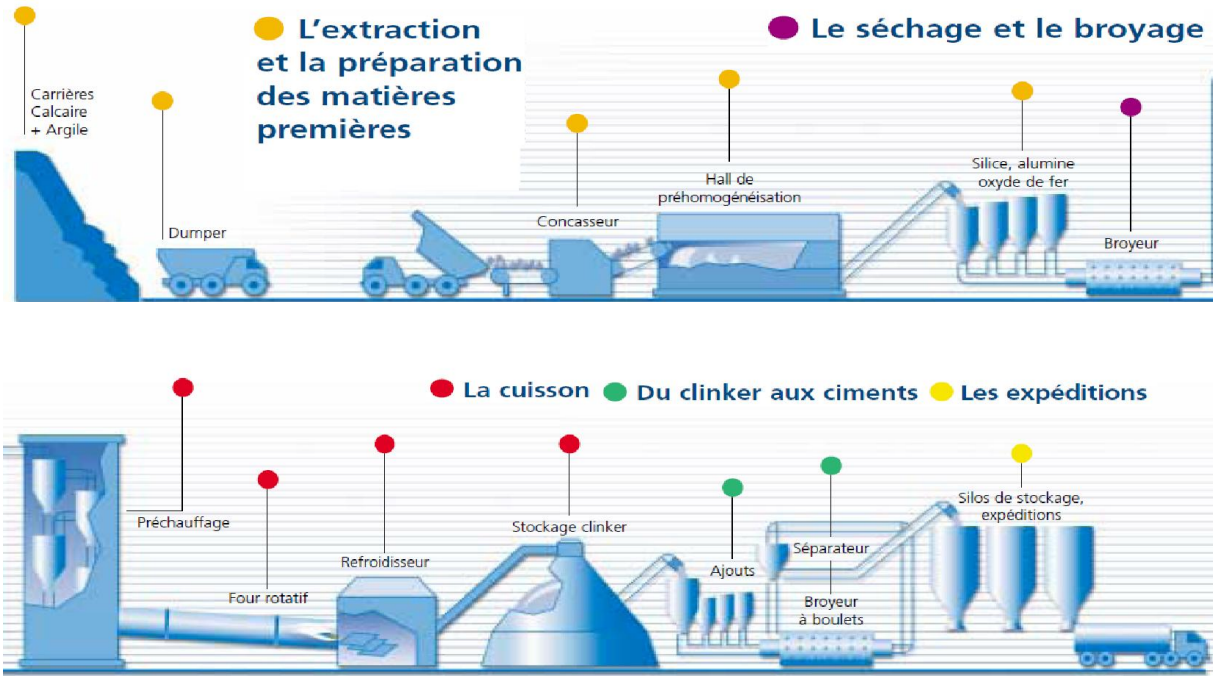

Figure 3: Schéma simplifié de procédé de fabrication du ciment

II.4 Ligne de Cuisson :

La cuisson est l'opération fondamentale de la préparation du ciment, elle recouvre toutes les étapes de transformation chimique de la farine crue, jusqu'à la formation du clinker.

L'atelier de cuisson est constitué de trois éléments principaux :

- Tour de préchauffage
- Four rotatif
- Refroidisseur à clinker

La ligne de cuisson à voie sèche est présentée dans la figure 4.

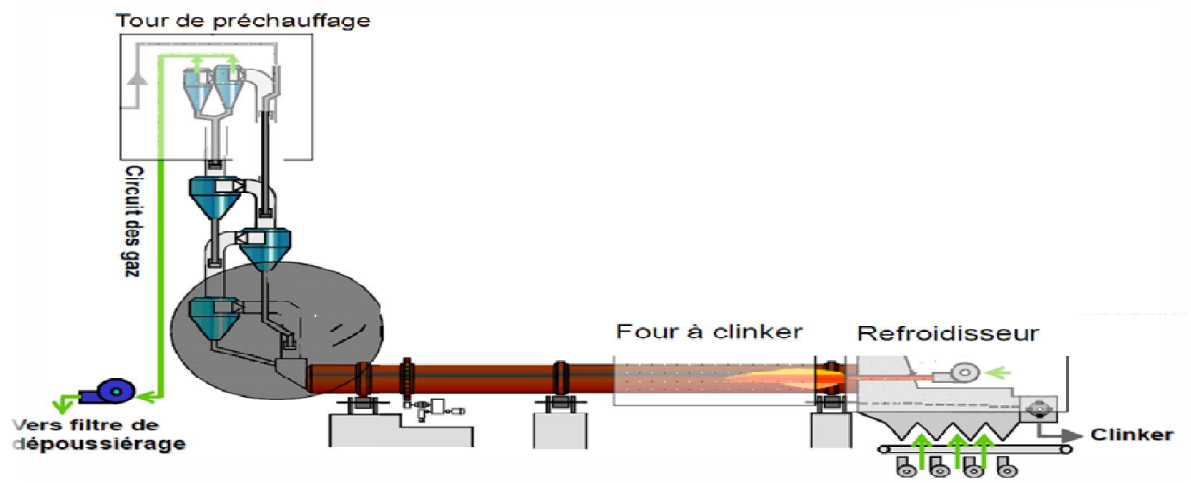

Figure 4:Ligne de cuisson a voie sèche

II.4.1 Principe de fonctionnement des cyclones :

La tour de la ligne de cuisson est constituée d'un ensemble de cyclones ({C1, C1bis}, C2, C3et C4, ou elle s'effectue la préparation de la matière avant son entrée dans le four .Chacun des cyclones est le siège d'un processus d'échange thermique entre la matière et le gaz dans le carneau d'entrée. On peut décomposer le passage dans chaque cyclone se fait en deux étapes distinctes :

- 1er étape : échange thermique entre la farine et gaz à contre-courant, qui se produit en grande partie dans les gaines de liaison entre cyclones lors du transport.
- 2éme étape : séparation entre la farine et les gaz après l'échange thermique, le mélange farine et gaz pénétrant au cyclone tangentiellement en un mouvement tourbillonnaire, qui assure une perte d'énergie cinétique par frottement contre les parois d'où la chute par gravité pour rejoindre l'étage d'en bas alors que les gaz avec les fines remontent sous l'effet du tirage à l'étage supérieur. Ces échanges sont présentés dans la figure5.

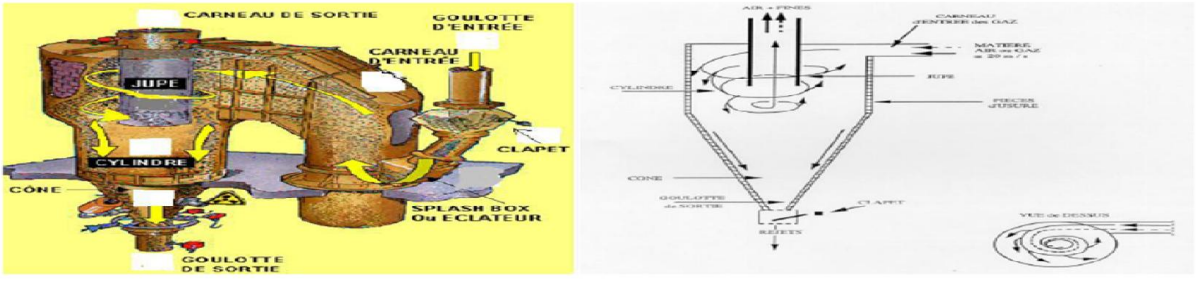

Figure 5:Mouvement de la matière à l'intérieur du cyclone

Lors de cet échange thermique, des réactions physico-chimiques se produisent au fur et à mesure que la température de la farine augmente.

- A 100°C : évaporation de l'eau à l'état libre (humidité).
- Entre 250 et 450 °C: déshydratation de l'eau de liaison.
- Entre 450 et 620°C : décarbonatation des carbonate de magnésium.

  $MgCO_3$ ➔$MgO + CO_2$
- Entre 820 et 900° C : décarbonatation des carbonates de calcium

  $CaCO_3$ ➔$CaO + CO_2$

II.4.2 Four Rotatif:

Le four est une grande enceinte circulaire rotative constitué par une virole en acier animé d'une vitesse de rotation variable pouvant atteindre 3 tr/mn. Il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires et présentes une inclinaison de 3% dans le sens de l'écoulement de la matière, dans laquelle on injecte le combustible sous pression pour produire une flamme. Cette inclinaison combinée avec la rotation font que la matière puisse progresser par gravité vers le brûleur, ce bruleur dégage une flamme qui s'établit à la sortie de la tuyère lieu où le combustible (Fuel, coke de charbon) et le comburant (O_2 de l'air) et qui peuvent atteindre 2000° C. La matière sortant du four est le clinker, la longueur du four atteint 64 mètres, son diamètre est de 4 mètre.

Le four est le siège d'un équilibre entre deux flux :

- Un flux calorifique des fumées de combustion d'aval en amont fourni par la combustion des gaz et le débit d'air secondaire, arrivant du refroidisseur déjà chaud.
- Un flux de matière granulaire, d'amont en aval qui forme dans le four un lit de matière arrivant du préchauffeur partiellement décarbonatée, avec une température de l'ordre de 800 °C à 900 °C et devant atteindre la température de clinkerisation à quelques mètres de la sortie du four. Les différentes zones du four sont présentées dans la figure 6.

- **Différentes zones du four :**

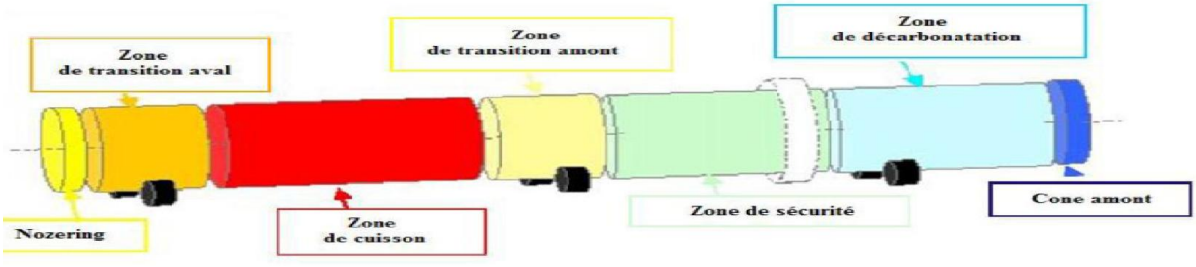

Figure 6:Différentes zones du four

Zone de Préchauffage / Décarbonatation :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ L'absence de croûtage.
- ✓ Une abrasion mécanique de briquetage due au glissement de la matière à l'entrée du four.
- ✓ La fin de la réaction de décarbonatation. Il est obtenu à une température varie entre 820 et 900 °C, et qui donne la libération de la chaux libre CaO en effet :

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

Zone de Sécurité :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ l'absence de croûtage.
- ✓ une abrasion mécanique de briquetage due au glissement de la matière à l'entrée du four.

Zone de Transition amont :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ La formation de l'alumino-ferrite tétra-calcique 4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3 (C4AF) de l'ordre de 5 à 15 %: donne des résistances faibles et peu précisées. Le composant est obtenu à une température de 1200 °C et le résultat de la réaction est la suivante :

$$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \longrightarrow 4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3\ (C_4AF)\ \text{Félite (5-15\%)}$$

- ✓ La formation de l'aluminate tricalcique $3CaOAl_2O_3$(C3A) de l'ordre de 2 à 10,6% .Il est obtenue à 1200°C par la réaction suivante :

$$3CaO + Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO, Al_2O_3\ (C_3A)\ \text{Célite (2-10\%)}$$

Zone de cuisson :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ La formation de silicate tricalcique (3CaO SiO_2 ou C_3S) de l'ordre de 50 à 70 % : ce composant donne de très bonnes résistances à court et à long terme, ainsi qu'une bonne aptitude au broyage. Il est obtenu à 1450 °C par la réaction suivante :

$$3CaO + SiO_2 \longrightarrow 3CaO, SiO_2\ (C3S)\ \text{Alite (50-70\%)}$$

- ✓ Début de formation de silicate bi-calcique. Il est obtenu à une température de 1450 °C par la réaction suivante :

$$2CaO + SiO_2 \longrightarrow 2CaO, SiO_2 \quad (C2S)\ \text{Bélite (10-30\%)}$$

Zone de Transition aval :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ un croûtage instable.

- ✓ des températures élevées
- ✓ la présence d'un bandage.
- ✓ la présence d'éléments volatils, de sels alcalins, d'une atmosphère réductrice.
- ✓ la nature abrasive du clinker.

Nosring / Zone de refroidissement :

Cette zone se caractérise par :

- ✓ l'absence fréquente de croûtage, ce qui la rend vulnérable aux attaques chimiques.
- ✓ La nature hautement abrasive du clinquer.
- ✓ la possibilité de déformation de la virole.
- ✓ la récupération variable de chaleur du refroidisseur.

II.4.3 Refroidisseur à clinker :

Le four est reliée au refroidisseur par le capot de chauffe ,où le clinker sort avec une température de 1450 °C et tombe dans le refroidisseur pour subir une trompe rapide afin de figer les C_3S et de les empêcher de redevenir en C_2S, chose qui influe sur la qualité de clinker et par la suite sur l'atelier de broyage cuit par ce que les C_2S sont difficiles à broyer ainsi que la récupération d'énergie thermique pour les réintroduire au niveau du four ,où ils sont emportées par le flux de l'air secondaire, on a aussi la récupération de l'air d'exhaure. Les parois de refroidisseur sont garnies de réfractaire, Les ventilateurs sont placés de part et d'autre du refroidisseur pour assurer un refroidissement brusque (trompe) .Cette opération est nécessaire à la formation du C_3S, l'élément nécessaire pour la résistance du ciment. Au fur et à mesure de l'avancement du clinker, les besoins en air soufflé évoluent en volume et en pression. Pour permettre cette évolution de manière aussi continue que possible, on réalise un compartimentage sous les plans de grille à l'aide de cloisons transversales. Chaque compartiment est alimenté en air par un ventilateur dont les caractéristiques (débit, hauteur manométrique) sont déterminées par le choix de la surface du compartiment, de la densité de soufflage et la hauteur de la couche.

Le refroidisseur a un triple rôle :

- ✓ Refroidir le clinker qui sort du four
- ✓ Récupérer le maximum de chaleur contenu dans le clinker
- ✓ Assurer la trempe de clinker par un refroidissement énergétique et rapide

Le refroidisseur à grille est présenté dans la figure7.

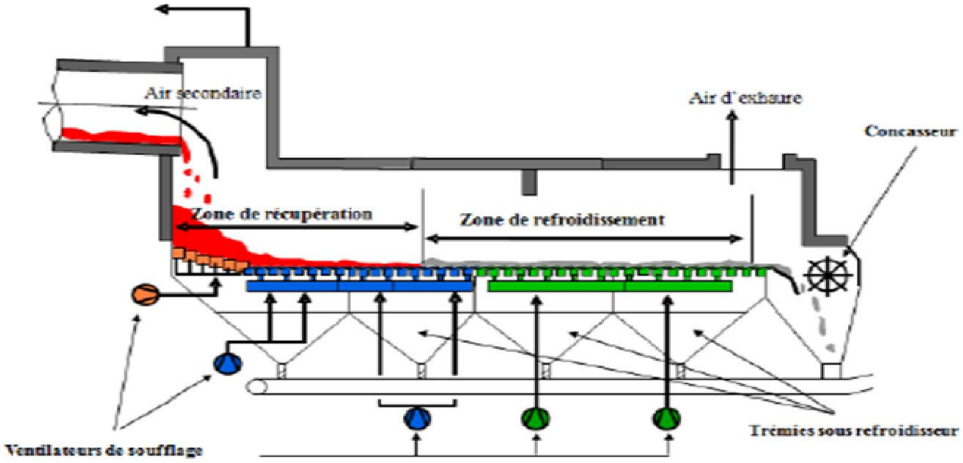

Figure 7:Refroidisseur à grille

Le refroidisseur à grille répartie en deux zones :

Zone de refroidissement : Assure le refroidissement optimale du clinker et aussi réduire l'impact de chaleur sur les processus suivant (transport de clinker, séchage, broyage de ciment).

Zone de récupération : Permet la récupération des calories pour minimiser la consommation thermique et obtenir la température d'air de combustion, qui doivent recyclées au four grâce aux petites chambres de soufflages

Le refroidisseur a un triple rôle :

- Refroidir le clinker qui sort du four
- Récupérer le maximum de chaleur contenu dans le clinker
- Assurer la trempe de clinker par un refroidissement énergétique et rapide.

Après le refroidissement du clinker on n'obtient un clinker qui est composée de :

Phase solide

C_3S 60% à 65%

C_2S 20% à 25%

Phase liquide

C_3A 5%à 10%

C_4AF 5% à 10%

III. Présentation du projet :

III.1 Variation de la consommation d'énergie calorifique en 2014 :

L'usine de Meknès est l'usine la plus consommatrice en énergie calorifique parmi les autres usines de LAFARGE-MAROC.

L'historique de la consommation calorifique au cours de l'année 2014 est présenté dans la figure 8.

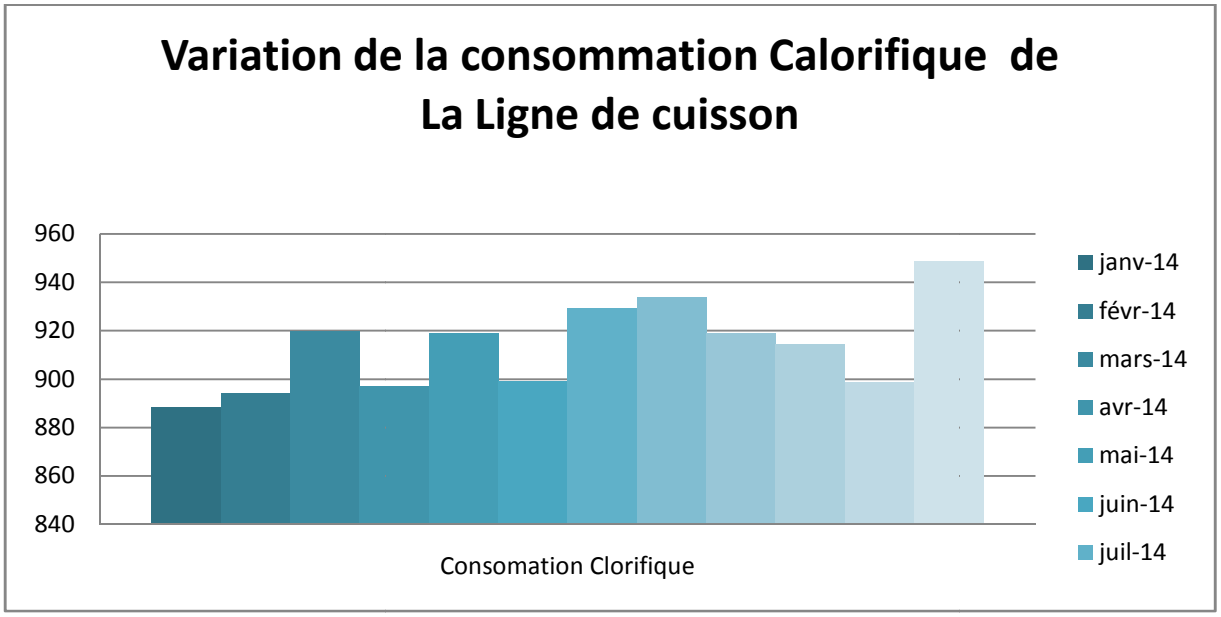

Figure 8:Consommation calorifique de la ligne de cuisson

La ligne de cuisson consomme plus d'énergie thermique par rapport à son objectif qui est de 875 Kcal/t. Plusieurs facteurs influencent cette augmentation, parmi lesquels nous pouvons citer les pertes d'énergie thermique par parois.

III.2 Problématique:

La ligne de cuisson consomme l'énergie de manière intensive. Donc il est indisponible d'évaluer les pertes d'énergie thermique par parois et de trouver un moyen pour réduire ces pertes.

En tant que partie intégrante d'un effort d'optimisation de la consommation calorifique et réduction des coûts d'énergie. Les pertes d'énergie thermique dépendront de la température de surface. Alors une augmentation excessive de température pourrait entrainer des problèmes structurels induits par une différence de dilatation thermique entre l'enveloppe et les briques réfractaires.

En effet ce projet consiste à réduire les pertes d'énergie thermique (convection et radiation) et de trouver des résolutions pour les minimiser en effectuant une analyse des caractéristiques des briques réfractaires et des bétons.

III.3 Étapes du déroulement du projet :

A fin de réaliser ce projet nous proposons de gérer notre mission qui s'appuie sur une bonne maîtrise de procédé de fabrication du ciment et des outils d'analyse et de communication, d'avoir recours aux documentations , de visiter les équipements et les installations, déclinée en cinq étapes :

- ✓ La première étape à pour but de calculer la surface de la ligne de cuisson qui nécessite un calcul de la surface de chaque élément constituant la ligne en se basant sur les plans géométriques ainsi que les mesures sur terrain .
- ✓ La deuxième étape vise à mesurer la température et la vitesse du vent de surfaces calculées auparavant. Cette étape consiste en un travail sur terrain et se fait en parallèle avec l'étape précédente.
- ✓ La troisième étape consiste à calculer les pertes d'énergie thermique par parois à partir d'une fiche de calcul standard de Lafarge (Wall losses calculassions kiln 1).
- ✓ La quatrième étape est consacrée à une étude comparative de Benchmarking avec les usines Internationales de Lafarge afin de situer nos résultats par rapport à l'international.
- ✓ La cinquième étape vise à analyser les causes, interpréter ces résultats et rechercher des solutions en exploitant un ensemble des outils (Ishikawa ; Pareto ; vote pondéré) afin d'énumérer les causes les plus susceptibles d'avoir le plus grand impact sur les pertes, trouver les résolutions et esquisser une étude globale pour évaluer la rentabilité des investissements à engager dans la solution proposée.

Chapitre 2 :

Étude des transferts thermiques et des appareils de mesure

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première nous expliquerons les différents modes de transfert de chaleur qui sont responsables des pertes d'énergies thermiques par parois et les équations misent en jeu et la deuxième partie nous décrirons les appareils qui permettent de mesurer la température et la vitesse du vent.

I. Modes de transfert thermique :

De tous le temps les problèmes de transmission d'énergie et en particulier de la chaleur ont une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des réactions de transformations chimiques.

En effet, dans certains systèmes réactionnels c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endothermique ou exothermique). En outre, de nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de l'énergie. Le transfert de chaleur au sein d'une phase où plus généralement entre deux phases se fait suivant trois modes:

- Par conduction
- Par rayonnement
- Par Convection

I.1 Transfert thermique par conduction :

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température. [1]

- **Expression du Flux thermique de conduction d'une paroi cylindrique :**

Le flux thermique correspondant est :

$$\emptyset = \frac{\boldsymbol{\lambda \times sdT}}{\boldsymbol{dr}} \rightarrow \emptyset = \frac{\boldsymbol{\lambda \times 2\pi r \times LdT}}{\boldsymbol{dr}}$$

L'équation précédente peut donc s'intégrer de l'intérieur à l'extérieur du cylindre on obtiendra la formule suivante :

$$\emptyset = \frac{\boldsymbol{\lambda \times 2\pi \times L(Ti - Te)}}{\boldsymbol{ln\frac{Re}{Ri}}}$$

$\emptyset$: Quantité de chaleur en W

λ: Coefficient de conduction des matériaux en W/m.K

S : Surface des matériaux en m²

Ti -Te : Écart de température entre les 2 parois en K

L : Longueur de la paroi cylindrique en m

Re et Ri : Rayon extérieur et intérieur de la paroi en m

➢ **Expression de la résistance thermique d'un tube cylindrique :**

A partir de l'expression du flux, on déduit l'expression de la résistance thermique d'un tube :

$$\emptyset = \frac{\lambda \times 2\pi \times L(Ti - Te)}{ln\frac{Re}{Ri}} \rightarrow \emptyset = \frac{(Ti - Te)}{Rth}$$

$$Rth = \frac{ln\frac{Re}{Ri}}{\lambda \times 2\pi \times L}$$

I.2 Transfert Thermique par convection :

C'est un transfert de chaleur qui s'accompagne d'un transfert de masse ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide

L'étude du transfert de chaleur par convection est gouvernée par la loi du Newton et permet de déterminer les échanges de chaleur qui se produisent entre un fluide et une paroi. Alors l'expression du flux est :

$$\emptyset = h \times S \times (Tparoi - Tambiante)$$

$\emptyset$: Flux thermique en watt (W)

h : Coefficient thermique de convection (en $W.m^{-2}.K^{-1}$)

S : Surface d'échange

($T_{paroi} - T_{ambiante}$) : Différence de température entre parois et l'air ambiant

Nous parlons de la convection forcée quand le mouvement du fluide s'effectue grâce à des forces externes (pompe, ventilateur, agitateur) et de la convection naturelle quand le mouvement s'effectue sous l'influence de différences de densités dues à des différences de températures au sein du fluide[2]

I.2.1 Expression du coefficient de transfert thermique par convection naturelle :

L'expression de la convection forcée dépend de la nature d'écoulement ainsi que les géométries (Sphère,cylindre….). Les Formules de calcul du coefficient d'échange naturel sont regroupées dans le tableau 2.

Tableau 2:Formules de calcul du coefficient d'échange naturel

Type d'écoulement	Formule du coefficient par convection naturelle
Régime laminaire	**hnat=1,18× (ΔT⁄(L))1/4**
Régime turbulent	**hnat=1,13× (ΔT) 1/3**

I.2.2 Expression du coefficient de transfert thermique par convection forcée :

L'expression de la convection forcée dépend de la vitesse du vent ainsi dépend du type de convection h_{nat}. La formule utilisée dans les calculs est la suivante :

$$\mathbf{hf = hnat \times (1+0{,}57 \times V)^{Expo}}$$

La valeur d'expo varie entre 0,5et 0,8 en fonction de la vitesse du vent comme le montre le tableau 3.

Tableau 3:Valeur d'exp

	Type de convection	Valeur d'exponent (exp)
v <1.30 m/s	Natural / Laminar	0.5
v <1.55 m/s	Natural / Turbulent	0.5
v <2.00 m/s	Forced / Laminar	0.5
v <2.40 m/s	Forced / transitory (50Laminar/50Turbulent)	0.5
v >2.40 m/s	Forced / Turbulent	0.5
v <3.00 m/s	Forced / Turbulent	0.5
v <5.00 m/s	Forced / Turbulent	0.6
v <8.00 m/s	Forced / Turbulent	0.75
v >8.00 m/s	Forced / Turbulent	0.8

Pour le four rotatif le coefficient de convection forcé dépend de la vitesse du vent, plus la vitesse des ventilateurs de zone ainsi que la vitesse de rotation du four. Alors l'expression de la vitesse de convection devient :

$$\boldsymbol{Vc = (1\text{-}20\%) \times \left(\pi \times d \times \frac{Vr}{60} + Vv\right) + 20\% \times \left(\pi \times d \times \frac{Vr}{60} + Vv + Vf\right)}$$

V_c : vitesse de convection (m/s).

V_v : vitesse du vent (m/s).

V_r : vitesse de rotation du four(m/s)

V_f : vitesse des ventilateurs de zone (m/s).

20 % cette valeur représente la longueur de la zone où il y a des ventilateurs par rapport à la longueur du four

Dans ce cas la valeur de exp dépend da la vitesse de convection, on utilise le tableau précèdent pour préciser la valeur de exp mais on changeant la notion de vitesse du vent par la vitesse de convection. Et on garde la même formule du coefficient de convection forcée.

I.3 Transfert par rayonnement :

Le transfert thermique par rayonnement est caractérisé fondamentalement par la loi de Stefan-Boltzmann est donné par la relation suivante :

$$\emptyset = \varepsilon \times \sigma \times S \times (T_p^4 - T_a^4)$$

$\mathcal{E}$: L'émissivité de la surface (0.85, 0.95)

σ : Le coefficient de Stephan Boltzmann = $4.882.10^{-8}$ ($Kcal/m^2.K^4$)

S : La surface d'échange en (m^2)

T_p : La température de paroi (K)

T_a : La température ambiante (K)

II. Les appareils de mesure :

II.1 Pyromètre infrarouge :

Le pyromètre optique est l'appareil utilisé pour la mesure superficielle de la température du clinker tout au long de la ligne de cuisson. La figure 9 montre le pyromètre infrarouge Fluke 568.

Figure 9:Pyromètre infrarouge Fluke 568

II.1.1 Caractéristiques techniques :

Les caractéristiques du pyromètre infrarouge utilisé dans cette étude sont Rassemblées dans le tableau 4.

Tableau 4:Caractéristiques du pyromètre infrarouge Fluke 568

Marque	Fluke 568 IR Thermomètre
Gamme de température infrarouge	-40 à 800 °C (-40°F à 1 472°F)
Échelle de température	Degré Celsius, Degré Fahrenheit
Température de Fonctionnement	0°C à 50°C (32°C à 122°C)
Temps de réponse infrarouge	<500 ms
Réglage d'émissivité	Réglage numérique de 0,1 à1
Dimensions minimales du point	19 mm
Réponse spectrale infrarouge	8 µm à 14 µm

II.1.2 Principe de fonctionnement :

Dans sa conception la plus élémentaire d'un Pyromètre infrarouge est constituée d'une lentille pour focaliser l'énergie infrarouge sur un détecteur qui convertit l'énergie en un signal électrique, ensuite Les circuits électroniques de l'appareil traduisent l'information en température qui est ensuite affichée sur l'écran

Cette configuration facilite la mesure de température à distance sans contact avec l'objet à mesurer. [3]

II.2 Anémomètre :

L'anémomètre est conçu pour l'exécution des mesures de la vitesse de l'air et de son débit dans les installations comme l'air ambiant ou bien l'air entrant à un ventilateur. L'anémomètre Mini Air 2 Multiprobe est présenté dans la figure 10.

Figure 10:Anémomètre Mini Air 2 Multiprobe

II.2.1 Caractéristiques techniques :

Les caractéristiques de l'anémomètre utilisé dans cette étudeest rassemblé dans le tableau 5.

Tableau 5: Caractéristiques de l'anémomètre Mini Air 2 Multiprobe

Marque	Anémomètre Mini Air 2 Multiprobe
Plage de vitesse	0,4 à 30 m/s
Précision	±3 % (<20 m/s) et ±4 % (>20 m/s)
Plage de température	-20 à +80 °C
Humidité de l'air	5à 95%
Plage du débit volumétrique	0,0 ... 999900 m³/min

II.2.2 Principe de fonctionnement :

Cet instrument est formé d'une hélice constituée de pales fixées sur un axe de rotation et orientées par rapport à la direction de l'écoulement. L'axe de rotation est placé parallèlement à la direction de l'écoulement et la vitesse d'air tend à faire tourner les pales. La vitesse de rotation de l'hélice est sensiblement proportionnelle à la vitesse de l'écoulement et est détectée sans contact, optiquement ou électriquement. [4]

Chapitre 3 :

Détermination des pertes et identification des causes

Ce chapitre présente la mise en œuvre expérimentale de notre projet, dans un premier lieu nous calculerons les surfaces externes de chaque partie de la ligne de cuisson, nous mesurerons la température et la vitesse du vent des surfaces calculées auparavant, nous déterminerons les pertes d'énergie thermique par les parois (Convection et rayonnement), nous effectuerons un Benchmarking avec des usines de cimenteries internationales ensuite nous détecterons les causes qui amènent à ces pertes.

I. Calcul des surfaces et mesure des températures des parois et les vitesses du vent des éléments de la Ligne de cuisson :

I.1 Principe de l'expérimentation :

Une série de mesure a été opérée dans des intervalles de temps réguliers et prédéterminés en concertation avec le chef de département de production. À l'heure prévue pour la mesure, nous avons averti l'opérateur du démarrage de la séance de mesure et nous commençons par prendre les températures et les vitesses de vent suivant la répartition des surfaces décrites. Il faut noter que seules ces mesures de température et de vitesse de vent ne nous prennent pas moins de 90 minutes.

Ces mesures ont été réalisées à l'aide des appareils numériques :

- ✓ Pyromètre infrarouge **Fluke 568**
- ✓ L'anémomètre **Mini Air 2 Multiprobe**

Le calcul des surfaces des éléments de la ligne de cuisson est la partie la plus complexe et la plus importante dans ce projet, car ces surfaces sont utilisées pour calculer les pertes par parois. Plusieurs équations ont été développées au cours de ce projet. En autre, il y a les calculs des surfaces externes de chaque partie de la ligne de cuisson.

Les plus complexes sont les calculs du toit des cyclones qui ont une forme spirale (sous forme escargot), le refroidisseur et les gaines.

I.2 Tour de préchauffage :

I.2.1 Calcul de la surface des cyclones :

La méthode de calcul suivante résume les équations utilisées pour le calcul de la surface des cyclones de la tour de préchauffage.

- **Calcul de la surface du cône :**

$$S_{cône} = \pi \times (R1 + R2) \times a \quad Et \quad a = \sqrt{[(L - C)^2 + (R1 - R2)^2]}$$

Calcul de la surface du cylindre :

$$S_{cylindre} = 2\pi R1(C - hj)$$

- **Calcul de la surface d'escargot :**

Pour le calcul de la surface d'escargot nous avons découpé la surface en 4 cercles chacune à un rayon R différent comme le montre la figure 11.

Figure 11:Répartition d'escargot du cyclone

Pour le calcul du périmètre du toit nous avons devisé chaque cercle en 4 parties :

$$S_{escargot} = P_{Toit} \times hj$$

$$P_{Toit} = P_1+P_2+P_3+P_4+a+b$$

$$P1 = \frac{2\pi R1}{4} \qquad P2 = \frac{2\pi R2}{4} \qquad P3 = \frac{2\pi R3}{4} \qquad P4 = \frac{2\pi R4}{4}$$

- **Calcul de la surface du toit :**

$$S_{Toit} = S_{escargot} - S_{jupe} \text{ Et } S_{jupe} = \pi \times r^2$$

I.2.2 Calcul de la surface de la gaine de jonction entre les cyclones :

Seules les gaines de gaz C_1 et C_{1bis} sont calorifugées et ne sont pas pris en considération dans le calcul des pertes d'énergie thermique par parois.

Les équations utilisées pour le calcul des surfaces de la gaine de jonction entre les cyclones C_2 et C_3 et la gaine de jonction entre les cyclones C_3 et C_4 sont les mêmes comme le montre le tableau 6. (schéma voir Annexe A)

Tableau 6: Équations utilisées pour le calcul des gaines de jonctions C2 -C3 et C3-C4

Cylindre 1	$Sc1=2\ \pi \times R1 \times L1$
Cône 1	$Sc2 = \pi \times (R1 + R2) \times a$ Et $a = \sqrt{[(L2)^2 + (R2 - R1)^2]}$
Cône 2	$Sc3 = \pi \times (R2 + R3) \times a$ Et $a = \sqrt{[(L3)^2 + (R3 - R2)^2]}$
Cylindre 2	$Sc4 = 2\ \pi\ R3 \times L4$
Cône 3	$Sc5 = \pi \times (a + R4) \times R4$ Et $a = \sqrt{[(R4)^2 + (L5)^2]}$

Les équations utilisées pour le calcul des surfaces de la gaine de jonction entre le cyclone C_4 et la boite à fumées sont présentés dans le tableau 7. (Schéma voir Annexe A)

Tableau 7: Équations utilisées pour le calcul de la gaine de jonction entre C4et la boite à fumées

Cylindre 1	$Sc1=2\,\pi\,R1\times L1$
Cône 1	$Sc2=\pi\times(R1+R2)\times a$ Et $a=\sqrt{[(L2)^2+(R2-R1)^2]}$
Cylindre 2	$Sc3=2\,\pi\,R3\times L3$
Cône 2	$Sc4=\pi\times(R3+R4)\times a$ Et $a=\sqrt{[(L4)^2+(R4-R3)^2]}$
Cône 3	$Sc5=\pi\times(R4+R5)\times a$ Et $a=\sqrt{[(L5)^2+(R5-R4)^2]}$
Cylindre 3	$Sc6=2\,\pi\,R5\times L6$

I.2.3 Calcul de la surface de la boite à fumées :

Les équations utilisées pour le calcul des surfaces de la boite à fumées sont présentés dans le tableau8. (schéma voir Annexe A)

Tableau 8:Équations utilisées pour le calcul de la boite à fumées

Calcul du diaphragme	Cylindre 1	$Sc1=2\,\pi\,R1\times L1$
Calcul du sous diaphragme	Cylindre 2	$Sc2=2\,\pi\,R2\times L2$
	Cylindre 3	$Sc3=2\,\pi\,R3\times L3$
	Cône ouvert	$Sc4=\pi\times a\times(R3+R4)$ Et $a=\sqrt{[(L4)^2+(R4-R3)^2]}$
	Demi-cône	$Sc5=((\pi\times R4\times(R4+a))/2$ Et $a=\sqrt{[(L4)^2+(R4)^2]}$
Calcul de la glisse	Cylindre 4	$Sc6=2\,\pi\,R5\times L5$

I.2.4 Résultats de calcul de la surface et mesure de température et de la vitesse du vent de la tour de préchauffage :

Les résultats de calcul de la surface, de la température et de la vitesse du vent de des éléments constituant la tour de préchauffage sont regroupés dans le tableau 9.

Tableau 9:Calcul de la surface de la tour de préchauffage

	Cyclone C1	Diamètre / Longueur (m)	Surface (m^2)	Température de surface (°C)	Vitesse du vent (m/s)
CycloneC1	Cône C1	2,84	16,7	135	2
	Cylindre C1	2,97	35,4	127	2
	Escargot C1	2,18	29	119	2
	Toit C1	2,97	26,4	148	2
CycloneC1 bis	Cône C1 Bis	2,84	16,7	110	2
	Cylindre C1 Bis	2,97	35,4	125	2
	Escargot C1 Bis	2,18	29	118	2
	Toit C1 Bis	2,97	26,4	156	2
CycloneC2	Cône C2	4,83	37,6	118	1,8
	Cylindre + Escargot C2	4,18	75,7	97	1,8
	Toit C2	2,15	21,8	77	1,8
	Gaine matière C2	1	1	117	1,8
Gaine Gaz C2- C3		2	92	70	1,8
CycloneC3	Cône C 3	4,83	37,6	161	1,6
	Cylindre +Escargot C3	4,18	75,6	120	1,6
	Toit C3	2,12	21,2	75	1,6
	Gaine matière C3	1	1	113	1,6
Gaine Gaz C3- C4		1,97	95,3	144	1,6
CycloneC4	Cône C 4	4,83	37,9	220	1,5
	Cylindre +Escargot C 4	4,18	75,1	150	1,5
	Toit C 4	2,11	20,1	126	1,5
	Gaine matière C 4	1	1	173	1,5
Gaine Gaz (Calorifugé) C 4- *boîte à fumées*		2	130	187	1,5
Boite à fumées	Diaphragme	1,48	4,81	83	1,5
	Sous Diaphragme	2,46	14,18	123	1,5
	Glisse	3,38	20,45	147,5	1,5

I. Four :

Les résultats de calcul de la surface, de la température et de la vitesse du vent du four sont regroupés dans le tableau 10.

Tableau 10:Calcul de la surface, de la température et de la vitesse du vent du four

Géométrie		Temp	Vitesse	Vitesse de	Géométrie		Temp	Vitesse du	Vitesse
Long (m)	Surf (m²)	°C	du vent (m/s)	ventilation (m/s)	Long (m)	Surf (m²)	°C	vent (m/s)	de ventilation (m/s)
1,0	12,57	369	1,3	0		12,57	145	1,3	0
1,0	12,57	354	1,3	0	1,0	12,57	168	1,3	0
1,0	12,57	398	1,3	0	1,0	12,57	198	1,3	0
1,0	12,57	380	1,3	0	1,0	12,57	150	1,3	0
1,0	12,57	325	1,3	0	1,0	12,57	145	1,3	0
Band1	26,85				1,0	12,57	147	1,3	0
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	146	1,3	0
1,0	12,57	265	1,3	0	1,0	12,57	100	1,3	0
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	140	1,3	0
1,0	12,57	269	1,3	0	1,0	12,57	198	1,3	0
1,0	12,57	298	1,3	0	1,0	12,57	201	1,3	0
1,0	12,57	214	1,3	0	1,0	12,57	213	1,3	0
1,0	12,57	215	1,3	0	1,0	12,57	245	1,3	0
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	256	1,3	0
1,0	12,57	201	1,3	0	1,0	12,57	267	1,3	7,25
1,0	12,57	231	1,3	0	1,0	12,57	258	1,3	7,25
1,0	12,57	211	1,3	0	1,0	12,57	235	1,3	7,25
1,0	12,57	224	1,3	0	1,0	12,57	215	1,3	7,25
1,0	12,57	226	1,3	0	1,0	12,57	278	1,3	7,25
1,0	12,57	223	1,3	0	1,0	12,57	148	1,3	7,25
1,0	12,57	226	1,3	0	1,0	12,57	195	1,3	7,25
1,0	12,57	223	1,3	0	1,0	12,57	192	1,3	7,25
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	166	1,3	7,25
1,0	12,57	298	1,3	0	Band3	24,50			
1,0	12,57	317	1,3	0	1,0	12,57	184	1,3	7,52
1,0	12,57	335	1,3	0	1,0	12,57	189	1,3	7,52
1,0	12,57	400	1,3	0	1,0	12,57	238	1,3	7,52
1,0	12,57	350	1,3	0	1,0	12,57	274	1,3	7,52
Band2	24,50				1,0	12,57	256	1,3	7,52
1,0	12,57	256	1,3	0	1,0	12,57	245	1,3	7,52
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	298	1,3	7,52
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	331	1,3	7,52
1,0	12,57	231	1,3	0	1,0	12,57	324	1,3	7,52

I.4 Refroidisseur :

Les équations utilisées pour le calcul des surfaces du capot de chauffe, du refroidisseur et de la gaine d'exhaure sont présentées dans le tableau 11. .(schéma voir Annexe A)

Tableau 11:Équations de calcul du refroidisseur et du capot de chauffe

	Frontal puits	Pave 1		Sc1=2×H1× (l1+L1)
		Prisme1	L'air de base	B=a1×b1
			Périmètre de base	P= a1+b1+h1
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S_2=A+2×B
		Pave 2		Sc1=2×H1× (l2+L2)
		Prisme2	L'air de base	B=a2×b2
			Périmètre de base	P= a2+b2+h2
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S_3=A+2×B
Refroidisseur	Frontal casse boule	Pave 1		Sc1=2×H1× (l1+L1)
		Cylindre		Sc1=2 π R1×L1
		Prisme1	L'air de base	B=a1×b1
			Périmètre de base	P= a1+b1+h1
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S_2=A+2×B
		Prisme2	L'air de base	B=a2×b2
			Périmètre de base	P= a2+b2+h2
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S_3=A+2×B
		Pave droite 1		S_4=2×H_1× (l_1+L1)
		Pave droite 2		S5=2×H× (L2+l_2)
	Frontal Refroidisseur	Cylindre		Sc_1=2 π R1×L1
		Pave droite		S_2=2×H_1× (l2+L2)
		Prisme1	L'air de base	B=a1×b1
			Périmètre de base	P= a1+b1+h1
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S_2=A+2×B
		Prisme2	L'air de base	B=a2×b2
			Périmètre de base	P= a2+b2+h2
			L'air latéral	A=P×H1

			L'air Total	S_3=A+2×B
		Prisme3	L'air de base	B=a3×b3
			Périmètre de base	P= a3+b3+h3
			L'air latéral	A=P×H1
			L'air Total	S5=A+2×B
Capot de chauffe	Latéral coté four		Cylindre	Sc1=2 π R1×L1
	Latéral coté refroidisseur		Demi cercle:	Sc2= π R^2_2/2

Les résultats de calcul des surfaces et de mesure des températures ainsi que les vitesses du vent du capot de chauffe, du refroidisseur et de la gaine d'exhaure sont regroupés dans le tableau12. (Schéma voir Annexe A)

Tableau 12:Calcul de la surface du refroidisseur

		Géométrie		Température	
		Hauteur (m)	Surface (m^2)	Ambiant °C	Surface °C
Capot de chauffe	Latéral four	4,5	8,41	25	95
	Latéral refroidisseur	3,38	47,78	25	77
Refroidisseur	Frontal refroidisseur	8,95	103,83	25	65
	Frontal casse boule	3,29	55,34	25	105
	Frontal puits	2,81	36,38	25	95
Gaine d'exhaure	S1	7,6	41,78	25	250
	S2	1,75	0,35	25	210
	S3	1,75	1,42	25	155
	S4	1,75	1,42	25	130
	S5	1,75	1,42	25	105
	S6	1,75	0,35	25	105
	S7	9,63	57,48	25	101
	S8	2,05	9,93	25	100
	S9	1,14	4,08	25	100
	S10	5,64	26,93	25	98
	S11	21,01	189,76	25	90
	S12	1,9	5,37	25	90
	S13	3,39	20,22	25	84
	S14	1,9	5,27	25	80
	S15	2,08	12,41	25	76

II. Analyse des variations de température et la vitesse du vent au niveau de la ligne de cuisson:

II.1 Tour de préchauffage :

Les variations de la température au niveau de la tour de préchauffage sont présentées dans la figure12.

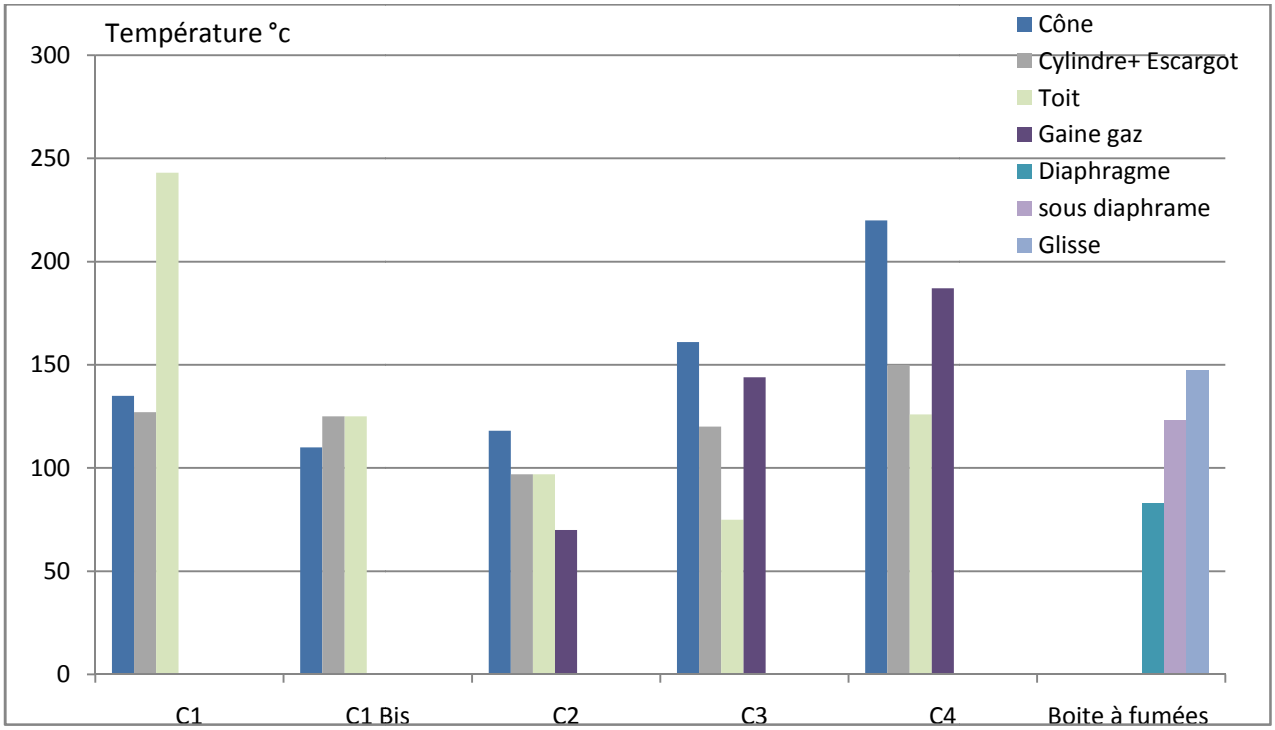

Figure 12:Variation de la température au niveau de la ligne de préchauffage

La variation de la température au long d'un cyclone est traduite par :

- Les échanges thermiques entre la matière et les gaz au niveau des cyclones et des gaines.
- Les briques usés.
- Des zones de briquetage changées par des bétons.
- La formation des concrétions dans des zones au niveau de la paroi du cyclone.

La variation de la vitesse du vent au niveau de la tour de préchauffage est présentée dans la figure 13.

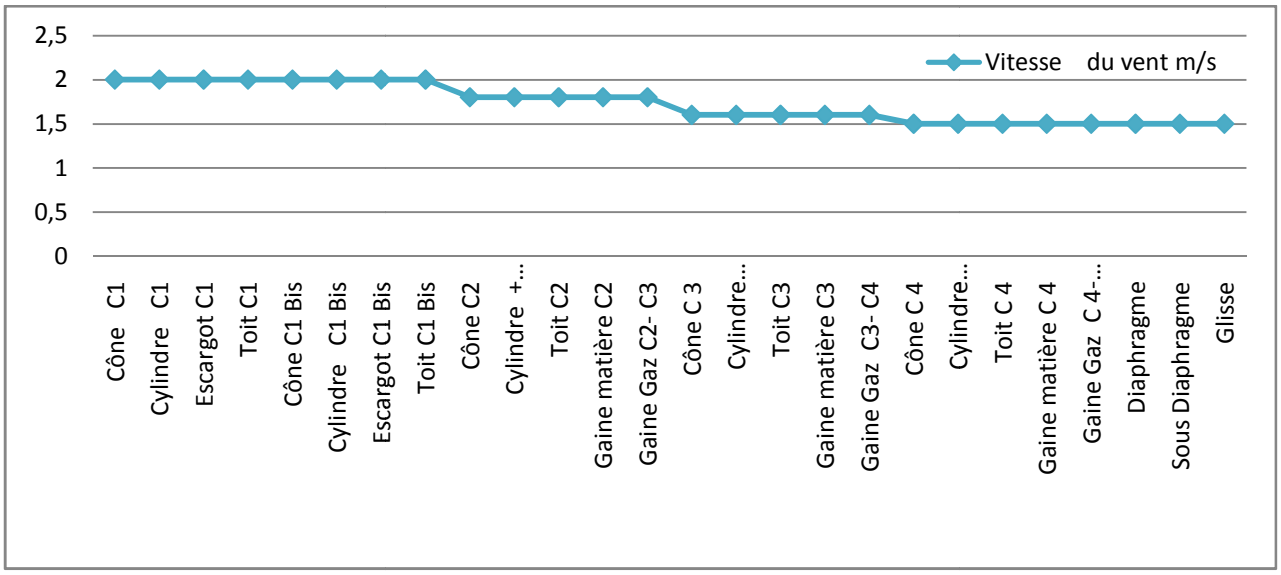

Figure 13:Variation de la vitesse du vent au niveau de la tour de réchauffage

Nous remarquons que la vitesse du vent augmente avec l'altitude, car plus qu'on s'élève en altitude, le poids de l'air au dessus diminue et l'air devient moins dense.

II.2 Four :

Pour élucider l'influence de la température sur la virole, la variation de la température tout au long du four est représentée dans la figure 14.

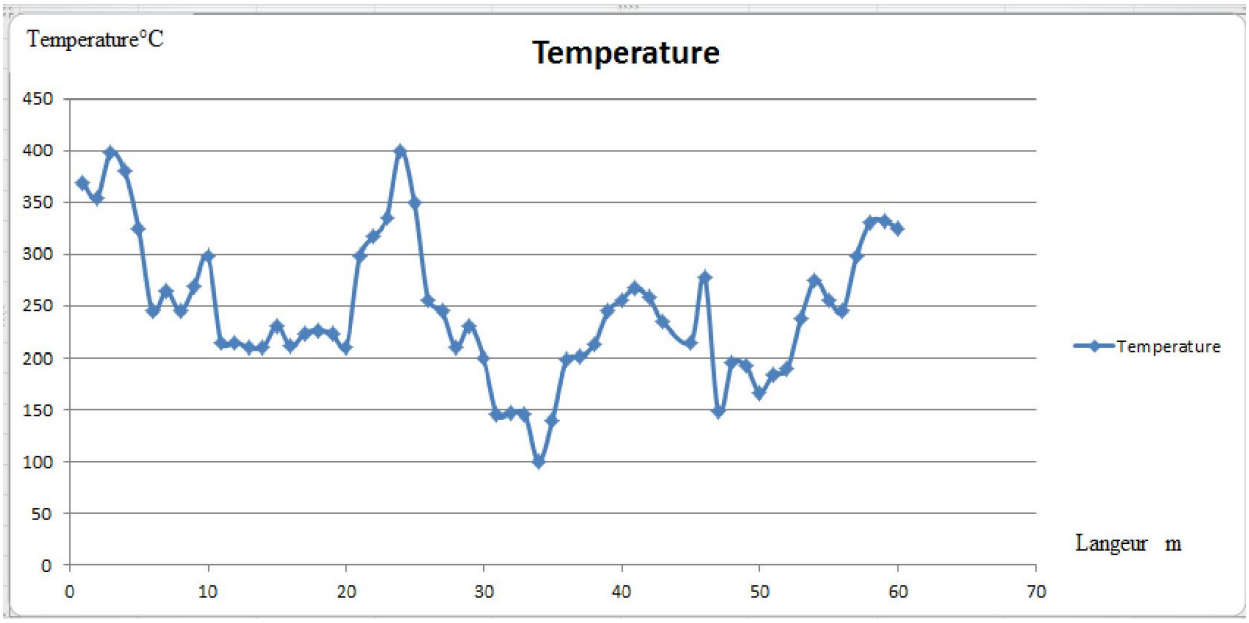

Figure 14:Variation de la température au niveau de la virole

Par la lecture graphique nous remarquons une variation de la température au niveau de la virole. Ceci peut être expliqué par l'augmentation excessive de la température à l'intérieur du four qui entraine des déformations au niveau de la virole et par conséquent des fissurations des briques réfractaires qui conduisent à des pertes d'énergie thermique majeures qui influencent sur la consommation calorifique.

Nous expliquons la diminution de température dans certaine zone par la présence des ventilateurs ainsi que la présence des couches de croutage (dépôt de clinker sur les parois).

La vitesse du vent tout au long du four est de 1,3 m/s et la vitesse de chacune des 18 ventilateurs placés en aval du four est de 7,25 m/s.

II.3 Refroidisseur et capot de chauffe:

La variation de la température à la surface du refroidisseur et du capot de chauffe comme le montre la figure15.

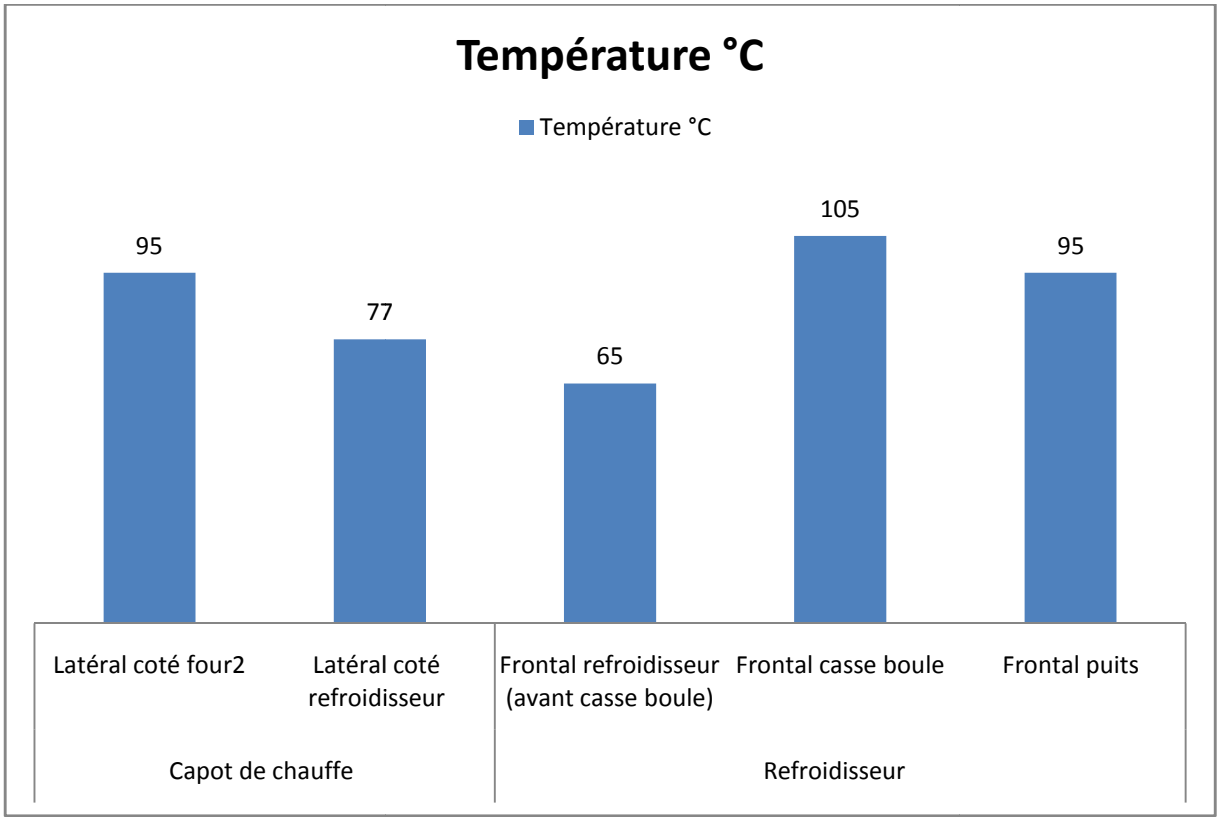

Figure 15:Variation de Températures à la surface du refroidisseur et du capot de chauffe

Nous remarquons qu'au niveau de refroidisseur et du capot de chauffe, la température n'est pas trop élevée à cause de la présence des ventilateurs de soufflage.

II.4 Gaine d'exhaure :

La variation de la température à la surface de la gaine d'exhaure est présentée dans la figure 16.

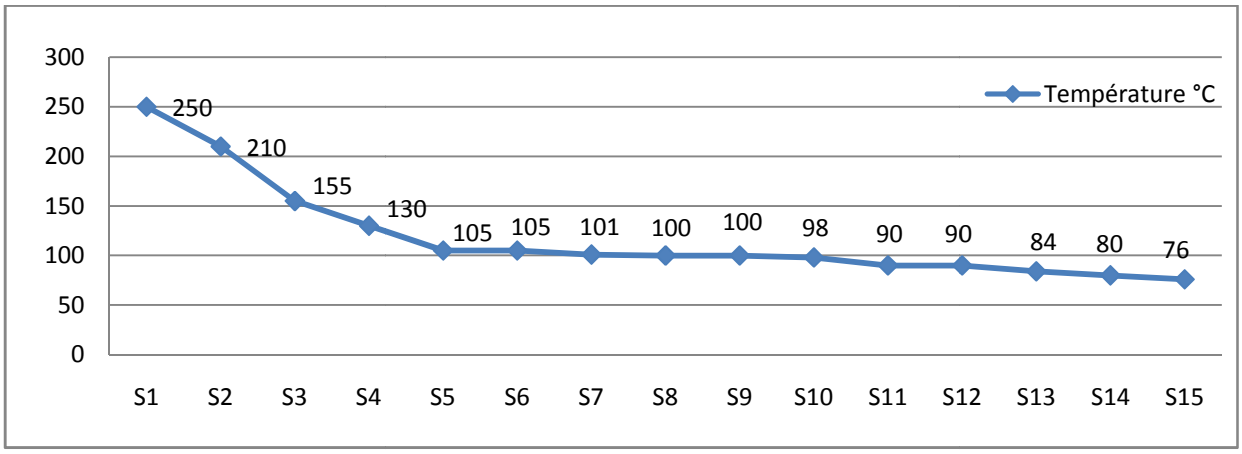

Figure 16:Variation de la température à la surface de la gaine d'exhaure

Nous remarquons que la température en amont de la gaine d'exhaure est élevée par ce que les gaz qui traversent la gaine viendront du refroidisseur sont chauds et au fur et à mesure qu'on avance la température diminue à cause de la présence du ventilateur qui aspire le gaz passant par la gaine vers le filtre a manche.

La vitesse du vent au niveau du capot de chauffe, du refroidisseur et de la gaine d'exhaure est de 1,3 m/s.

III. Calcul des pertes d'énergie thermique par parois :

Les pertes d'énergie thermique par parois jouent un rôle primordial dans le fonctionnement de la ligne de cuisson parce qu'ils nous donnent une indication sur la ligne de cuisson.

Même si elle est équipée des caméras, la chute des briques réfractaires ne peut pas être détectée dans les zones de chute. Les analyses de la température de la surface des éléments de la ligne de cuisson peuvent être un moyen de contrôler le processus et de détecter les défaillances, à titre d'exemple la chute de croûtage d'un réfractaire usé ou bien une faible épaisseur des briques.

Pour pouvoir calculer les pertes d'énergie thermique par parois (Convection et rayonnement). Nous nous sommes servis des feuilles Excel de calcul standard de Lafarge qui sont préétablit par l'Audit (Wall losses calculassions kiln).

III.1 Résultats du calcul effectué :

Pour déterminer les pertes de la ligne de cuisson, il suffit donc de prendre les mesures des surfaces et des températures sur des points prédéfinis pour obtenir le résultat voulu.

La méthode de calcul des pertes d'énergie thermique par parois (annexe B), dont les résultats sont rassemblés dans le tableau13.

Tableau 13: Pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson

	Perte KJ/Kg KK	Perte Kcal/Kg KK
Tour de Préchauffage (Cyclone + Boite a fumée)	132	31
Four	365	87
Capot de chauffe	2	1
Refroidisseur + Gaine d'exhaure	54	13

III.2 Évaluation des pertes par les parois des éléments de la ligne de cuisson :

Pour déterminer les éléments de la ligne de cuisson au niveau de lesquels les pertes d'énergie thermique par les parois sont importantes nous avons adopté une analyse Pareto

Les pertes d'énergie thermique cumulées en% des éléments qui constituent la ligne de cuisson sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14:Pertes d'énergie thermique cumulées au niveau de la ligne de cuisson

	Perte en Kcal/Kg KK	Perte en %	Perte cumulée en%
Four	87	65,91	65,91
Tour (Cyclone Boite à fumée)	31	23,48	89,39
Refroidisseur+ Gaine d'exhaure	13	9,85	99,2
Capot de chauffe	1	0,76	100

Le diagramme de Pareto des pertes calculées auparavant est présenté dans la figure 17.

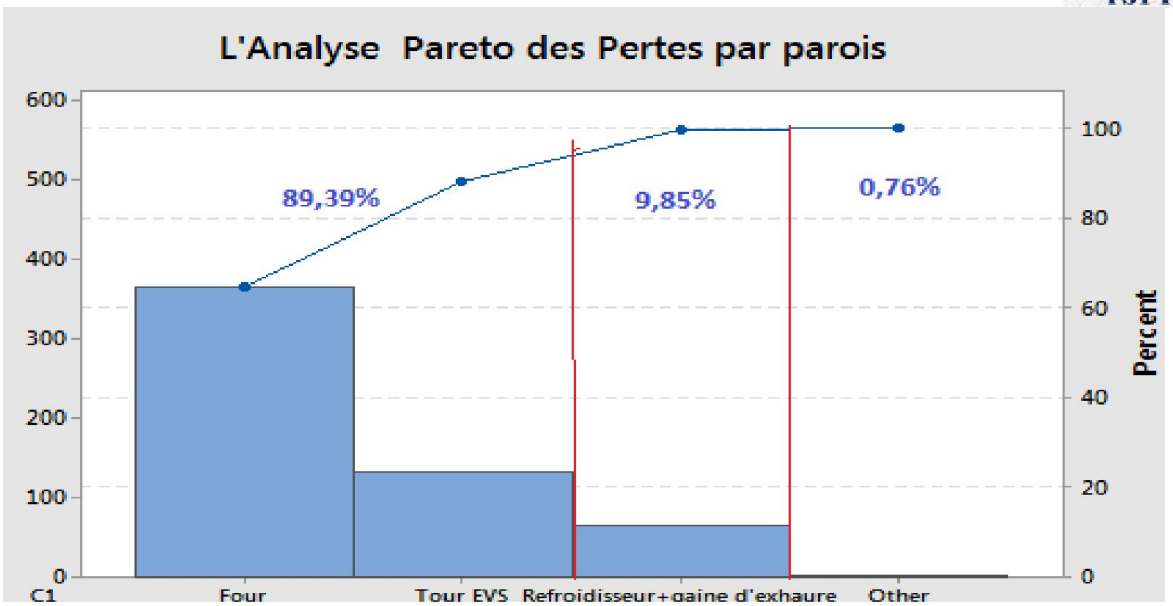

Figure 17:Analyse Pareto des pertes d'énergie thermiques par les parois

Nous pouvons distinguer trois zones :

Zone A : Dans cette zone les pertes d'énergie thermique au niveau du four et de la tour représentent respectivement 89,39 % des pertes totales. Il convient d'étudier sérieusement les possibilités de réduire ses pertes.

Zone B : Dans cette zone les pertes d'énergie thermique au niveau du refroidisseur et de la gaine d'exhaure représentent respectivement 9,85% des pertes totales.

Zone C : Dans cette zone les pertes d'énergie thermique au niveau du capot de chauffe représentent 0,76% des pertes totales, et par conséquent ils sont négligeables.

D'après cette analyse nous pouvons dire que tant qu'on n'a pas un % élevé de perte au niveau de refroidisseur et du capot de chauffe et par conséquent nos études sont consacrées uniquement au four et à la tour de préchauffage.

IV. Étude de Benchmarking :

IV.1 Objectifs :

Nous devons mener une étude de benchmarking qui nous permet de se positionner par rapport aux concurrents , de mieux cibler ses objectifs et d'être en phase avec les besoins et les évolutions futures du marché. En revanche, nous ne pouvons pas faire des comparaisons minutieuses car, les technologies sont différentes d'une usine à l'autre. Nous nous contenterons uniquement de comparer les pertes au niveau des parois, afin de situer

nos résultats par rapport aux autres sites INTERNATIONAL. Alors, nous effectuons une comparaison au niveau de :

- La tour de préchauffage
- Le four
- Le refroidisseur à clinker
- Le capot de chauffe

IV.2 Analyse des résultats :

Les pertes d'énergie thermiques par parois des usines de cimenterie sont rassemblés dans le tableau15.

Tableau 15:Pertes d'énergie thermique par les parois des Usines de cimenterie

Usine	Four	Refroidisseur	Tour	Capot de chauffe
Rashadiya	204	70	104	5
Halkis	95	45	125	8
Rezina	371	40	99	5
Bouskoura	271	60	80	6
KYP	132	40	80	15
RMD	180	35	48	3
Hima	173	45	131	7
Fujara	106	26	73	7
Meknes	365	65	127	2

La comparaison montre effectivement que les autres usines perdent moins d'énergie thermique par parois au niveau de la tour de préchauffage et du four. En revanche ces pertes sont proches au niveau du refroidisseur et du capot de chauffe.

En comparant nos résultats à ceux de LAFARGE Bouskora , nous trouvons que nos pertes sont largement élevées et que la différence atteint :

- 94 KJ/Kg au niveau de la tour de préchauffage
- 47 KJ/Kg au niveau du four
- 5 KJ/Kg au niveau de refroidisseur

V. Identification et analyse des causes ayant impact sur les pertes d'énergie thermique par les parois au niveau du four et de la tour :

V.1 Élaboration du diagramme d'ISHIKAWA :

Afin de déterminer les différentes causes des pertes d'énergie thermique par les parois au niveau du four et de la tour, on a procédé à une analyse Ishikawa. Toutefois pour compléter la liste des causes, nous avons effectué un Brainstorming avec les responsables du service procédé dans le but de recenser le reste des causes susceptibles de créer cet effet. Après avoir récolté toutes les causes, on les a classés par type.

Les différentes causes qui peuvent causer notre problème sont présentées dans la figure 18.

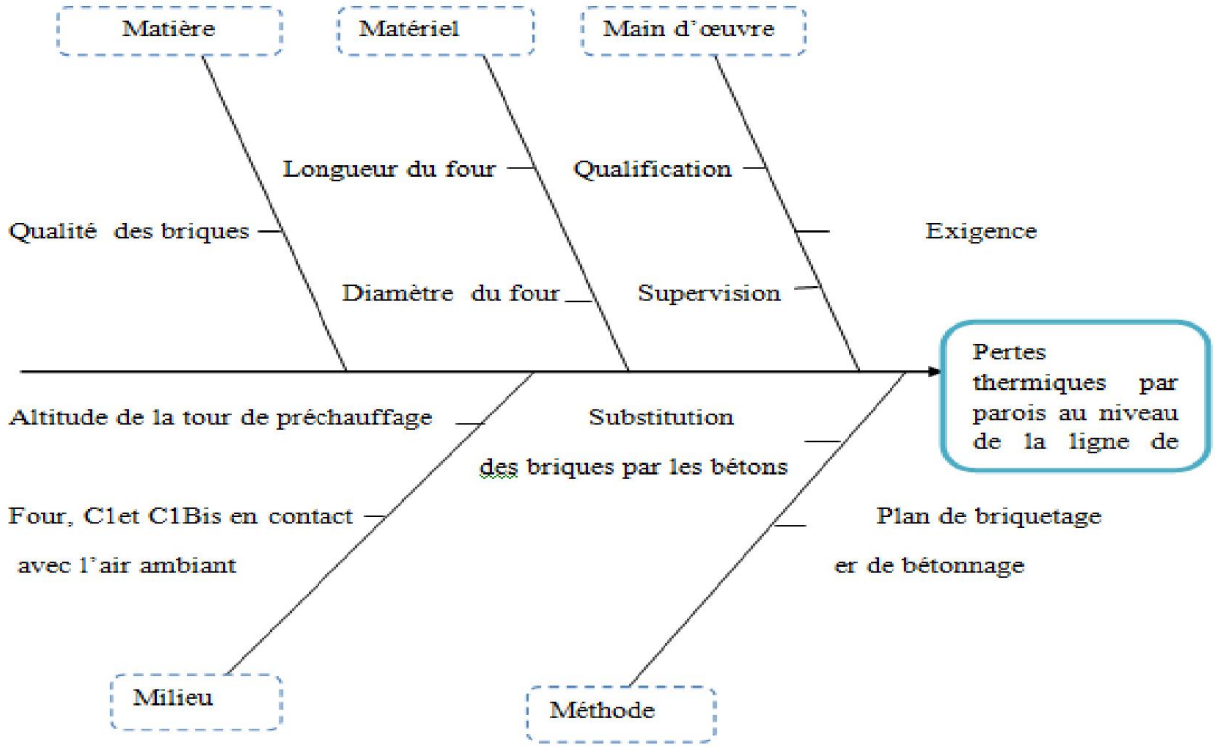

Figure 18:Diagramme Ishikawa des pertes d'énergie thermique par les parois

V.2 Élaboration du vote pondérée :

Pour déterminer celles qui sont les plus prioritaires (qui causent le plus de problèmes) et qui nécessitent un plan d'action impérieux, on a adopté en premier lieux un vote pondéré auprès des intervenants du projet, à qui on a demandé d'estimer l'importance de la cause. Pour effectuer ce vote nous avons distribué des fiches de vote pondéré aux différents intervenants du projet, en raison de savoir de la gravité, l'impact de ses causes sur l'augmentation des pertes. Chaque votant va donc classer à sa guise les différentes opinions en leur affectant une valeur. Le principe est de donner un poids à chaque cause. Ce poids est un nombre qui varie

entre 0 et 11 selon l'importance de la cause aux yeux de celui qui vote. Pour chaque cause, la somme des poids est calculée, ensuite on peut procéder à la hiérarchisation.

L'un des fiches de vote pondéré qui ont été distribués aux différents intervenants du projet est présenté dans la figure 19.

Service : Procédé	**Vote Pondérée**	LAFARGE CIMENTS Usine de Meknes
Date émission : 23 /04/2015	**Date récupération :** 24/04/2015	

Les causes des pertes d'énergie thermique par les parois thermiques par parois au niveau de la ligne de cuisson

❖ **Informations sur les participants :**

[ ] Madame [ ] Monsieur [ ] Mademoiselle

Nom……Prénom……

❖ **Ce qui est demandé :**

Veuillez SVP de donner une note entre 1 à 11 aux causes ci-dessous suivant l'importance que vous juger :

1 à 4 : pas critique

4 à 7 : Un peu critique

7 à 11 : très critique

N° de cause	Nature des causes	Poids (note)
1	Qualité des briques	
2	Substitution des briques par des bétons	
3	Plan des briquetages et bétonnage	
4	La langueur du four	
5	Diamètre du four	
6	Altitude de la tour	
7	Four, C1, C1bis en contact avec l'air ambiant	
8	Qualification	
9	Substitution	
10	Exigence	

Réaliser par: MCHACHI Chaimae **Merci de votre collaboration**

Figure 19:Fiche de vote pondéré

Après l'élaboration de cet outil, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 16.

Tableau 16: Détaille du vote pondéré

Cause	Fadil	Rbite	Chaik	Wzuit	Hussam	Boho	Taibi	Lakbali	Babout	Mouaf	Somme
Qualité des briques	10	9	11	10	11	10	10	11	9	11	102
Substitution brique par béton	11	10	11	10	10	9	11	11	10	11	104
Plan de briquetage et de bétonnage	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	12
Langueur du four	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	13
Diamètre du four	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	14
Altitude de la tour	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
Four C1, C1bis en contact avec l'air	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	12
Qualification	10	10	9	10	10	9	10	9	10	10	98
Supervision	1	2	1	1	1	3	1	2	1	2	15
Exigence	1	2	2	1	1	2	2	1	3	1	17

Grâce au tableau du vote pondéré, nous avons pu hiérarchiser les causes des pertes d'énergie thermique par les parois et nous avons calculé les sommes des criticités qui seront utilisées par la suite dans l'analyse Pareto.

V.3 Analyse Pareto des pertes :

Utilisée de pair avec le diagramme d'Ishikawa (diagramme cause/effet), le diagramme de Pareto, (ou encore la loi 20-80) permet d'identifier les causes les plus dominantes, séparer et hiérarchiser les problèmes coûteux et enfin cibler les actions.

Après le classement des données par ordre décroissant des sommes des criticités, on a calculé le pourcentage de chaque cause ainsi que les pourcentages cumulés. Les résultats des criticités des causes des pertes d'énergie thermique par les parois sont regroupés dans le tableau 17.

Tableau 17: Criticités des causes des pertes d'énergie thermique par les parois

Les causes	Criticité	Pourcentage	% cumulés
Substitution des briques par les bétons	104	26,46	26,46
Qualité béton et brique	102	25,95	52,41
Qualification	98	24,93	77,34
Altitude de la tour	17	4,32	81,66
La langueur du four	15	3,81	85,47
Diamètre du four	14	3,56	89,03
Exigence	13	3,3	92,33
Plan de briquetage et bétonnage	12	3,05	95,38
Supervision	12	3,05	98,43
Four, C1, C1bis en contact direct avec l'air ambiant	10	2,54	100
	393		

Nous avons tracé le graphe de Pareto qui représente la courbe des pourcentages cumulés, comme le montre la figure 20.

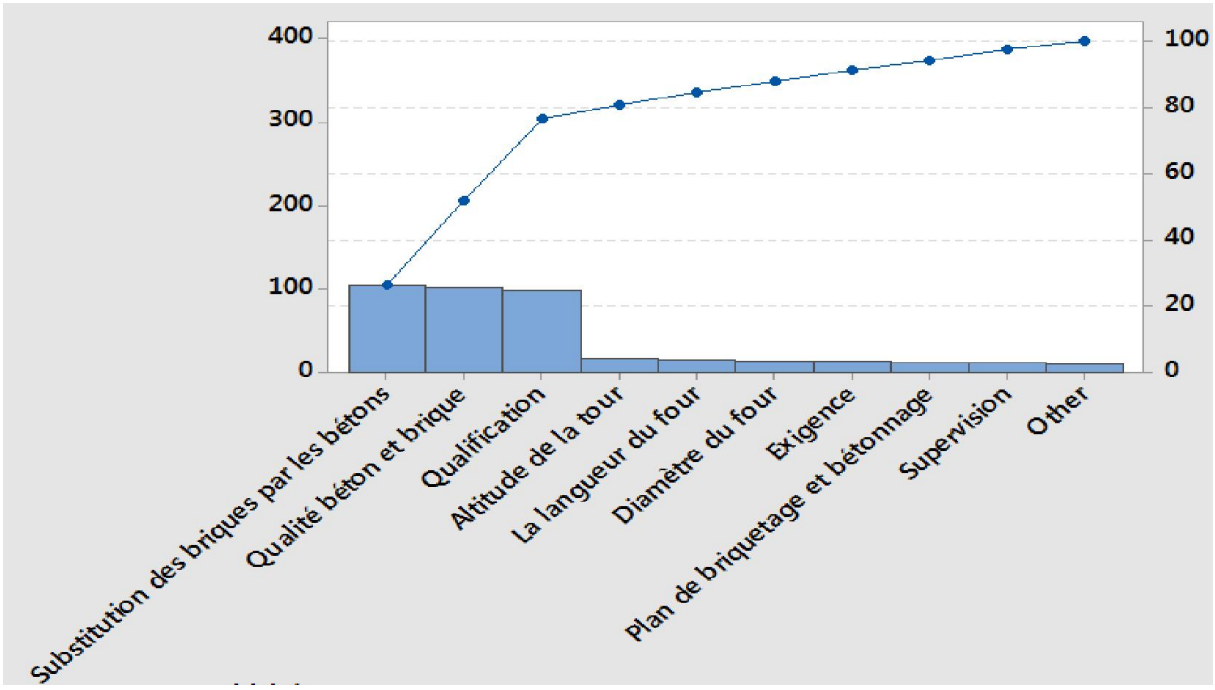

Figure 20:Pareto des criticités

D’après l’analyse Pareto on peut détecter les causes principales, parmi toutes les causes suggérée, Toutefois nous remarquons que les causes principales sont :

- Qualité des briques
- Substitution des briques par les bétons
- Qualification

Chapitre 4 :

Étude de solution et gain du projet

A la suite de la phase d'analyse, les principales causes responsables à nos pertes sont identifiées. Afin de bien mener l'étude, nous présenterons les solutions d'amélioration pour les réduire, Ensuite nous terminerons par une étude globale pour évaluer la rentabilité des investissements à engager dans la solution proposée.

I. Les actions mise en place pour la réduction des pertes d'énergie thermique:

- Déterminer et analyser les types de briques utilisés à partir de l'historique de briquetage.
- Calculer les résistances thermiques des réfractaires.
- Comparer ses résultats avec les résistances des réfractaires utilisées précédemment.

I.1 Historique de briquetage du Four :

La virole est protégée intérieurement par un revêtement réfractaire, la qualité de ce réfractaire est adaptée tout au long du four à la température de manière à assurer :

- Une bonne isolation afin de réduire les pertes d'énergie thermique par les parois.
- Une protection thermique pour éviter les déformations trop importantes et donc la destruction de la virole aux températures élevées.

Dans cette partie nous avons identifié les différents types de briques et bétons utilisés dans le briquetage du four. Le plan de briquetage de l'année 2013 à 2014 est présenté dans la figure21.

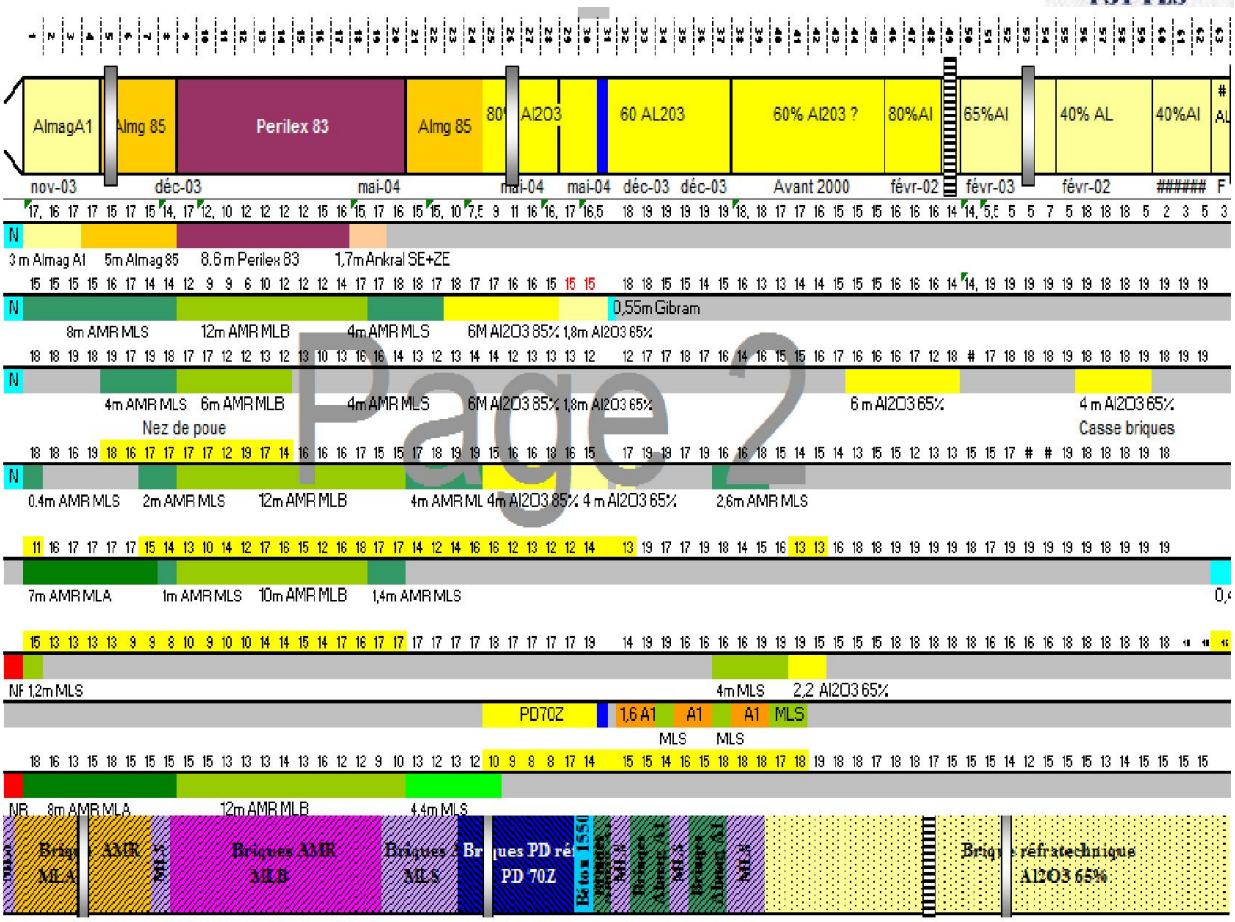

Figure 21:Historique de briquetage du four

I.2 Caractéristique des briques réfractaires :

Les caractéristiques des briques réfractaires utilisées au briquetage des éléments de la ligne de cuisson sont rassemblées dans le tableau 18.

Tableau 18: Caractéristiques des briques réfractaires

	Brique utilisé	Zone d'utilisation	Comportement
Les briques alumineuses (40 % -85%) en AL2O3	AL ((40 % -85%))	Zone de décarbonatation	*ils sont plus réfractaires quand le % d'alumine est élevé. * ont une porosité moyenne une conductibilité thermique faible. Elles sont relativement isolantes et se dilatent peu, avec une bonne tenue mécanique.
	Kronex 85(80% en AL)	Zone de sécurité	
Magnésie chrome (60 à 85 % de MgO) (4 à 15 %Cr2O3)	Perilex	Zone de Cuisson	*elles ont de bonnes tenues aux chocs thermiques et à l'abrasion. *Avec une porosité faible *Ils ont conductibilité thermique forte. *Elles sont très peu isolantes *Ils s'accrochent bien au croutage en fonction du type de brique. *elles se dilatent facilement
	MLB	Zone de cuisson	
Magnésie spinelle (88 % de MgO) (12% Al2O3)	Almag 85	Zone de transition aval Zone de transition amont	
	Almag A1/F1	Zone de transition aval	
	Ankral R2	Zone de transition ava	
	MLS	Zone de transition aval Zone de transition amont	

I.3 Calcul et comparaison des résistances thermiques du four :

Pour éliminer les causes et parvenir à une solution, on s'est confit à une comparaison des résistances thermiques des réfractaires tout au long du Four avec les résistances des années précédentes (Voir annexe C)

Nous avons choisi comme une base de données pour mesurer l'état actuel de notre étude historique pour les années 2003 à 2014. Le choix d'une base de données assez large contribuera à l'obtention de résultats mieux significatifs. La figure 22 présente le suivie de la résistance du four.

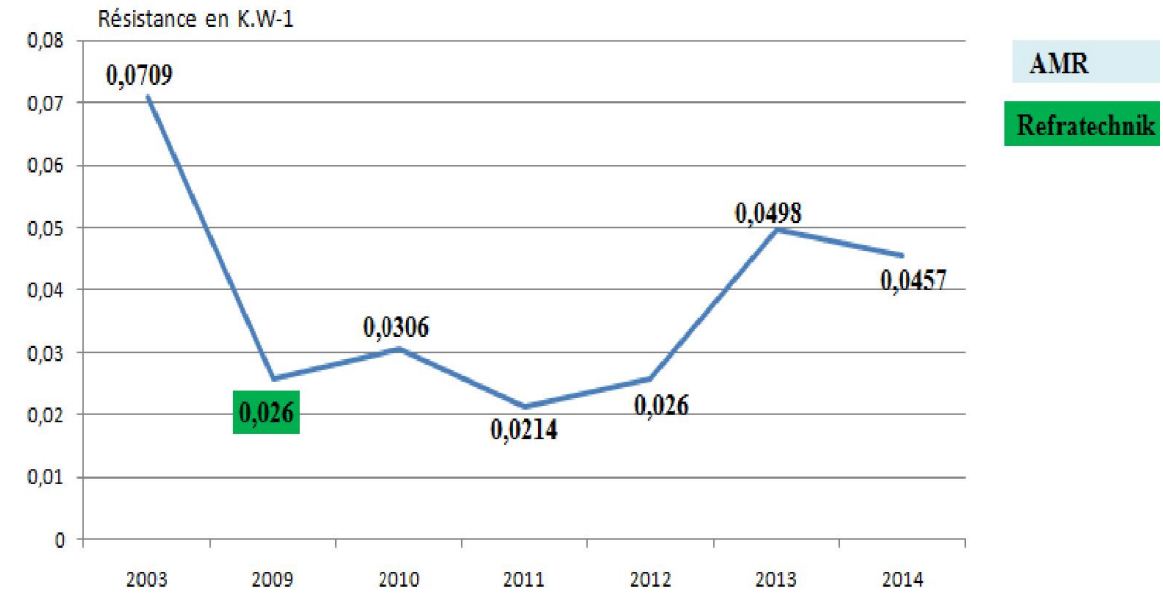

Figure 22:Suivie de la résistance thermique du four

- Nous remarquons que la résistance thermique du four en 2003 est meilleure à celle du 2014.
- Nous remarquons aussi que la résistance thermique du four est trois fois plus grande en 2003 qu'en 2009, cette chute très élevée de la résistance entre l'année 2003 et 2009 est traduite par le changement du type de réfractaire utilisé pour le revêtement (changement de fournisseur ça veut dire changement dans la qualité des briques de l'AMR à Refratechnik)
- En 2013 la résistance du four a connu une hausse élévation par rapport en 2014 mais elle reste toujours faible si on la compare à celle du 2003.
- Si nous comparons la résistance thermique en 2013 à celle de 2014, nous observons que la résistance diminue et cette diminution est expliquée par la substitution de brique de type AlmagA1 par le béton 1550.
- Si nous comparons la résistance thermique en 2014 à celle du 2009, nous observons que la résistance diminue aussi et cette diminution est expliquée par la substitution de brique de type PDZ70 par béton 1550.
- Nous remarquons aussi que dans le même type des briques AMR, il existe une différence de résistivité .Nous pouvons expliquer cette différence par la répartition des briques adaptées à chaque zone sur la longueur du four ainsi que par la substitution des briques par des bétons.

I.4 Comparaison des pertes d'énergie thermique de la tour de préchauffage :

Nous ne pouvons pas mener une comparaison des résistances thermiques au niveau de la tour de préchauffage vu qu'il n'y avait pas un plan de briquetage et bétonnage détaillé, pour que nous puissions les calculer. Nous contenterons uniquement par une comparaison de types de briques adoptés dans la tour sans avoir recours à une répartition détaillée des briques (la surface occupée par chaque type de brique ou la longueur de répartition), et par conséquent nous nous basons sur une comparaison d'historique des pertes d'énergie thermique par les parois de la tour entre l'année 2003 et 2014 comme le montre le tableau19.

Tableau 19:comparaison des pertes d'énergie thermique entre l'année 2003 et 2014

Perte en 2003 (Kcal /Kg KK)	Perte en 2014 (Kcal /Kg KK)
24	31

Pour préciser les éléments de la tour les plus concernés par cette étude et qui présente les pertes d'énergie thermique majeures, nous avons calculé leurs pertes d'énergie thermique par les parois. Les résultats sont présentés dans la figure 23.

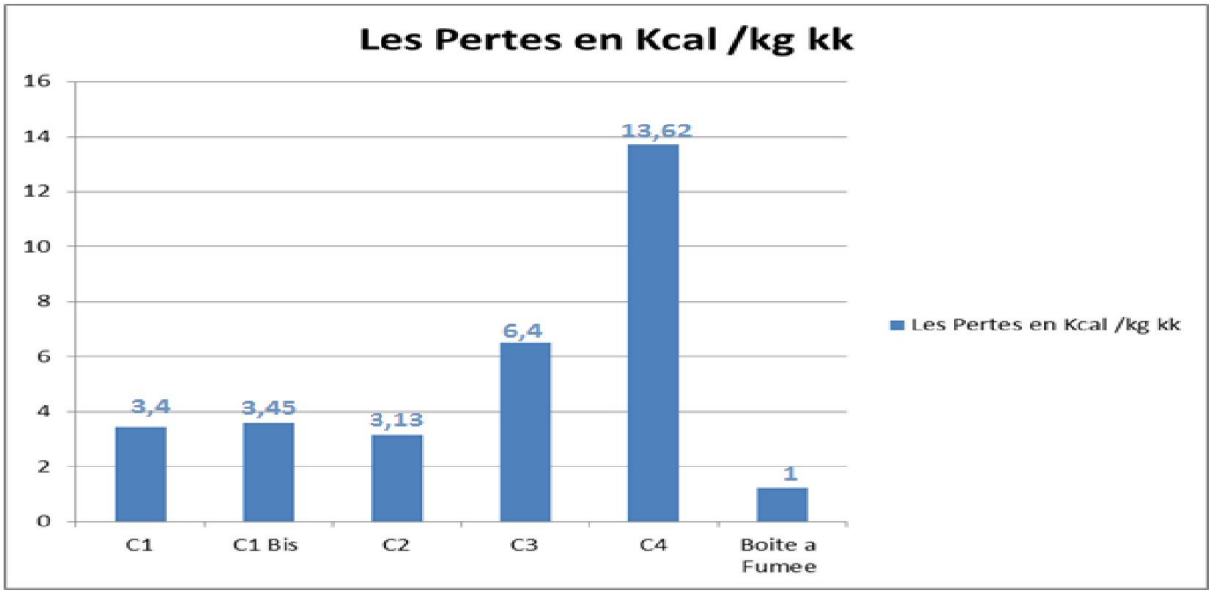

Figure 23: Pertes des éléments de la tour de préchauffage en Kcal/Kg KK

Suivant les résultats trouvés, nous constatons que les pertes au niveau de la boite à fumées sont négligeables devant les pertes au niveau des cyclones.

I.5 Action mise en place pour minimiser les pertes :

D'après la comparaison des pertes d'énergie thermique par les parois de l'année 2003 et 2014 au niveau de la tour de préchauffage et la comparaison de l'historique des résistances

thermiques au niveau du four ,nous sommes aboutis à une solution qui nous permet de minimiser ces pertes et qui consiste à substituer les briques réfractaires utilisées actuellement par les réfractaires utilisés en 2003.

II. Évaluation économique du projet :

Coût d'investissement de substitution du four :

Pour calculer le coût substitué les réfractaires, nous devons calculer le nombre de briques que nous avons besoin pour cette investissement :

Quantité des briques :

Pour un ranger on a besoin de 156 briques (2 briques clés pour la fermeture 77 briques détaille 1(T1) et 77 brique de taille 2(T2).La figure 24 montre la répartition des briques.

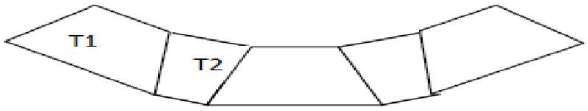

Figure 24:Répartition des briques

Pour une longueur de 1 mètre de type nous avons besoin de 5 ranger de briques alors le nombre de brique est de 5×156= 780

Les calculs des prix des briques des années en 2003 et en 2014 sont détaillés dans les tableaux 20et 21.

Tableau 20: Coût d'investissement de l'année 2003 des briques réfractaires du four

2003			
Type Réfractaire	Métrage	Nombre de Brique	Prix
Almag A1	4	3120	424788
AMR-MLS	4	3120	356491,2
Perilex 83	12	9630	810950,4
Almag 85	4	3120	316492,8
AL 80%	7	5460	395522,4
AL 85%	10	7800	693576
AL 60%	12	9360	1625738,4
AL 65%	7	5460	948347,4
AL 40%	3	2340	406434,6
Béton 1550	1	780	8681,4
L'investissement		**5987022,6 DH**	

Tableau 21: Coût d'investissement de l'année 2014 des briques réfractaires du four

2014

Type Réfractaire	Métrage	Nombre de Brique	Prix
MLS	11	8580	980350,8
MLA	7	5460	562380
MLB	11	8580	956412,6
PDZ 70	6	4680	477360
Béton 1550	1	780	8681,4
AlmagA1	6	4680	638586
AL 65%	22	17160	1563276
L'investissement		**5187046,8 DH**	

L'investissement du projet entraine une dépense de 5987022,6 DH

Si on compare coût avec le coût d'investissement de l'année 2014 on aura une différence de : 5987022,6-5187046,8=799975,8 DH

- **Coût des pertes d'énergie thermique du four :**

Le calcul du coût des pertes d'énergie thermique du four est présenté dans le tableau 22

Tableau 22: Coût des pertes d'énergie thermique par parois du four

Perte en 2003 (Kcal /Kg KK)	87
Perte en 2014 (Kcal /Kg KK)	50
Énergie minimisée (Kcal /Kg KK)	37
Production du ciment (t/J)	1143
Coût d'un 1 GJ d'énergie (DH)	42
Coût de 37 Kcal /Kg KK d'énergie thermique (DH/12 mois)	2672858,866

- **Temps de retour :**

Le temps de retour sera donc très étroit :

$$t = \frac{\text{Coût de l'investissement}}{\text{Économie projetée}} \longrightarrow t = \frac{799975{,}8}{2672858.866}$$

Le temps de récupération du coût d'investissement est de **2 ans et 5 mois.**

- **Coût d'investissement de la tour :**

Les calculs des prix des briques des années 2003 et 2014 sont détaillés dans les tableaux 23et 24.

Tableau 23:Coût d'investissement en 2003 des briques réfractaires de la tour

	Nombre de brique et béton									
Type de briques	C1, C1	C2	C3	C4	Gaine C1 C2	Gaine C2	Gaine C3 C4	Gaine C4 Boite Boite à fumées	Prix Unit	Prix Totale

	Bis			C3						
AL 40%	5608	3193	3193	3193	3410	781	1911	2131	173,7	4068054
Kerlite 120 MP	780	250	250	250	949	884	884	1050	21	111237
C18 HR	320	175	175	175	0	0	0	0	18	15210
Gibran	200	180	180	180	0	0	0	0	17,35	12839
Ultracast KS 10	520	345	329	324	0	0	0	0	17	25806
										4233146

Tableau 24 : Coût d'investissement en 2014 des briques réfractaires de la tour

	Nombre de brique et béton									
Type de briques	C1, C1 Bis	C2	C3	C4	Gaine C1 C2	Gaine C2 C3	Gaine C3 C4	Gaine C4 Boite à fumées	Prix Unit	Prix Totale
AL 40%	5000	2780	2560	2000	3410	781	1911	2131	173,7	3573530,1
AL80%	412	413	515	780	0	0	0	0	72,44	153572,8
Al 85%	196	0	118	413	0	0	0	0	88,92	64644,84
Alfrantix	1820	950	934	929	949	884	884	1050	16,102	135256,8
										3927004,54

- **Coût des pertes d'énergie thermique de la tour :**

Le calcul du coût des pertes d'énergie thermique de la tour de préchauffage est présenté dans le tableau 25.

Tableau 25: Coût des pertes d'énergie thermique par parois du four

Perte en 2003 (Kcal /Kg KK)	24
Perte en 2014 (Kcal /Kg KK)	31
Énergie minimisée (Kcal /Kg KK)	7
Production du ciment (t/J)	1143
Coût d'un 1 GJ d'énergie (DH)	42
Coût de 37 Kcal /Kg KK d'énergie thermique (DH/12 mois)	505676,0016

L'investissement du projet entraine une dépense de 4233146 DH

Si nous comparons ce coût avec le coût d'investissement de l'année 2014 nous aurons une différence de 4233146 – 392704,54 = 3840441,46 DH

Temps de retour :

Le temps de retour sera donc :

$$t = \frac{\textbf{Coût de l'investissement}}{\textbf{Économie projetée}} \longrightarrow t = \frac{\textbf{3840441,46}}{\textbf{505676,0016}}$$

Le temps de récupération du coût d'investissement est de **7 mois.**

Conclusion générale :

Toute entreprise de cimenterie cherche à minimiser les pertes d'énergie thermique par parois afin d'optimiser la consommation calorifique.

Au cours de mon stage on a eu l'opportunité de déterminer et d'optimiser les pertes d'énergie thermique par parois au niveau de la ligne de cuisson qui ont constitué ma mission de stage. Pour réussir cette mission, nous avons commencé par le calcul des surfaces de la ligne de cuisson ensuite les mesures de température et les vitesses du vent pour qu'on puisse enfin calculer les pertes. Puis on a mené une étude de benchmarking, on a élaboré une analyse des causes ensuite analyse Pareto pour déterminer les causes qui ont plus d'effet .

Malgré la complexité de cette mission l'ultime confidentialité des données indispensables à la réalisation de ce projet. Ceci a nécessité la collecte des informations dans divers services.

A l'étape d'optimisation de nos efforts de recherches on a abouti aux propositions suivantes :

- Au niveau du four : la proposition de substitution des briques a permis à Lafarge Meknès de minimiser les pertes d'énergie thermique de 37 Kcal/Kg et donc un gain à l'entreprise de 2672858.866 DH/12 mois, avec une rentabilité de 2 ans

- Au niveau de la tour de préchauffage : la proposition de substitution des briques a permis à Lafarge Meknès de minimiser les pertes d'énergie thermique de 7 Kcal/Kg et donc un gain de 505676,0016 DH /12 Mois, avec une rentabilité de 7 mois

Ce stage a été pour moi très enrichissant aussi bien 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 échanger positivement, à partager des points de vue avec différents cadres (responsables des postes, chefs des équipes et techniciens) 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 faculté de science et technique de FÈS.

La période de notre stage au sein de la société, nous a permis d'élargir nos connaissances concernant le monde industriel ainsi que les problèmes quotidiens de l'entreprise.

Bibliographie et webographie :

Documentation de LAFARGE Meknès

Plans géométriques

www.lafarge.com

www.techniques--ingnieur.fr

[1] Transfert de chaleur par conduction, Chevrier J- C Ecole des Mines, Nancy, 1979.

[2] Transferts thermiques Yves Jannot 2005

[3] http://fr.rs-online.com/web/p/thermometres-infrarouge/0411980/

[4] https://www.pce-instruments.com/french/instruments-de-mesure/mesureur/anemometre-kat_131689_1.htm