Année Universitaire : 2015-2016

Master Sciences et Techniques en Génie Industriel

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

L'optimisation de l'énergie thermique dans le four de la cimenterie Holcim-Fès

Lieu : Holcim Ras El Ma Fès
Référence : 04 /16-MGI

Présenté par :

LAAZAAR Kaoutar

Soutenu Le 14 Juin 2016 devant le jury composé de:

- **Mr. Said HAOUACHE (encadrant)**
- **Mr. Driss TAHRI (examinateur)**
- **Mr. Hassan BINE EL OUIDANE (examinateur)**

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes parents, qui depuis ma naissance, n'ont cessé de me bercer avec des bons conseils et sans doute ceux qui me réconforte et m'encourage dans les moments difficiles de ma scolarité.

Ma grand-mère, qui près ou de loin me tend toujours une perche pour sauver mon savoir être, mon savoir vivre ainsi que mon savoir-faire, en m'orientant vers le droit chemin, celui qui conduit vers la réussite.

Ma famille, pour l'aide et le soutien qu'il m'a donné tout le long de ma vie.

Toute personne ayant un impact positif sur la rédaction de ce travail.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent principalement à Monsieur Said HAOUACHE, pour m'avoir accordé sa confiance dans ce projet pour mieux cerner le travail à réaliser tout au long du stage.

Je tiens à remercier les membres du jury, Monsieur Driss TAHRI et Monsieur Hassan BINE EL OUIDANE, Professeurs du département Génie Industriel, d'avoir accepté d'examiner et d'assister à la présentation de ce travail.

De même, je remercie mon encadrant à la société Holcim, Monsieur Khalil RAHAT, pour son suivi et son soutien au cours de ce stage.

Je remercie aussi Monsieur. Youness CHETABI, le Directeur de la cimenterie de Fès Ras El Ma, de m'avoir accueilli et m'a donné l'opportunité d'effectuer un stage au sein de la société, ainsi Monsieur Mohamed BAJJA et Monsieur MAALMY, pour tout le temps qu'ils ont pu me consacrer en dépit de leurs nombreux engagements professionnels, ainsi que pour tous leurs précieux conseils et avis.

Je remercie aussi tous les chefs d'équipe et tout le personnel de l'entreprise, qui ont contribué à l'élaboration de ce projet pendant mon stage, et qui m'ont donné toutes les facilités nécessaires pour conclure mon travail.

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Ltd : Limited ou Limité.

AFR : Alternative Fuel and Raw material ou Combustible Alternatif et Matières premières.

CIMA : Cimenterie Maghrébine.

ODI : L'Office pour le Développement Industriel.

SNMC : Société Nationale des Matériaux de Construction.

CIOR : Cimenterie de l'Oriental.

BPE : Béton Prêt à l'Emploi.

MTBF : Mean Time Between Failures ou Temps Moyen Entre Pannes.

NF : Norme Française.

CPJ : Ciment Portland composé avec Ajouts.

CPA : Ciment Portland Artificiel.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieure.

GES : Gaz à Effet de Serre.

PAF : Perte Au Feu.

BZT : Température de zone de cuisson.

BET : Température amont four.

PC : Pouvoir Calorifique.

FSC : Facteur de Saturation en Chaux.

MS : Module Silicique.

MAF : Module Alumino Ferrique.

STEC : Specific Thermal Energy Consumption ou Consommation Spécifique d'Énergie Thermique.

PL : Phase Liquide.

ASF : Alternative Solid Fuel ou Combustible Solide Alternatif.

HTS : Haute Teneur en Soufre.

MTS : Moyenne Teneur en Soufre.

COV : Composés Organiques Volatiles.

CO : Monoxyde de Carbone.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Historique de la société Holcim Maroc……...5

Tableau 2 : Composition chimique du CPJ 35…….20

Tableau 3 : Composition chimique du CPJ 45…….....21

Tableau 4 : Composition chimique du CPA 55…….....21

Tableau 5 : Historique de la consommation calorifique pour les années 2014 et 2015……..35

Tableau 6 : Caractéristiques du four de la cimenterie de Fès…….41

Tableau 7 : Variation de la consommation calorifique selon la phase liquide pour le mois de Janvier.....49

Tableau 8 : Variation de la consommation calorifique selon la phase liquide pour le mois de Février……..….51

Tableau 9 : Caractéristiques de la tuyère du four de Holcim Fès…….…….....55

Tableau 10 : Variation de la consommation calorifique selon le type HTS en Janvier…...…....61

Tableau 11 :Variation de la consommation calorifique selon le type MTS en Février……....63

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Stratégie de Holcim Maroc……3

Figure 2 : Cimenterie de Fès Ras El Ma……7

Figure 3 : Organigramme de l'usine Holcim-Fès Ras El Ma…….9

Figure 4 : Les composants du ciment……..10

Figure 5 : Processus de fabrication du ciment…….12

Figure 6 : Carrière de la cimenterie Ras El Ma……13

Figure 7 : Tour de préchauffage de la cimenterie de Fès…….....16

Figure 8 : Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès…….....18

Figure 9 : Broyeur du coke de pétrole de la cimenterie de Fès…….19

Figure 10 : Cas d'un cylindre creux multicouche……27

Figure 11 : Le schéma électrique de la résistance thermique……...28

Figure 12 : Exemple de diagramme d'Ishikawa……..…30

Figure 13 : Le coke de pétrole…….....33

Figure 14 : Les grignons d'olive……..33

Figure 15 : Comparaison de la consommation calorifique des années 2014 et 2015…….....35

Figure 16 : Les causes de la consommation calorifique par la méthode du diagramme d'Ishikawa……37

Figure 17 : Le four de la cimenterie de Fès…….....40

Figure 18 : Constituants du four rotatif de cimenterie…….....40

Figure 19 : La forme d'une flamme usuelle du four……...42

Figure 20 : La courbe de chauffe du four……..42

Figure 21 : Détermination de la valeur de référence de la consommation calorifique pour 2015……....45

Figure 22 : Tendance de la consommation calorifique selon la phase liquide en Janvier…….....50

Figure 23 : Tendance de la consommation calorifique selon la phase liquide en Février…….52

Figure 24 : Photo d'une tuyère…….…..…53

Figure 25 : Photo de la tuyère de la cimenterie de Fès……....…54

Figure 26 : Différents canaux de la tuyère……...…....56

Figure 27 : Embout d'air axial……..56

Figure 28 : Système de réglage de la tuyère…….58

Figure 29 : Types de soufre…….…….60

Figure 30 : Variation de la consommation calorifique avec le coke de pétrole HTS…….……..62

Figure 31 : Variation de la consommation calorifique avec le coke de pétrole MTS……..64

Figure 32 : Émissions des gaz de combustion à la cheminée principale……..68

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE……..……..1

CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCEUIL……..2

1- PRÉSENATATION DE LA SOCIÉTÉ HOLCIM……...2
1-1- Présentation générale…….. .2
1-2- Présentation de Holcim-Maroc……..2
1-2-1- Holcim Maroc partenaire des grands projets……...3
1-2-2- Les activités de Holcim Maroc……...….3
1-2-3- L'historique de la société Holcim-Maroc……....4
1-2-4- La fusion Lafarge-Holcim……...6
1-2-5- Classement mondial……....6
1-3- Holcim Fès……7
1-4- L'organigramme de Holcim Fès……...9

CHAPITRE 2 : PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT……10

1- LE CIMENT……10
1-1- Définition…….....10
1-2- Les matières premières du ciment……...10
2- LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT……..11
2-1- Extraction……....12
2-2- Concassage……..13
2-3- Pré-homogénéisation…… .13
2-4- Broyage et homogénéisation de la farine cru……..14
2-4-1- Dosage cru……...14
2-4-2- Broyage cru……... .14
2-4-3- Dépoussiérage……..14
2-4-4- Homogénéisation…….....14
2-5- Production et stockage du clinker……...14
2-5-1- La tour de préchauffage……..15
2-5-2- Le four rotatif……..16
2-5-3- Le refroidisseur à clinker……17
2-6- Broyage du ciment……..17
2-7- Ensachage et expédition du ciment…….....18
2-7-1- Ensachage……19
2-7-2- Expédition……...19
3- LES DIFFÉRENTES VOIES DE FABRICATION DU CIMENT……..20
4- LES TYPES DE CIMENT FABRIQUÉS……20
4-1- CPJ 35 : Ciment Portland composé avec Ajouts……....20
4-2- CPJ 45 : Ciment Portland composé avec Ajouts……....21
4-3- CPA 55 : Ciment Portland Artificiel……..21

CHAPITRE 3 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE…….....22

PARTIE A : NOTIONS THÉORIQUES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES……...22

1- INTRODUCTION……22
2- DÉFINITION DE LA CHALEUR SENSIBLE…….....22
3- DÉFINITION DE LA CHALEUR LATENTE…….... ..23
4- DÉFINITION DE L'ÉNERGIE INTERNE…… ..23
5- DÉFINITION DE L'ENTHALPIE…… 23
6- LA COMBUSTION…… 24
6-1- Définition……..…....24
6-2- Équations chimiques de combustion…….....25
6-3- Produits de la combustion…… 25
7- LE BILAN D'ÉNERGIE…… …..26
8- CALCUL DES PERTES…….....27
8-1- Pertes par convection et par conduction…… ...28
8-2- Pertes par rayonnement…….....28
PARTIE B : NOTIONS THÉORIQUES SUR LE DIAGRAMME D'ISHIKAWA……..29
1- DÉFINITION…… …....29
2- CONSTRUCTION DU DIAGRAMME D'ISHIKAWA…….....29
CHAPITRE 4 : PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE…….....32
1- INTRODUCTION…….....32
2- LES COMBUSTIBLES UTILISÉS DANS LA CIMENTERIE RAS EL MA……....32
2-1- Le coke de pétrole…….....32
2-2- Les grignons d'olive…….....33
3- PROBLÉMATIQUE…….....34
4- HISTORIQUE DE LA CONSOMMATION CALORIFIQUE CHEZ HOLCIM FÈS…… ……....34
5- LES CAUSES DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE THERMIQUE……....36
a) Les modules……...……...38
b) Le tirage du four……... 38
c) La volatilisation du soufre…….....38
CHAPITRE 5 : PLAN D'ACTION D'AMÉLIORATION.....39
1- INTRODUCTION……..39
2- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS…….....39
2-1- Description de la chaudière…….....39
2-2- Démarrage du four…….....41
2-3- Application numérique……..……..43
2-3-1- Le flux de combustion……..…….....43
2-3-2- Le flux utile…….43
2-3-3- Les pertes thermiques……..…43
a) Pertes par convection et par conduction……..43
b) Pertes par rayonnement……....44
3- DÉTERMINATION DE LA VALEUR NOMINALE DE LA CONSOMMATION CALORIFIQUE……....44
4- POINTS D'AMÉLIORATION……...46

4-1- Introduction…….....46
4-2- Les modules…….....46
4-2-1- La phase liquide (P.L)……..46
4-2-2- Le facteur de saturation en chaud (F.S.C)……..….47
4-2-3- Le module silicique (M.S)……48
4-2-4- Le module Alumino Ferrique (M.A.F)……48
a) Le mois de Janvier 2016……..……49
b) Le mois de Février 2016……...……50
c) Conclusion……...…52
4-3- Le tirage du four……..53
4-3-1- Définition……...…….…53
4-3-2- Description de la tuyère de la cimenterie Ras El Ma……...54
a) Caractéristiques…….. ..54
b) Canaux d'air et de combustibles……..……55
4-3-3- Principe de réglage de la tuyère……...57
a) Réglage de l'air axial…..……...58
b) Réglage de l'air radial……...……....59
4-4- La volatilisation du soufre……...59
4-4-1- Définition……...…….....59
4-4-2- Changement du type du coke de pétrole……..…..60
a) Le mois de Janvier 2016…..……60
b) Le mois de Février 2016……..……63
5- LE GAIN ÉCONOMIQUE……65
5-1- La consommation annuelle de la cimenterie Holcim Fès en 2015……..65
5-2- Le gain économique en 2016……...66
6- VOLET ENVIRONNEMENTAL……...66
6-1- Introduction……66
6-2- Cas de la cimenterie de Fès……66
6-3- Les mesures prises pour maîtriser les émissions……..69
6-3-1- Les émissions de SO_2…….… .69
6-3-2- Les émissions de NO_x…….……....69
6-3-3- Les émissions de COV…….…….…….. 69
6-3-4- Les émissions des métaux lourds……...……...69
CONCLUSION GÉNÉRALE…….……70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Maroc est devenu un centre d'importants investissements industriels, plusieurs infrastructures ont vu le jour sur le territoire national, des projets ont été inaugurés ces dernières années et d'autres sont en cours de réalisation, d'où la forte demande du ciment.

En effet, l'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie sur le royaume. Elle réalise, en moyenne, 46 % de la production et 50 % de la valeur ajoutée du secteur « matériaux de construction ».

D'autre part, l'économie de marché mondial astreint les industriels à rester toujours plus compétitifs pour la suite de leurs activités. Ceci implique en partie de développer le processus de production vers la performance et la réduction des coûts tout en respectant le volet environnemental concernant les émissions des gaz à effet de serre.

L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergies thermique et électrique, les besoins mondiaux en énergie thermique pour la fabrication du ciment sont estimés à environ 6×10^9 GJ / an pour les combustibles. Par ailleurs, l'énergie représente 40 % à 50 % du prix de revient du ciment.

C'est dans ce cadre, que le département de production de la société Holcim-Fès a situé ce projet, qui a pour objectif principal, l'optimisation de l'énergie thermique dans le four de ce département qui présente une étape fondamentale dans le processus de fabrication du ciment.

Le présent rapport se compose de cinq chapitres présentés comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous ferons une présentation de l'organisme d'accueil.
- Le second sera réservé à quelques généralités concernant le ciment et à la description de son processus de fabrication.
- Le troisième chapitre aura pour objectif de donner des rappels sur quelques notions théoriques concernant les transferts thermiques d'une part et la méthode du diagramme d'Ishikawa d'autre part.
- Dans le quatrième chapitre, nous présenterons la problématique du projet.
- Finalement, le dernier chapitre sera réservé pour l'optimisation de l'énergie thermique du four tout en indiquant l'impact de cette amélioration sur le gain économique de la société et sur l'environnement.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

1- PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ HOLCIM :

1-1- Présentation générale :

HOLCIM : HOL rappelle les origines du groupe <<le village HOLDERBANK>> et CIM symbolise l'activité du ciment.

Le groupe HOLCIM Ltd est un groupe suisse fondé en 1912, c'est un acteur majeur au niveau mondial dans la production de ciment, granulats et bétons. Le groupe est aujourd'hui présent sur les 5 continents dans près de 70 pays et emploie près de 80.000 personnes.

Les trois activités principales du Groupe sont :

- La production de ciment.
- La production de granulats.
- Le développement de produits et services à haute valeur ajoutée pour le secteur de la construction et des travaux publics, tels que le béton prêt à l'emploi.

Holcim compte parmi les leaders de la production de matériaux de construction car il se concentre sur ses produits de base, en particulier la production et la distribution de ciments et granulats.

Actif dans près de 70 pays, le groupe Holcim offre la plus grande diversité géographique du marché. Présent aussi bien en Europe que dans les pays émergents, sa diversification géographique assure la solidité de son économie.

L'objectif de l'entreprise : fabriquer des matériaux de construction qui répondent aux nouvelles exigences et contribuent à la qualité de vie, tout en préservant durablement l'environnement.

1-2- Présentation de Holcim-Maroc : {2}

Filiale de Holcim Ltd, l'un des leaders mondiaux du ciment, du béton et des granulats, Holcim Maroc est un groupe cimentier national présent sur le marché Marocain depuis 1978, avec 470 collaboratrices et collaborateurs, produit des matériaux de construction pour les usages les plus variés, à ces produits s'ajoutent les supports techniques et logistiques adaptés aux besoins du client.

Aujourd'hui Holcim est présente dans différentes régions du Maroc et dispose d'une capacité annuelle de production de 3,9 millions de tonnes, elle exploite plusieurs cimenteries dans différentes régions du Maroc.

1-2-1- Holcim Maroc partenaire des grands projets :

Holcim Maroc est une organisation tournée vers l'avenir avec des collaborateurs passionnés par la performance. Les grands projets à la réalisation desquels Holcim Maroc a participé sont des témoignages vivants de partenariats construits sur la confiance de ses clients et l'exigence qui impose la société pour les satisfaire selon la stratégie présentée sur la figure 1 :

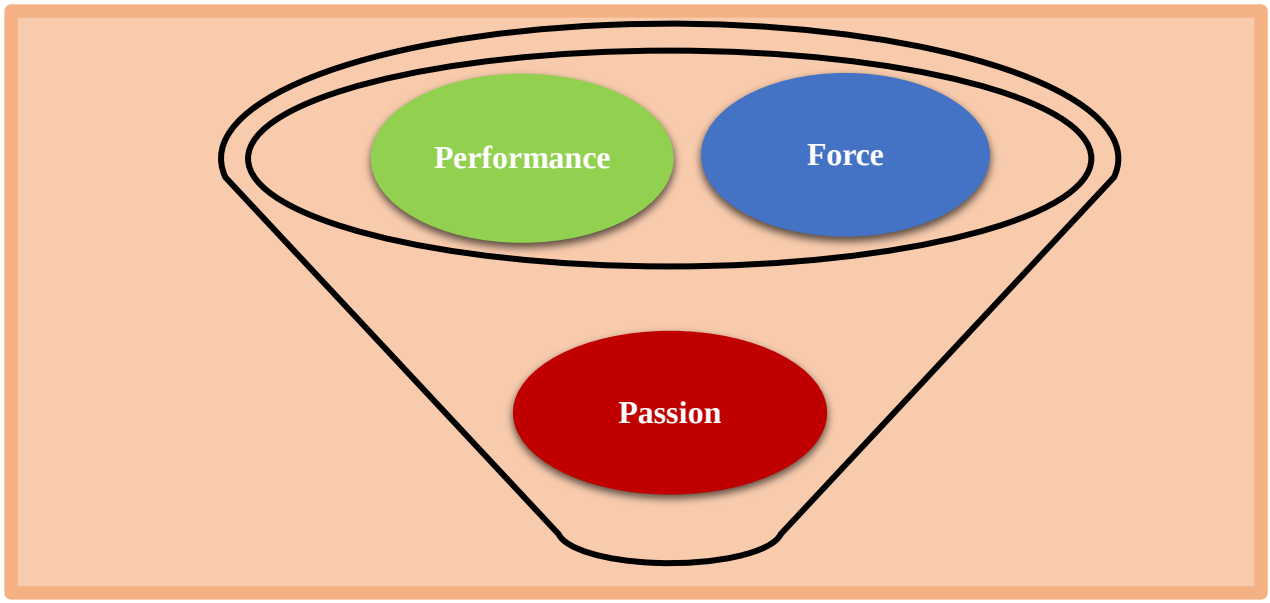

Figure 1 : Stratégie de Holcim Maroc

1-2-2- Les activités de Holcim Maroc :

- **Ciment** : Holcim Maroc exploite trois cimenteries (Oujda, Fès et Settat), un centre de broyage, d'ensachage et de distribution (Nador) et un centre d'ensachage et de distribution (Casablanca).
- **Bétons** : Holcim Bétons, filiale à 100% de Holcim Maroc, est présente sur le marché de l'oriental, du centre et du centre-nord avec 10 centrales (Fès, Nador, Settat, 2 à Rabat, 2 à Tanger et 3 à Casablanca). Holcim Bétons propose une gamme de bétons répondant aux attentes de ses clients (bétons normalisés et bétons spéciaux). Nous proposons également un éventail de services allant de la livraison au pompage ainsi que l'assistance technique dans le choix du béton, le dimensionnement et la mise en œuvre.
- **Granulats** : l'activité granulats a démarré en 2002 avec la création de la filiale Holcim Granulats qui exploite une carrière dans la région de Ben Slimane.

- **Ecoval- Traitement de déchets** : la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval a démarré ses activités en juin 2007 dans la région d'El Gara à 40 km de Casablanca. Filiale à 100% de Holcim Maroc, Ecoval comprend différents ateliers de prétraitement et de reconditionnement des déchets industriels en fonction de leurs caractéristiques et de leur nature.
- **Batipro, Distribution de matériaux de construction** : œuvrant pour la modernisation des circuits de distribution des matériaux de construction, Holcim Maroc a initié le premier réseau de distribution de matériaux de construction au Maroc sous l'enseigne <BATIPRO Distribution>. A travers ce réseau, qui prône le professionnalisme, la qualité et la transparence, Holcim Maroc souhaite fédérer des distributeurs indépendants de divers horizons autour d'un même idéal et leur faire partager les mêmes bonnes pratiques commerciales au bénéfice de l'amélioration de leur compétitivité et pour une meilleure satisfaction de leur clientèle. L'ambition de BATIPRO Distribution est d'être le premier réseau de référence dans ce secteur d'activité.
- **Mateen-Promotion immobilière** : Holcim Maroc a lancé, en partenariat avec deux opérateurs immobiliers marocain et français, une société de promotion immobilière. Mateen, qui a démarré son activité en 2007, a pour vocation de développer un projet pilote dans le segment du logement et de définir les bases du développement de cette activité.
- **Activité AFR** : avec un souci d'économiser les ressources naturelles grâce à la valorisation des déchets industriels utilisés comme combustibles ou matières premières de substitution, cette activité consiste en l'approvisionnement en déchets valorisables, par la vente de prestation de service de valorisation ou d'élimination aux générateurs de déchets, selon le principe du pollueur payeur. L'énergie dans la fabrication du ciment représente 40 à 50% du prix de revient, d'où les efforts déployés pour optimiser le rendement énergétique et développer les combustibles alternatifs.

1-2-3- L'historique de la société Holcim-Maroc :

L'historique de la société Holcim-Maroc est donné dans le tableau 1 :

1972	Les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la SNMC, organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.
1980	Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 tonnes par an.
1985	Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.
1989	Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
1990	Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et lancement de l'activité BPE avec l'installation d'une première centrale à béton à Fès.
1993	Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an. Prise de contrôle majoritaire du capital de la CIOR par Holcim Ltd dans le cadre du programme de privatisation.
1997	Installation d'une centrale à béton à Rabat et d'une autre à Casablanca.
2001	Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.
2004	Extension de la cimenterie de Fès.
2005	Démarrage du centre d'ensachage et de distribution de Settat.
2006	Extension du centre de Nador.
2007	Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval.
2008	Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.
2010	Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.
2012	Doublement de la capacité de production clinker de l'usine de Fès
2014	Accord de fusion Lafarge-Holcim.

Tableau 1 : Historique de la société Holcim Maroc

1-2-4- La fusion Lafarge-Holcim :

Le 7 Avril 2014, Holcim et Lafarge (groupe français de matériaux de construction) ont annoncé leur intention de procéder au rapprochement des deux sociétés dans le cadre d'une fusion qui par la suite est officiellement lancée le 15 juillet 2015 sous le nom de LafargeHolcim.

Suite à la fusion, le groupe LafargeHolcim deviendra un leader mondial avec une forte présence dans toutes les régions et les principaux pays du monde, au service des besoins des clients. Le groupe deviendra un partenaire privilégié dans le secteur du bâtiment et des infrastructures, à l'écoute des consommateurs tout le long de la chaîne logistique.

Pour réaliser son ambition stratégique, le groupe combiné a identifié trois éléments fondamentaux : les personnes, l'intégrité ainsi que la santé et la sécurité.

Suite à la fusion, le groupe bénéficiera d'un portefeuille large et diversifié de produits et services de matériaux de construction répondant aux principaux besoins tant dans les marchés émergents que dans les marchés développés. Ce portefeuille, ajouté à la large implantation géographique de LafargeHolcim, sa forte capacité d'innovation, son approche centrée sur le client et l'étendue de son activité, place le groupe dans une position favorable pour une croissance rentable.

1-2-5- Classement mondial :

Holcim Fès est une usine très performante, c'est pour cela, elle a été nommée <<**BEST PERFORMER**>> pour l'année 2014 et a été classée par conséquent la deuxième au monde sur 77 usines.

L'usine a abouti à ce classement sur la base de trois volets fondamentaux :

- L'efficacité : l'efficacité de la production, MTBF, la consommation de l'énergie thermique et la consommation de l'énergie électrique.
- La durabilité : la protection de l'environnement, la gestion des matières premières, la qualité des produits, les dépenses d'investissement.
- Le coût : le coût de la production, les frais de la maintenance, le coût de l'énergie thermique, le coût de l'énergie électrique.

1-3- Holcim Fès (Figure 2) :

Figure 2 : Cimenterie de Fès Ras El Ma

La cimenterie de Fès est située dans la localité de Ras El Ma à 25 km de l'ouest de la ville de Fès sur un terrain en propriété de la CIOR et à 340 km du port de Nador à partir duquel elle est alimentée en coke de pétrole.

L'usine est également raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

Depuis 1996, l'usine de Fès Ras El Ma produit et commercialise différentes qualités de ciment. L'usine de Fès, d'une capacité annuelle de broyage ciment de 1 000 000 de tonnes de ciment, utilise le procédé de fabrication à voix sèche intégrale. Le four, principal équipement de la cimenterie, a été mis en service en 1993. La cimenterie comporte des ateliers de concassage, broyage, homogénéisation

et stockage de la farine, cuisson et stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment et ensachage expédition du ciment.

A l'issue de la fermeture du centre de Doukkarat en 2004, et dans la perspective d'évoluer au même rythme que celui du volume du marché de la région du centre nord, Holcim Maroc a lancé un projet d'extension de grande envergure, d'un montant dépassant les 320 millions de Dirhams.

Un nouveau broyeur à ciment vertical, technologie à ce jour unique au Maroc, a porté la capacité de la cimenterie de Ras El Ma de 600 000 à 1 million de tonnes de ciment par an.

L'investissement comporte aussi :

- La construction d'un tronçon de route de 7km pour relier la cimenterie à la ville de Fès.
- La réalisation, en partenariat avec l'ONCF, d'un tronçon de voie ferrée pour desservir la cimenterie.
- L'embellissement de la cimenterie suivant un concept d'architecture industrielle.
- L'aménagement de l'entrée de la cimenterie afin de garantir sécurité et bien-être aux chauffeurs et aux visiteurs.

1-4- L'organigramme de Holcim Fès :

L'organigramme de la cimenterie de Fès Ras El Ma se présente sous la forme de la figure 3 :

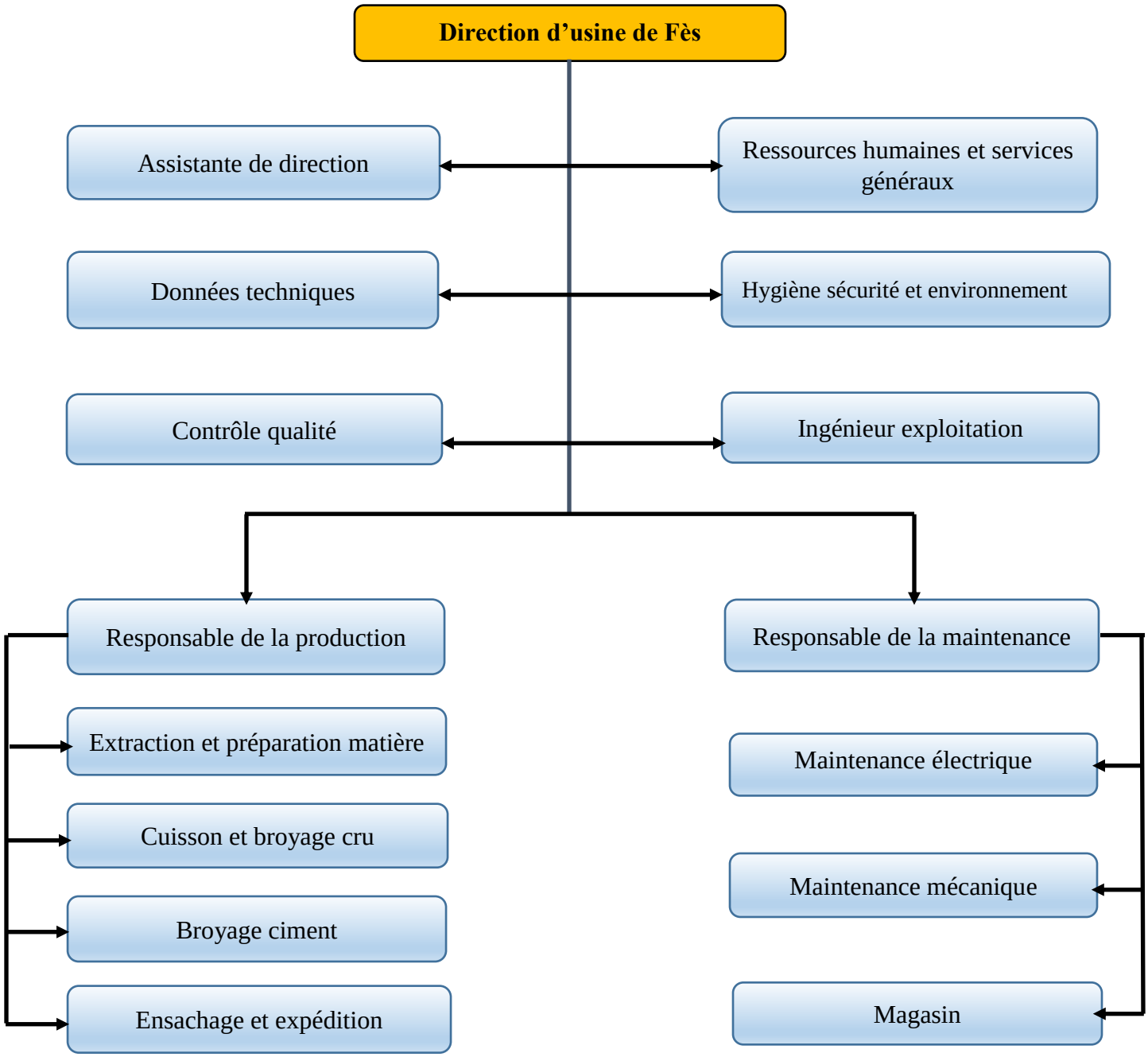

Figure 3 : Organigramme de l'usine Holcim-Fès Ras El Ma

CHAPITRE 2

PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

1- LE CIMENT :

1-1- Définition : {3}

Selon la norme NF P 15-301 de 1994, le ciment se définit comme suit :

<< Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.>>

1-2- Les matières premières du ciment :

L'usine de Holcim s'est installée à Ras El Ma en raison de la richesse de cette région en calcaire. Les matières premières (Figure 4) qui rentrent dans la fabrication du ciment sont presque toutes des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport, et sont essentiellement composées de calcaire et d'argile ou de toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3), la pouzzolane (matière volcanique) et les matières de correction (le sable et les minerais de fer).

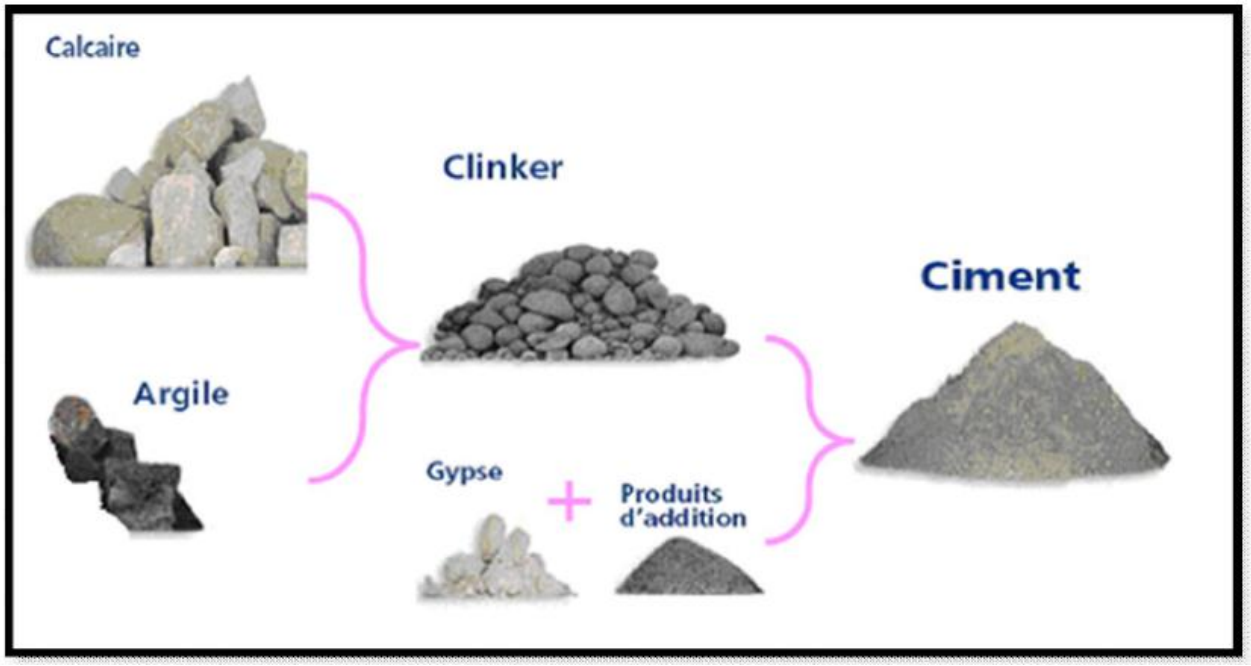

Figure 4 : Les composants du ciment

2- LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT :

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

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 °C des mélanges de calcaire, d'Argile et minerai de fer. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers.

Ce clinker constitue la matière première du ciment, pour y aboutir il faut broyer le clinker avec un peu de gypse selon le type de ciment souhaité, le ciment, produit et stocké dans des silos, passe à la dernière étape de fabrication, il s'agit de l'ensachage avant d'être expédié dans des sacs ou en vrac selon le besoin du client.

La production du ciment s'opère selon un processus en six étapes :

- Extraction des matières premières.
- Concassage et pré-homogénéisation des matières crues.
- Broyage et homogénéisation de la farine crue.
- Production du clinker.
- Broyage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

Le schéma de la figure 5 résume le processus de fabrication du ciment de la carrière à l'expédition :

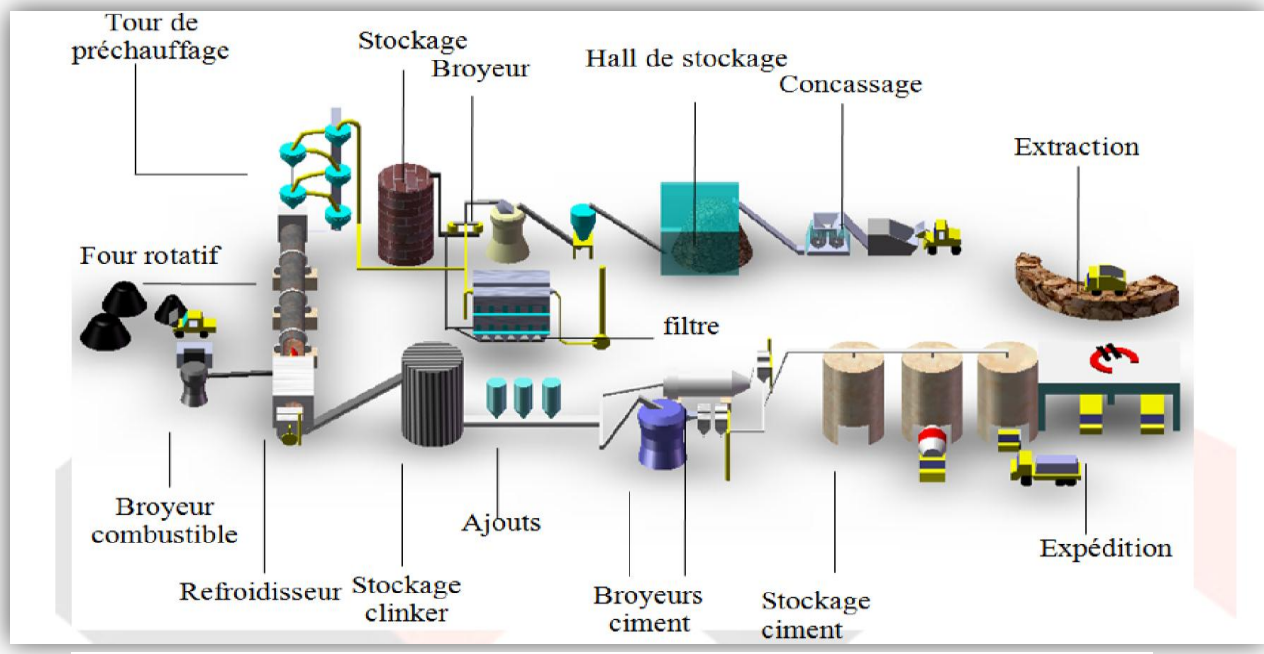

Figure 5 : Processus de fabrication du ciment

2-1- Extraction :

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières qui subirent des transformations pour fabriquer le produit fini, le ciment est alors fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer.

Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, d'argile, de schiste, de minerai de fer et de sable.

Constituant la matière première principale, le calcaire, l'argile et le schiste sont extraites dans des carrières situées dans les régions de l'usine (Figure 6). Le minerai de fer et le sable, sont des matières de correction, elles sont exploitées dans des carrières relativement éloignées de l'usine ou livrés par des fournisseurs.

Figure 6 : Carrière de la cimenterie Ras El Ma

Afin d'extraire la matière première, l'abattage à l'explosif est aujourd'hui la technique la plus simple et la plus répandue dans les carrières de roche massives. Elle permet de fragmenter des volumes importants de roche pour la reprise et le traitement du matériel abattu.

2-2- Concassage :

Le concasseur a pour rôle d'optimiser et de faciliter le stockage et la manutention des matières premières, les blocs extraits (calcaire et argile) au niveau de la carrière sont introduits dans un concasseur pour réduire leurs dimensions de 1.3 m jusqu'à 80 mm à la sortie. Les concasseurs utilisés dans les usines de Holcim (Maroc) sont à impact à battoirs ou marteaux. Ce type de concasseur est adapté aux caractéristiques initiales et finales des matières à concasser.

2-3- Pré-homogénéisation :

La pré-homogénéisation est une opération qui a pour but d'avoir un mélange avec une composition chimique régulière des matières premières.

Les matières extraites de carrière (calcaire et argile), puis concassées doivent donc être soigneusement mélangées (pré-homogénéisées). Pour cela, elles sont mises en dépôt au moyen d'un stacker qui permet de mettre ces matières dans la bonne proportion, par couches successives, ce qui donne un lit (tas) de pré-homogénéisation.

Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les modifications par les correcteurs nécessaires à apporter au mélange des matières premières.

2-4- Broyage et homogénéisation de la farine crue :

2-4-1- Dosage cru :

Cette étape a pour but de déterminer et de réaliser un pré dosage des quatre constituants de base du clinker. Pour cela, il existe quatre trémies assurant le stockage des matières premières.

2-4-2- Broyage cru :

Le broyage des matières est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. À l'intérieur du broyeur cru, la matière subit des actions mécaniques par quatre galets qui écrasent les morceaux sur une assiette pour l'obtention de la farine, et les particules trop lourdes retombent sous plateau de broyage dans un élévateur à godets qui les recyclent dans le broyeur, les particules fines entraînées par le flux de gaz sont dirigées vers le séparateur monté sur le broyeur.

2-4-3- Dépoussiérage :

Une fois la matière broyée, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela on dispose de filtres à manches qui libèrent la matière des gaz, cette opération de dépoussiérage s'effectue avec un rendement de 99,8%. En outre, cette opération est presque utilisée dans toutes les unités de production.

2-4-4- Homogénéisation :

La farine produite est transportée à travers des aéroglisseurs vers un silo de stockage dont le rôle est d'homogénéiser la farine. Ce silo dont la capacité de stockage est de 6000 t est équipé d'un système de fluidisation.

2-5- Production et stockage du clinker

Le clinker est un produit artificiel obtenu par la cuisson de la farine crue dans un four rotatif. La production du clinker se fait en quatre étapes :

1- Le séchage et le préchauffage de la farine crue.
2- La décarbonatation partielle de la farine crue.
3- La clinkérisation.
4- Le refroidissement du clinker.

La ligne de cuisson comprend trois éléments :

- Une tour de préchauffage à cinq étages (Figure 7), ce nombre peut augmenter dans le cas d'augmentation de la capacité de production.
- Un four rotatif.
- Un refroidisseur à grilles

2-5-1- La tour de préchauffage :

Les gaz chauds formés dans le four sont tirés par un ventilateur et circulant à grande vitesse dans les cyclones de la tour échangeur. La farine est injectée à la partie supérieure et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer ensuite dans un précalcinateur qui contient les gaz de combustion du coke de pétrole issus des deux brûleurs situés à la partie inférieure de la tour. Ensuite la matière entre dans la boite à fumée décarbonatée de 85 à 90%. L'échange thermique au sein de la tour s'accompagne des effets suivants :

- Evaporation de l'eau libre ;
- Dégagement de l'eau de constitution des argiles ;
- Décarbonatation partielle de la farine ;

Un système de cannons à air est installé dans des différents points du préchauffeur afin d'éviter le colmatage des dépôts éventuels de la matière, voir Figure 7.

Figure 7 : Tour de préchauffage de la cimenterie de Fès

2-5-2- Le four rotatif :

Le four est un réacteur en forme de tube rotatif incliné de 3%. Le chauffage est assuré par une flamme au charbon installée à l'autre extrémité du four. La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée à 90%, poursuit son parcours dans le four et y entre à 1000˚C environ, est chauffée jusqu'à la température de frittage ou clinkérisation de 1450 ˚C. Dès lors les minéraux qu'elle contient, réagissent pour donner des nouvelles combinaisons minéralogiques principalement des silicates et des aluminates de calcium : le clinker.

On distingue trois zones au sein du four :

1) La zone de décarbonatation (appelée aussi zone de transition) : c'est la zone à l'entrée du four, qui correspond à la phase de déshydratation de la farine crue, c'est à ce niveau qu'il y a passage de la farine de son état liquide à l'état solide.
2) La zone de cuisson : c'est la zone la plus importante et la plus chaude du four. En effet, la température de cette zone peut dépasser 1500 ˚C, ce qui permet la combinaison de $(CaO)_2SiO_2$ (ou C_2S) avec la chaux libre pour donner les cristaux de $(CaO)_3SiO_2$ (C_3S).
3) La zone de clinkérisation : les cristaux issus de la zone de cuisson poursuivent leur chemin et grossissent et granulent, formant ainsi du clinker. La chaleur nécessaire pour la réalisation de ces réactions est assurée par la combustion du coke de pétrole. La rotation et l'inclinaison du four permettent la progression de la matière.

2-5-3- Le refroidisseur à clinker :

Le clinker sortant du four passe sur la grille vibrante du refroidisseur où il est trempé rapidement par l'air froid soufflé par le bas de la grille. Ce processus permet la récupération de la chaleur du clinker. L'air chaud généré est réintroduit dans le four pour aider à la combustion. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. Il existe plusieurs types de refroidisseurs : refroidisseurs à grilles, utilisé dans l'usine Ras El MA, refroidisseurs rotatifs, refroidisseurs planétaires, ...

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté jusqu'au hangar du stockage.

2-6- Broyage du ciment :

À la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 à 40 mm environ, ce dernier et les ajouts (gypse et pouzzolane) sont introduits au niveau d'un broyeur vertical à galets (Figure 8), dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment dont la finesse évolue de 2 800 à 4 000 cm^2 /g.

Figure 8 : Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès

Le dosage du clinker et des ajouts se fait à l'entrée du broyeur par un système de dosage automatique.

Les caractéristiques des différentes lignes de gamme de ciment obtenues sont conformes aux normes marocaines de production du ciment. Cette conformité est assurée grâce à des dosages mesurés et des tests de laboratoire effectués tout au long du processus de production.

2-7- Ensachage et expédition du ciment :

Le ciment produit est stocké dans des silos pour alimenter par la suite les ateliers d'ensachage pour les livraisons en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en vrac.

2-7-1- Ensachage :

L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de suppresseurs au niveau des silos de stockage. Le ciment est ensuite transporté par des aéroglisseurs et des élévateurs à godets puis passe dans des cribles pour l'élimination des corps étrangers. L'installation d'ensachage a été rénovée récemment et comporte trois ensacheuses automatiques.

2-7-2- Expédition :

L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50 Kg et en vrac soit par route soit par voie ferrée. Le chargement du ciment en vrac par camion ou wagons citernes se fait directement à partir des silos de stockage.

L'usine de Holcim Fès possède en plus des équipements cités ci-dessus, d'un broyeur de coke de pétrole qui réduit la dimension des blocs du combustible.

C'est un broyeur à boulets (Figure 9), dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Des boulets sont placés avec le produit dans un tambour rotatif. Le broyage résulte du frottement et du choc créés par la chute des boulets contre le combustible et par la collision des particules entre elles. L'intensité du broyage dépend principalement du régime du tambour, de la taille et de la matière des boulets ainsi que la durée du séjour du combustible dans le broyeur.

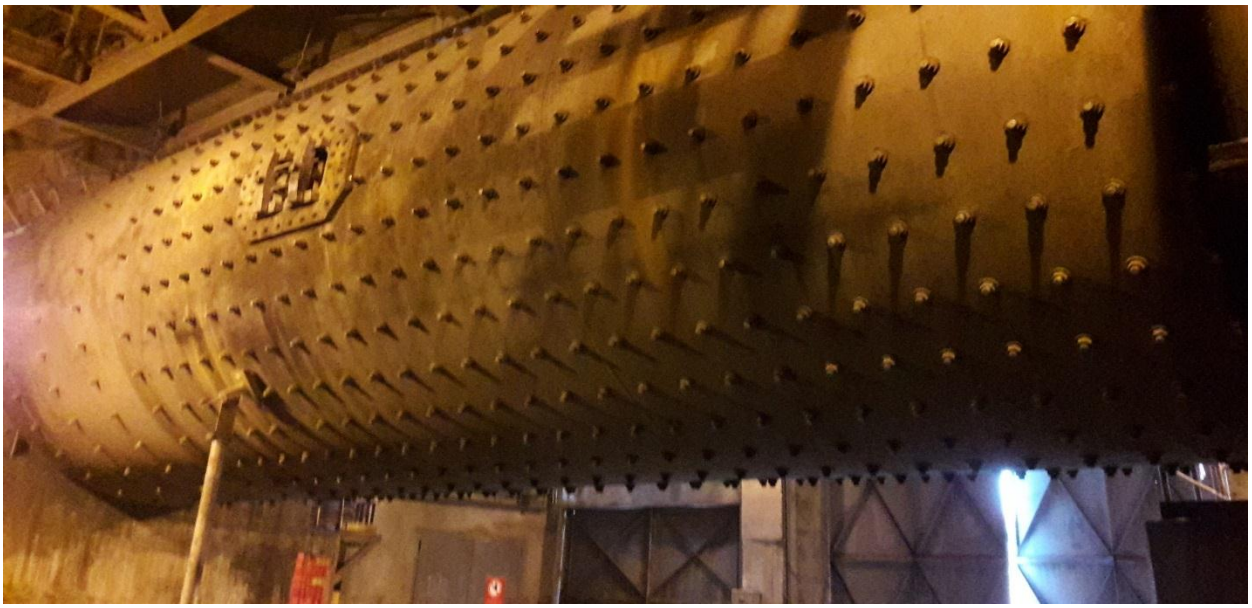

Figure 9 : Broyeur du coke de pétrole de la cimenterie de Fès

3- LES DIFFÉRENTES VOIES DE FABRICATION DU CIMENT :

Il existe quatre principaux procédés de fabrication du ciment qui diffèrent entre eux selon la nature du traitement thermique utilisé :

● **La voix humide** : la matière première, après concassage est délavée dans l'eau, puis broyé en humide. La pâte obtenue est homogénéisée, puis alimente le four. Cette méthode est abandonnée pour des raisons d'économie d'énergie.

● **La voie semi humide** : la matière première est préparée en voie humide, puis séchée avant le four.

● **La voie semi sèche** : la farine crue, sèche, passe d'abord dans un granulateur où elle est humidifiée.

● **La voie sèche** : c'est la plus utilisée et la plus économique. La matière première, une fois concassée, est broyée à sec, homogénéisée, et avant l'entrée au four, elle se chauffe à une température de 900 à 1000˚C. Cette voie est plus rentable et plus optimale au niveau énergétique.

4- LES TYPES DE CIMENT FABRIQUÉS :

HOLCIM commercialise un produit semi-fini (clinker) et une gamme de trois types de ciments qui diffèrent par leur résistance à la compression :

4-1- CPJ 35 : Ciment Portland composé avec Ajouts :

Le CPJ 35 est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le clinker et le gypse. La classe de résistance du CPJ 35 en fait un produit particulièrement adapté à la fabrication des enduits pour la maçonnerie, ainsi que les bétons non armés peu sollicités et à résistances mécaniques peu élevées. Le CPJ 35 est également utilisé dans le domaine routier pour la stabilisation des sols et des couches des chaussées.

La composition chimique du ciment CPJ 35 est la suivante (Tableau 2) :

Composants	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3
%	13.6	3.67	2.45	64.99	1.15	0.57	2.98

Tableau 2 : Composition chimique du CPJ 35

4-2- CPJ 45 : Ciment Portland composé avec Ajouts :

Le ciment CPJ 45 est un ciment portland dont les constituants principaux sont le clinker, le gypse, la pouzzolane et les cendres volantes (Tableau 3). La classe de résistance de 45 MPa lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistance mécaniques élevées.

Les résistances élevées à jeune âge du CPJ 45 permettent d'obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

Composants	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3
%	22.31	6.76	4.61	52.57	2.78	0.82	3.01

Tableau 3 : Composition chimique du CPJ 45

4-3- CPA 55 : Ciment Portland Artificiel :

Le ciment CPJ 55 est un ciment portland artificiel composé de clinker, gypse et pouzzolane (Tableau 4).

La résistance de 55 MPa et les résistances élevées à jeune âge du CPJ 55 lui confèrent l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités. Le CPJ 55 est adapté aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

Composants	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3
%	13.85	5.56	3.44	59.05	1.87	0.69	3.21

Tableau 4 : Composition chimique du CPA 55

Holcim produit, en plus, des types cités ci-dessus deux autres types de ciment, il s'agit de :

- CPJ 55.
- CPJ 65.

Ces derniers se caractérisent par une grande résistance et sont utilisés pour la construction des barrages. Ils sont fabriqués sur commande sinon il y aura des stocks inutiles.

CHAPITRE 3

Étude bibliographique

PARTIE A : NOTIONS THÉORIQUES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES :

1- INTRODUCTION :

Le bilan thermique consiste en un bilan des gains et des pertes de chaleur dans un système donné (par exemple, une masse d'eau) pendant une période donnée. Donc, un bilan énergétique est un bilan comptable de toutes les quantités d'énergie produites, transformées et consommées dans un processus en une période de temps.

Le bilan thermique permet d'analyser la performance énergétique d'un processus, de localiser les déperditions de chaleur, de mesurer la consommation de l'énergie thermique et de proposer par la suite des améliorations afin de pouvoir la diminuer. {1}

2- DÉFINITION DE LA CHALEUR SENSIBLE :

La chaleur sensible est la quantité de chaleur qui est échangée, sans changement d'état physique, entre plusieurs corps formant un système isolé. Elle est qualifiée de **« sensible »** parce que cet échange de chaleur change la température du corps, effet qui peut être ressenti ou mesuré par un observateur.

En cela, **la chaleur latente**, qui elle, est absorbée lors d'un changement de phase, se fait à température constante pour une pression donnée.

La quantité de chaleur sensible Q échangée par un corps (solide ou liquide) qui passe d'une température T_1 à une température T_2 est donnée par la relation :

$$\mathbf{Q = m \times c \times (T_2 - T_1)}$$

Où :

Q : la chaleur sensible en J.

m : la masse du corps en Kg.

c : la chaleur massique du corps en $J.Kg^{-1}.K^{-1}$.

$\mathbf{T_1}$: la température initiale du corps en K (ou en ˚C).

$\mathbf{T_2}$: la température finale du corps en K (ou en ˚C).

c est aussi appelée capacité thermique massique ou encore chaleur spécifique massique qui correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la substance de 1 Kelvin lors de la transformation considérée. Cette grandeur c est caractéristique d'une substance donnée.

3- DÉFINITION DE LA CHALEUR LATENTE :

La chaleur latente est la quantité de chaleur qu'il faut fournir ou enlever à un corps pour modifier son état physique sans changer sa température, la pression restant constante et égale à la pression d'équilibre entre les deux états.

La quantité de chaleur latente est donnée par : $\mathbf{Q' = m \times L}$

Où :

m : la masse qui change d'état.

L : la chaleur latente massique.

4- DÉFINITION DE L'ÉNERGIE INTERNE :

Un transfert d'énergie au système thermodynamique peut entraîner éventuellement à la fois un changement interne du système et un mouvement global d'ensemble de ce système.

L'état interne du système est caractérisé par une fonction énergie interne **U** et l'état de mouvement est caractérisé par une fonction énergie externe $\mathbf{U_e}$.

$\mathbf{U_e}$ comprend l'énergie cinétique $\mathbf{E_c}$ due au mouvement d'ensemble et l'énergie potentielle $\mathbf{E_p}$ provenant des forces extérieures.

L'énergie interne **U** représente toutes les énergies microscopiques à l'intérieur d'un système. Ces énergies peuvent être sous forme :

- Mécanique (cinétique ou potentielle).
- Chimique dégagée comme chaleur lors des réactions chimiques.
- Nucléaire, résultant de la variation de la masse du noyau.

Donc l'énergie interne s'écrit :

$$\mathbf{U = E_{c,\ microscopique} + E_{p,\ microscopique} + E_{liason} + E_{nucléaire}}$$

5- DÉFINITION DE L'ENTHA LPIE :

Le terme enthalpie vient du mot grec signifiant « chaleur interne », l'enthalpie exprime la quantité de chaleur et le travail mécanique contre la pression extérieure fournie ou reçue par un système se transformant à pression constante.

La fonction enthalpie correspond à l'énergie totale d'un système thermodynamique, elle comprend l'énergie interne qui est l'énergie nécessaire pour créer le système, à laquelle est

additionné le travail que ce système doit exercer contre la pression extérieure pour occuper son volume.

L'enthalpie est un potentiel thermodynamique, il s'agit d'une fonction d'état qui est une grandeur extensive. L'unité de mesure de l'enthalpie dans le système international d'unités (SI) est le joule.

L'enthalpie est couramment utilisée lors de l'étude des changements mettant en jeu l'énergie d'un système dans de nombreux processus chimiques biologiques et physiques.

Dans le cas général, l'enthalpie s'écrit :

$$\mathbf{H = U + pV}$$

$$dH = \delta Q + \delta W + pdV + vdp$$

$$= \delta Q - pdv + pdv + vdp$$

$$dH = \delta Q + vdp$$

À pression constante, $\Delta H = Q$

Il s'en déduit alors que la chaleur à pression constante est égale à l'enthalpie.

6- LA COMBUSTION : {5}

6-1- Définition :

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison entre l'oxygène et une matière combustible.

Cette réaction est globalement exothermique, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur. Dans le cas de la cheminée, cette chaleur est essentiellement utilisée pour maintenir une température de confort.

Les combustibles sont multiples (gaz, pétrole, bois, charbon…), mais ils ont un point commun : celui de contenir principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons multiples de carbones et d'hydrogènes.

La composition des combustibles peut être représentée par la formule générique : CH_yO_x

Soit pour un atome de carbone (C), il y a en moyenne **''y''** atomes d'hydrogène (H) et **''x''** atomes d'oxygène (O).

Une combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments :

-Le combustible : un corps susceptible de se combiner à l'oxygène par une réaction d'oxydation exothermique. Exemple : gaz, fioul, alcool, bois, charbon, …

-Le comburant : une substance chimique qui a pour propriété de permettre la combustion d'un combustible. Le comburant le plus fréquemment utilisé est le dioxygène de l'air.

-L'énergie d'activation : elle présente une source de chaleur.

6-2- Équations chimiques de combustion :

Les réactions de combustion, comme toutes les réactions chimiques, se font sans variation de masse de chacun des éléments.

Les équations chimiques qui décrivent ces réactions doivent donc satisfaire cette contrainte.

6-3- Produits de la combustion : {4}

Deux produits principaux résulteront d'une combustion complète : du dioxyde de carbone (ou CO_2) et de l'eau (ou H_2O).

En effet, si on considère la combustion **"stœchiométrique", (**c'est-à-dire contenant la qualité d'oxygène exacte pour faire réagir le combustible de manière parfaite), on obtient :

$$\mathbf{CH_yO_x + \left(1 + \frac{y}{4} - \frac{x}{2}\right) O_2 \rightarrow CO_2 + \frac{y}{2} H_2O}$$

Par exemple, on obtient pour l'essence (de formule chimique C_7H_{16}) : {5}

$$\mathbf{C_7H_{16} + 11\ O_2 \rightarrow 7\ CO_2 + 8\ H_2O}$$

C'est le CO_2 dont on parle au niveau de la pollution atmosphérique et de la problématique du réchauffement de la planète qu'il entraine.

Il est principalement lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique.

Mais l'oxygène provient de l'air atmosphérique et celui-ci contient également de l'azote (N), qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées.

Cependant, sous certaines conditions de combustion (température et pression élevées), cela n'est pas le cas.

En effet, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote NO,NO_2 ….rassemblés sous la dénomination NO_x. Ceux-ci sont en partie responsable de pluies acides.

Les combustibles contiennent également des traces d'autres éléments, dont la combustion est nocive pour l'environnement. Le principal élément est le soufre dont l'oxydation fournira du SO_2 et du SO_3.

Ce dernier formera de l'acide sulfurique par combinaison avec de l'eau (par exemple, lors du contact entre les fumées et les nuages), c'est ce qui entraine aussi la formation de pluies acides.

En résumé, les produits de la combustion sont principalement constitués de CO_2, de H_2O, de NO_x et de SO_2.

7- LE BILAN D'ÉNERGIE :

Sachant que la chaleur ne se perd pas et ne se crée pas, mais elle se transforme. Il fallait établir le bilan thermique afin de calculer l'efficacité du système et d'évaluer par la suite les pertes de chaleur du processus.

On a : $\phi_{combustion} = \phi_{utile} + \phi_{pertes}$

Où : $\phi_{combustion}$: la chaleur fournie par le combustible en W.

ϕ_{utile} : la chaleur utilisée par le système en W.

ϕ_{pertes} : la chaleur perdue dans l'air en W.

Avec : $\phi_{combustion} = \dot{m}_{combustible} \times PCI$

Où : $\dot{m}_{combustible}$: débit massique du combustible en Kg/s.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur du combustible en J/Kg.

Et $\phi_{utile} = \dot{m} \times c \times (T_s - T_e) = \frac{m}{t} \times c \times (T_s - T_e)$ (en cas de chaleur sensible)

Où : $\dot{m}$: le débit massique en Kg/s.

c : la capacité calorifique en J. Kg^{-1}. K^{-1}.

T_s : la température de sortie en K (ou en ˚C).

T_e : la température d'entrée en K (ou en ˚C).

8- CALCUL DES PERTES :

Les pertes de chaleur dans un système donné par les différents modes de transfert (conduction, convection et rayonnement) constituent une dégradation de la performance thermique d'un processus. Ce qui augmente la consommation en énergie d'où la nécessité d'isoler le système afin de diminuer le flux de chaleur traversant les parois vers l'extérieur.

Cas de cylindres creux multicouches (Figure 10) :

C'est le cas pratique d'un tube recouvert d'une ou plusieurs couches de matériaux différents et où on ne connait que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les deux faces interne et externe du cylindre ; h_1 et h_2 sont les coefficients de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces interne et externe.

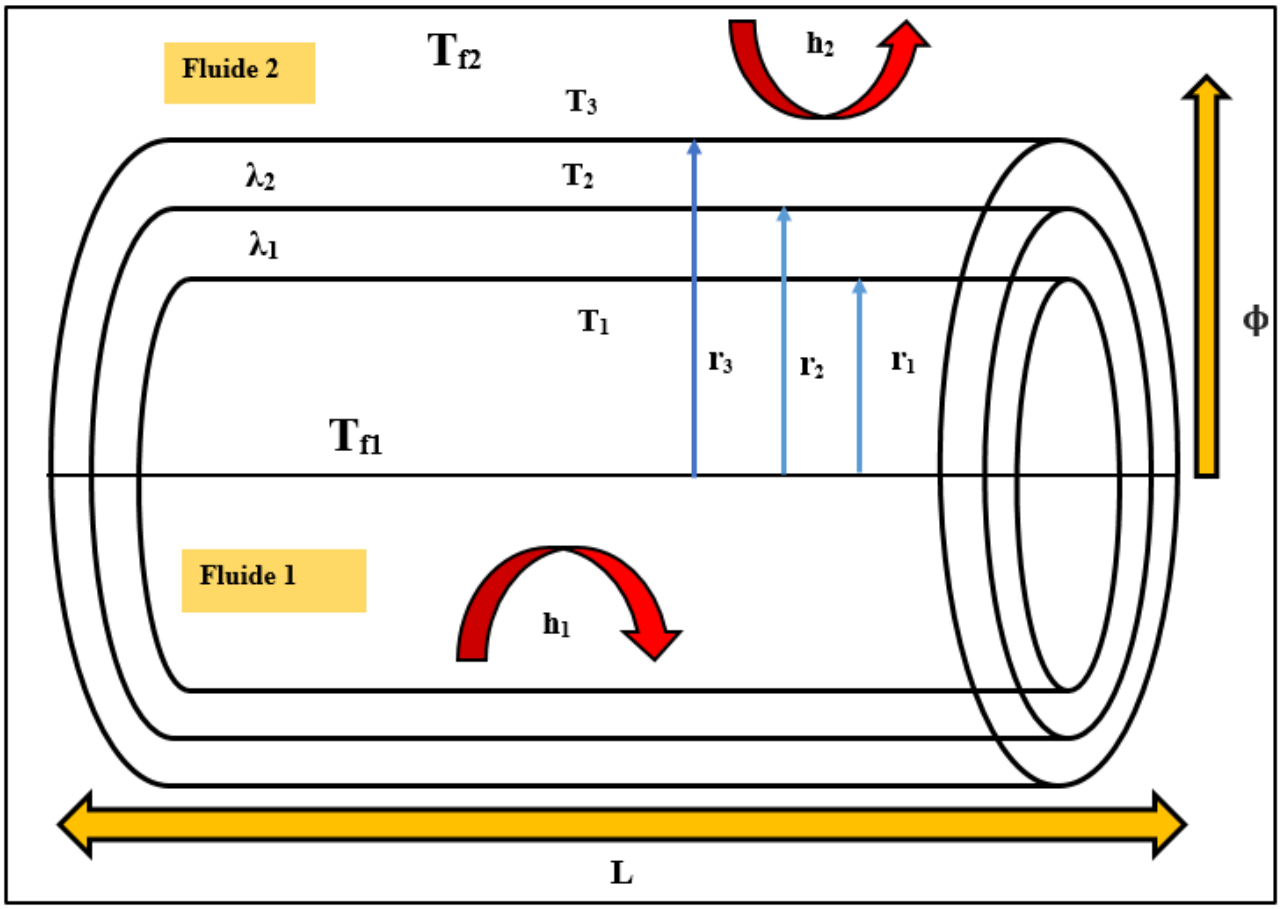

Figure 10 : Cas d'un cylindre creux multicouche

Avec λ_1 et λ_2 constituent les conductivités thermiques et traduisent l'aptitude des deux matériaux à conduire la chaleur, elles s'expriment en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

8-1- Pertes par convection et par conduction :

En régime permanent, le flux de chaleur ϕ correspondant aux flux par convection et par conduction se conserve (car il n'y a pas de génération de chaleur donc le flux à l'entrée est égal au flux à la sortie) lors de la traversée des différentes couches et s'écrit :

$$\phi = h_1 2\pi r_1 L (T_{f1} - T_1) = 2\pi \lambda_1 L \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2\pi\lambda_2 L \frac{T_2 - T_3}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = h_2 2\pi r_2 L (T_3 - T_{f2})$$

D'où : $$\phi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \lambda_2 L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_3 L}}$$

Ce qui peut être représenté par le schéma électrique suivant :

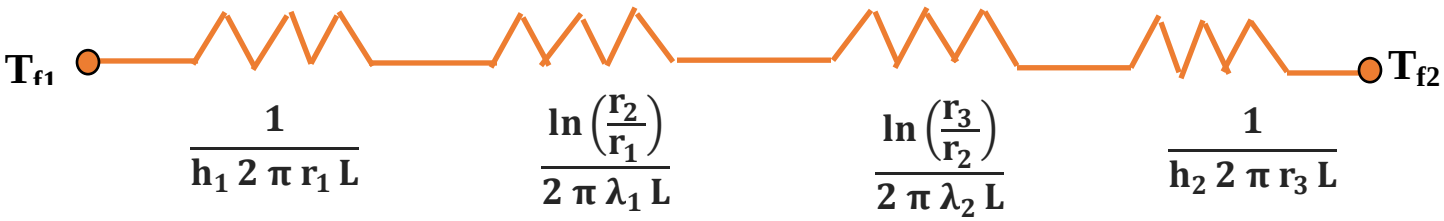

Figure 11 : le schéma électrique de la résistance thermique.

8-2- Pertes par rayonnement :

La densité de flux transférée par une surface, portée à une température T_s, lors de son émission du rayonnement est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

Pour une surface réelle :

$$\ddot{Q} = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Où $\sigma = 5.68 \times 10^{-8}$ W / m^2 . K^4 est la constante de Stefan et ε le coefficient d'émission du corps.

PARTIE B : NOTIONS THÉORIQUES SUR LE DIAGRAMME D'ISHIKAWA :

1- DÉFINITION : {6}

Le diagramme d'Ishikawa appelé aussi la méthode des 5M, le diagramme cause à effet ou le diagramme en arête de poisson est une démarche qui permet d'identifier les causes possibles d'un problème ou d'un défaut. Il convient ensuite d'agir sur ces causes pour corriger le défaut en mettant en place des actions correctives appropriées.

Pour tenter de diminuer ou d'anéantir un problème, il faut connaître toutes les causes qui peuvent lui donner naissance. Puis en cherchant leur poids relatif, on peut déterminer sur quelle cause agir en priorité.

L'inventeur de ce diagramme est le professeur Ishikawa (d'où l'appellation de la méthode), président de l'institut technologie Musashi, il a développé ce mode d'appréhension des problèmes et des solutions pour l'entremise des fameux cercles de la qualité dont il est d'ailleurs l'instigateur.

2- CONSTRUCTION DU DIAGRAMME D'ISHIKAWA :

Le diagramme d'Ishikawa se présente sous la forme d'un graphe en arêtes de poisson. Dans ce dernier, sont classées par catégorie les causes selon la loi des 5 M.

La méthode des 5 M permet d'orienter la réflexion vers les cinq domaines, desquels sont généralement issues les causes :

1) **M 1- Matières** : matières premières, pièces, ensembles, fournitures, identification, stockage, qualité, manutention.
2) **M 2 – Matériel** : recense les causes probables ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés. Machines, outils, équipements, capacité, maintenance.
3) **M 3 – Main d'œuvre** : directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence, d'organisation, de management.
4) **M4 – Milieu** : environnement physique, éclairage, bruit, aménagement, relations, température, climat, marché, législation.
5) **M 5 – Méthodes** : instructions, manuels, procédures, modes opératoires.

La construction du diagramme d'Ishikawa est élaborée en plusieurs étapes :

1) Décrire le problème ou la défaillance.
2) Déterminer les causes qui ont pu déclencher le problème.

3) Tracer le squelette du diagramme d'Ishikawa (sous forme d'arêtes de poisson) en y mentionnant les 5M.
4) Pour chaque catégorie de 5M, inscrire les causes suggérées par les membres du groupe en posant toujours la question : pourquoi telle cause produit-elle cet effet ?
5) Classer les causes proposées ou les hypothèses en de sous catégories.
6) Définir les causes premières qu'il est possible de soustraire, voire même éradiquer.
7) Trouver les solutions adéquates aux causes en mettant en place des actions correctives.

Toutes ces étapes permettent de décortiquer les causes provoquant le défaut. L'outil Ishikawa a été principalement conçu afin d'effectuer la gestion de la qualité. Il identifie les causes réelles à une problématique, et sert à amener de la rigueur dans l'analyse sur des faits réels et non pas sur des perceptions ou des préjugés.

Exemple :

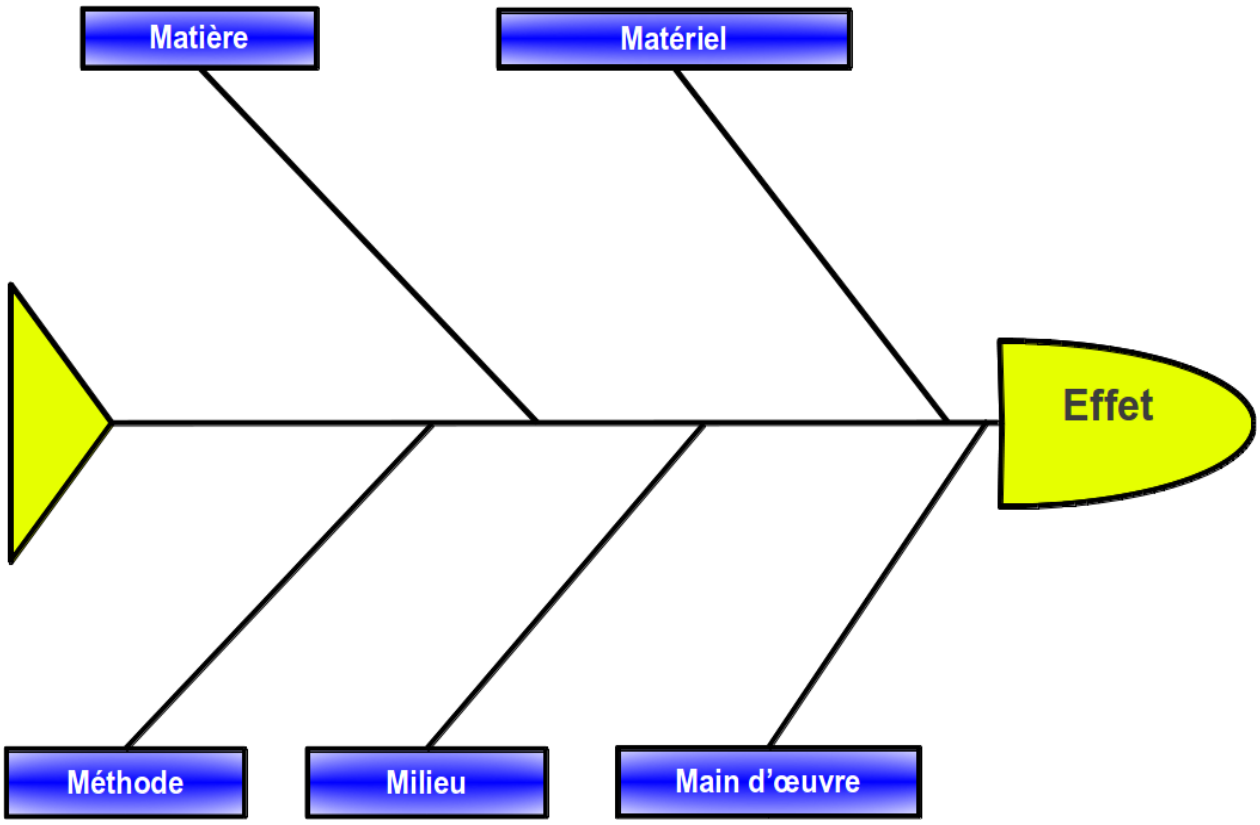

Figure 12 : Exemple de diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa, au départ limité à 5 M peut être étendu à un diagramme de 7 M, son objectif reste inchangé, c'est-à-dire il permet toujours une visualisation des causes de problèmes qu'il convient de traiter prioritairement.

Il s'agit des volets :

- Management : méthodes d'encadrement, style de commandement, délégation, organigramme imprécis…
- Moyens financiers : budget alloué, coûts…

Ces deux M constituent des facteurs intéressants notamment dans les domaines immatériels : services, gestion de projets, logiciels par exemple.

Sous des apparences de simplicité, cet outil permet d'inventorier et de présenter toutes les causes possibles entraînant un effet. L'analyse du diagramme est une aide à la décision pour une action corrective sur un effet observé ou pour mettre en place un projet.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE

1- INTRODUCTION :

Les cimenteries sont des gros consommateurs d'énergies thermique et électrique.

L'énergie dans la fabrication du ciment représente 40 à 50% du prix de revient. Selon l'entreprise Holcim, l'énergie thermique utilisée dans la fabrication du ciment s'élève de 3.2 à 5.5 GJ/T clinker d'où les efforts déployés pour optimiser le rendement énergétique et développer les combustibles alternatifs.

Les sources d'énergie impliquées dans la production de ciment sont les combustibles fossiles non renouvelables comme le charbon et le coke de pétrole. Cependant, toute une série de matières résiduelles qui ne sont pas valorisés représentent d'autres sources d'énergie dont nous pouvons tirer parti en les utilisant comme combustibles alternatifs dans les fours à ciment : vieux pneus, huile à moteur usagée, caoutchouc, les déchets ménagers, les matières de la biomasse comme les copeaux de bois, la boue, le papier et le carton. Auparavant, ces matières prenaient le chemin des sites d'enfouissement ou des incinérateurs où elles produisaient des gaz à effet de serre (GES) sans récupération d'énergie alors que maintenant elles sont valorisées dans les fours à cimenterie.

2- LES COMBUSTIBLES UTILISÉS DANS LA CIMENTERIE RAS EL MA :

Holcim Fès utilise actuellement deux types de combustibles, il s'agit du coke de pétrole (82%) et des grignons d'olives (18%).

2-1- Le coke de pétrole (Figure 13) :

Ainsi nommé par analogie avec le coke produit à partir de charbon, est un coproduit des raffineries de pétrole, lourd et formé de boulettes de goudron et de soufre. Il est produit par un procédé d'amélioration des coupes très lourdes de pétrole, il se présente sous forme solide, noire et se compose majoritairement de carbone, avec très peu d'hydrogène et des quantités importantes de polluants (souffre, métaux lourds…). En fonction des impuretés, le coke de pétrole est utilisé comme combustible ou comme matériau pour la fabrication d'électrodes. Pour la fabrication d'électrodes, le coke de pétrole est calciné afin d'obtenir un produit composé à plus de 98% de carbone. Ces électrodes sont ensuite utilisées dans l'industrie métallurgique notamment pour la production d'aluminium ou d'acier.

Figure 13 : Le coke de pétrole

2-2- Les grignons d'olive (Figure 12) :

Les grignons d'olives sont un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive composé des peaux, des résidus de la pulpe et des fragments des noyaux. Compte tenu du pouvoir calorifique des grignons et de l'augmentation du prix des combustibles fossiles, il paraît opportun d'examiner la transformation et l'utilisation des grignons à des fins énergétiques afin de réduire les coûts d'élimination des résidus issus des moulins à huile. Le noyau d'olive présente ainsi un pouvoir calorifique de l'ordre de 5 KWh/kg.

Figure 14 : Les grignons d'olive

3- PROBLÉMATIQUE :

Durant mon stage, il m'a été demandé d'optimiser l'énergie thermique du four afin de diminuer les coûts relatifs aux combustibles utilisés tout en respectant l'environnement concernant les émissions des gaz à effet de serre.

La consommation calorifique du four peut être calculée selon la formule suivante :

$$\textbf{\textit{Consommation Calorifique}} = \frac{\textbf{\textit{Energie calorifique}}}{\textbf{\textit{Production}}} = \frac{\sum_i^n \textbf{mi} * \textbf{PCI}}{\textbf{\textit{Production clinker}}}$$

Avec :

$\mathbf{m_i}$: la masse du combustible en Kg.

PCI : le pouvoir calorifique inférieur du combustible en J/Kg.

Production clinker : la quantité produite du clinker en Kg.

4- HISTORIQUE DE LA CONSOMMATION CALORIFIQUE CHEZ HOLCIM FÈS :

La société Holcim Fès donne une grande importance au suivi de l'énergie thermique du four vu l'importance des coûts des combustibles utilisés, et cherche toujours à diminuer la consommation calorifique de la production.

L'historique de cette consommation joue un rôle principal permettant la comparaison des coûts d'une année à l'autre.

Nous avons réalisé un historique de la consommation calorifique pour les années 2014 et 2015, et les résultats sont rassemblés dans le tableau 4 :

Mois	La consommation calorifique en 2014 en KJ/Kg clinker	La consommation calorifique en 2015 en KJ/Kg clinker
Janvier	3372	3418
Février	3372	3397
Mars	3458	3410
Avril	3393	3388
Mai	3373	3369
Juin	3344	3359
Août	3369	3341
Septembre	3452	3358
Octobre	3413	3408
Novembre	3305	3338
Décembre	-------	3334
Moyenne	3385.1	3374.5

Tableau 5 : Historique de la consommation calorifique pour les années 2014 et 2015

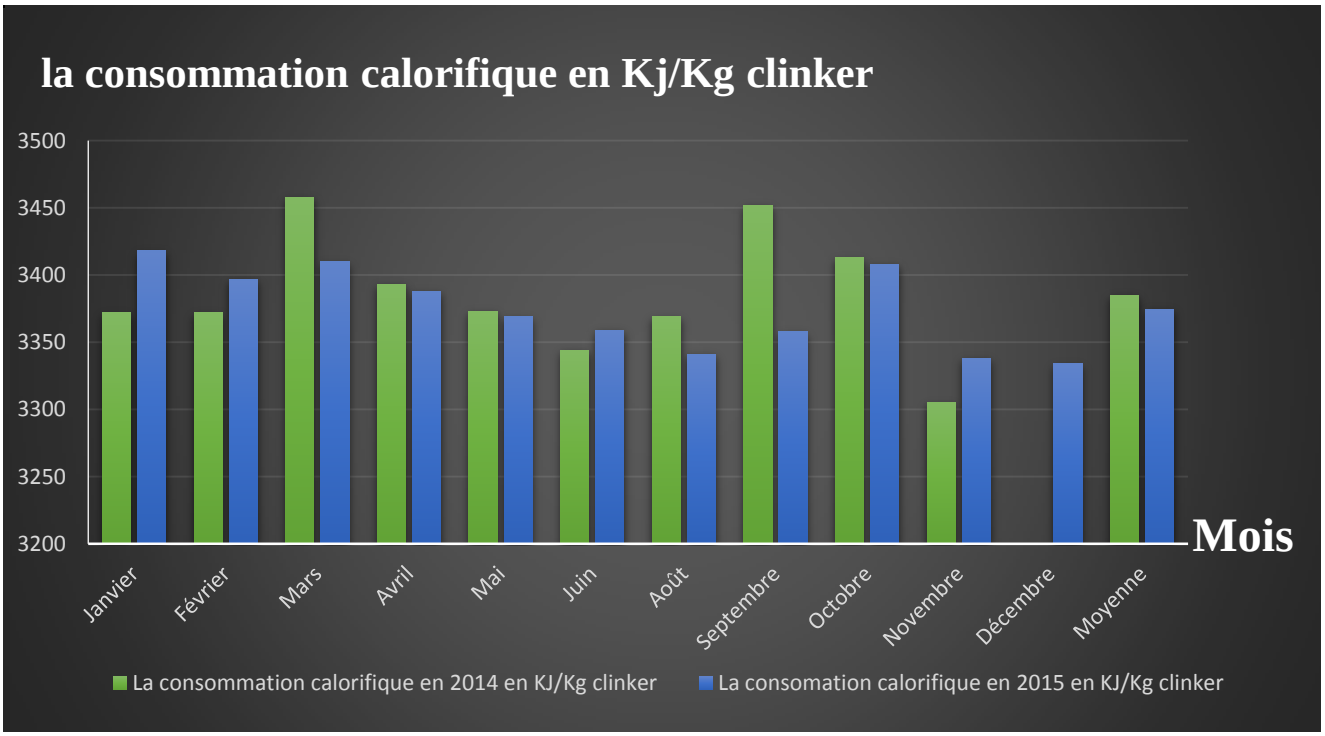

Figure 15 : Comparaison de la consommation calorifique des années 2014 et 2015

Interprétation :

À partir des données ci-dessus, on voit que la consommation calorifique allait pour l'année 2014 de 3305 KJ/Kg clinker pour le mois de Novembre à 3458 KJ/Kg clinker pour le mois de Mars de la même année ce qui a donné une valeur moyenne de 3385.1 KJ/Kg clinker. Cette valeur a connu une chute partielle de **10.6 KJ/Kg clinker** pour l'année 2015.

Remarque : le mois de décembre 2014 correspond à un arrêt du four.

5- LES CAUSES DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE THERMIQUE :

Afin d'optimiser les coûts de l'énergie thermique, nous avons réalisé une étude sur toutes les causes probables d'augmentations des coûts de la combustion et pour cela nous nous sommes basés sur la méthode d'Ishikawa. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans la figure 16 :

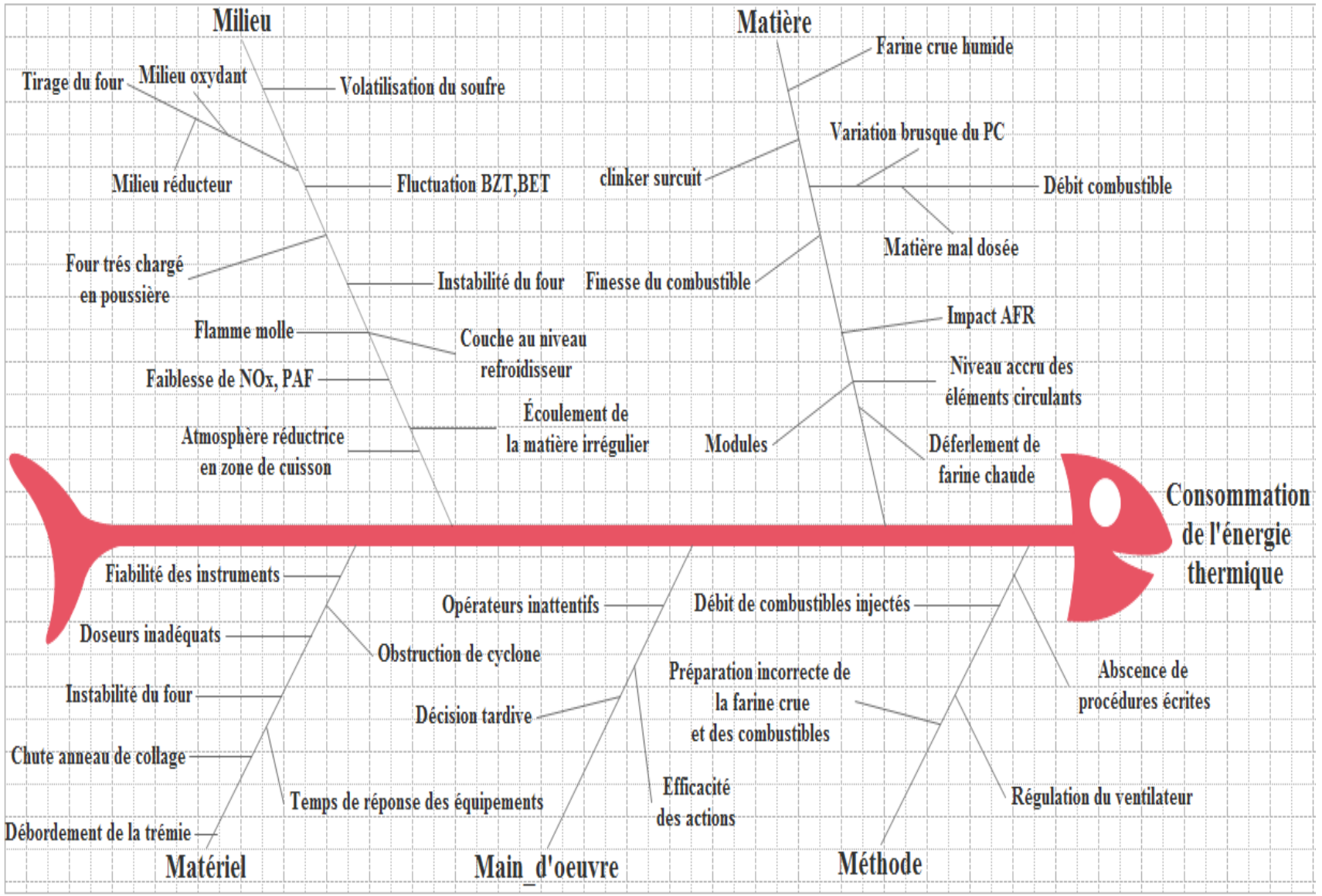

Figure 16 : Les causes de la consommation calorifique par la méthode du diagramme d'Ishikawa

Il paraît à partir du diagramme ci-dessus qu'il y a plusieurs paramètres pouvant influencer sur la consommation de l'énergie thermique. Pour ce projet, nous avons travaillé sur trois paramètres ayant une incidence directe sur l'augmentation de la consommation de l'énergie thermique, il s'agit des modules, de tirage du four et de la volatilisation du souffre.

a) Les modules :

Les modules empiriques du cru se calculent sur quatre composantes chimiques : CaO, SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 à partir de trois équations de référence : FSC, MS et MAF et qui seront expliquées par la suite.

b) Le tirage du four :

Le tirage du four permet l'alimentation de ce dernier en combustibles solides (coke de pétrole et grignons d'olive), liquide (gasoil) et gazeux (propane), et en air nécessaire à la combustion.

Le tirage du four est réalisé grâce à une tuyère installée à la sortie du four près de la flamme de ce dernier.

c) La volatilisation du soufre :

Le soufre qui se trouve dans les matières premières et les combustibles utilisés pour la fabrication du clinker cause, lorsque sa concentration est élevée, des difficultés de fonctionnement du four par la formation des collages des matières entraînant des blocages des cyclones dans la tour de préchauffage ou des rétrécissements de la zone d'entrée du four. Par conséquent, il peut y avoir plusieurs arrêts annuels du four dus à ces bouchages, dont l'impact sur la disponibilité et la productivité du four peut être très sévère.

CHAPITRE 5

Plan d’action d’amélioration

1- INTRODUCTION :

La fabrication du ciment est un procédé complexe et gourmand en énergie. Une étape importante est la transformation des minerais (calcaire, argile, schiste et sable) en clinker dans le four de cuisson. Une cimenterie type récupère les gaz brûlés du four pour préchauffer la matière première avant de l'enfourner. Au fur et à mesure de la montée en température de la zone de cuisson (jusqu'à 1450˚C environ), les minerais fondent partiellement et réagissent pour former le clinker, qui deviendra ensuite du ciment. De faibles quantités de gypse ($CaSO_4$) sont ajoutées et le mélange est finement broyé.

La nécessité de diminuer cette consommation calorifique demeure donc un volet primordial dans la stratégie de la société qui cherche toujours l'optimisation de ses couts de production en respectant la qualité exigée par les normes afin de satisfaire ses clients et aboutir au bénéfice souhaité par la direction.

Dans le cas de ce stage au sein de la société Holcim Fès, nous avons travaillé sur les trois axes cités dans le chapitre précédent (les modules, le tirage du four et la volatilisation du soufre) et par conséquent respecter la valeur nominale de la consommation calorifique précisée à 3360 Mcal/T clinker.

2- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS :

2-1- Description de la chaudière :

Les fours rotatifs de cimenterie sont des cylindres légèrement inclinés dans lesquels les matières premières subissent plusieurs transformations physiques : dissociation, décarbonation, calcination et clinkérisation.

Durant la cuisson, le four est animé par un mouvement de rotation, soumis à une inclinaison légère permettant à la matière de se déplacer facilement vers l'autre extrémité, tout en assurant un transfert de chaleur qui s'élève à 1450 ˚C, à l'aide d'une flamme à sa sortie.

L'allure du four de la cimenterie Holcim-Fès est présentée dans la figure 17 :

Figure 17 : Le four de la cimenterie de Fès

La matière quitte le cylindre sous forme de gros grains arrondis, le clinker. Le coke de pétrole est insufflé sous forme pulvérulente et chemine en sens inverse de la matière première.

L'inclinaison et la rotation du four permettent le déplacement des matières premières introduites à l'entrée du four à travers la virole vers la sortie de ce dernier sous forme de clinker.

Pour protéger la virole du four et les éléments rapportés et pour éviter des pertes de chaleur excessives, le four rotatif est garni d'un revêtement réfractaire spécial comme le montre la figure 18 :

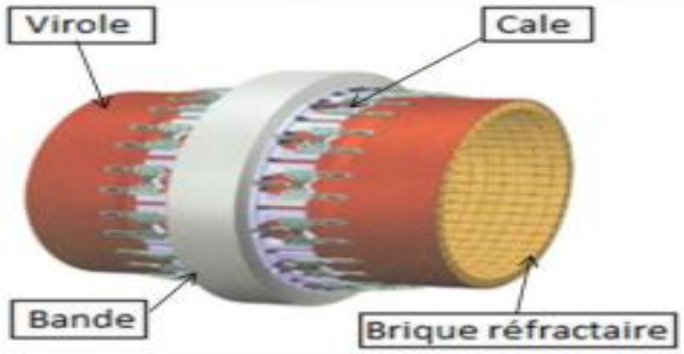

Figure 18 : Constituants du four rotatif de cimenterie

● **Virole** : pièce cylindrique creuse, sorte de tube dont la longueur arrive à plusieurs mètres.

● **Cale** : un objet servant à combler un vide ou à immobiliser une partie mobile afin qu'elle ne puisse plus bouger.

● **Bande** : un composant mécanique utilisé pour le guidage en rotation.

● **Brique réfractaire** : produit qui résiste, par nature, aux températures élevées et est utilisé en revêtement interne de four de cimenterie afin de diminuer les pertes de chaleur de combustion.

La virole se compose de plusieurs tronçons de différentes tailles, ces tronçons sont assemblés par soudage et sont revêtus par des briques réfractaires. La température à l'intérieur du four croit au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée, donc il est nécessaire de contrôler en permanence la température à l'extérieur de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. De plus il faut procéder à un contrôle visuel une fois par jour. La valeur de référence de la température maximale de la virole est de 350 ˚C.

Les différentes caractéristiques du four sont regroupées dans le tableau 6 :

Caractéristique	Valeur
La longueur	62 m
Le diamètre intérieur	3.40 m
Le diamètre extérieur	3.88 m
La vitesse de rotation	5.20 tr/min
L'inclinaison du four	3 %

Tableau 6 : Caractéristiques du four de la cimenterie de Fès

2-2- Démarrage du four :

Le processus de démarrage du four est une opération très complexe nécessitant une main d'œuvre qualifiée pouvant réussir la tâche.

Avant le démarrage du four, les techniciens spécialisés s'assurent de plusieurs réglages dont :

- La position de la torche d'allumage.
- La position des canaux de combustibles.
- Le démarrage des ventilateurs.

- La vérification du débit et de la pression de refoulement.
- Le réglage des vannes manuelles d'air afin d'obtenir la pression adéquate.
- S'assurer que la torche d'allumage produit une flamme suffisante et bien stable comme présentée sur la figure 19.

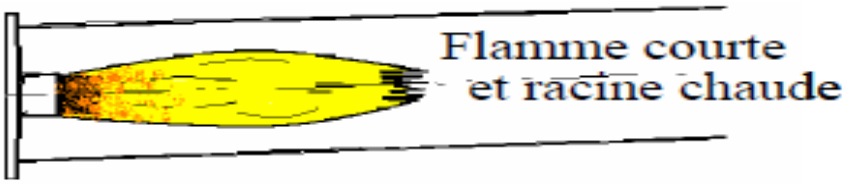

Figure 19 : la forme d'une flamme usuelle du four

La courbe de chauffe explique les différentes étapes d'injection des combustibles dans le four (Voir Figure 20).

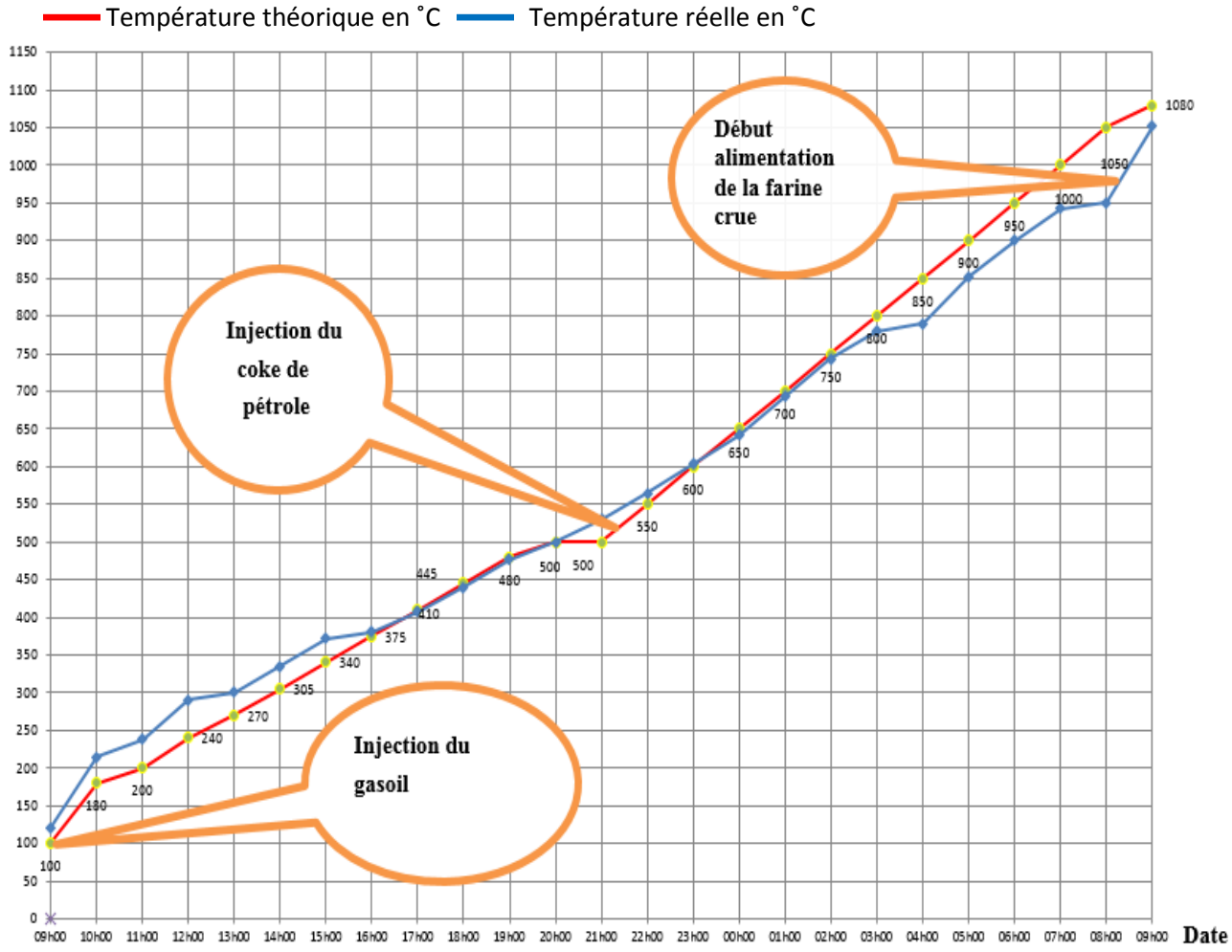

Figure 20 : la courbe de chauffe du four

Interprétation :

D'abord, il y a l'injection du gasoil qui chauffe le four jusqu'à une température de 550 ˚C. Une fois le four est suffisamment chaud, le brûleur peut être progressivement alimenté en combustible solide pulvérisé (le coke de pétrole). Cette opération s'accompagne de l'injection du gasoil avec un débit moins faible qu'au départ.

L'opération de chauffe du four dure une période de 24 heures. Et à partir d'une température de 1000 ˚C, le four peut être alimenté en farine crue pour acheminer la phase de cuisson.

2-3- Application numérique :

Cette partie est concernée pour l'application numérique de toutes les formules citées auparavant dans le chapitre 3.

2-3-1- Le flux de combustion :

Nous avons trouvé dans le chapitre 3 : $\phi_{combustion} = \dot{m}_{combustible} \times PCI$

Avec : $\dot{m}_{combustible} = 3.5\ t/h$ (82 % de coke de pétrole et 18 % de grignons d'olive)

$$\phi_{Combustion} = \left(\frac{3.5 \times 0.82 \times 1000 \times 7500 \times 4.18 \times 1000}{3600}\right) + \left(\frac{3.5 \times 0.18 \times 1000 \times 3500 \times 4.18 \times 1000}{3600}\right)$$

$$\phi_{Combustion} = 24.99 \times 10^6 + 2.56 \times 10^6 = \mathbf{27.55 \times 10^6\ W}$$

2-3-2- Le flux utile :

Nous avons : $\phi_{utile} = \dot{m}\ c\ (T_s - T_e)$ avec $\dot{m}$ = 185 t/h et c = 0.865 KJ/Kg.˚C

$$\phi_{utile} = \frac{185 \times 1000 \times 865 \times (1400 - 900)}{3600} = \mathbf{22.22 \times 10^6\ W}$$

2-3-3- Les pertes thermiques :

a) Pertes par convection et par conduction : {7}

Nous avons : $$\phi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1\ 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \lambda_2 L} + \frac{1}{h_2\ 2\pi r_3 L}}$$

$$\phi = \frac{1000 - 25}{\frac{1}{18 \times 2\,\pi \times 1.7 \times 62} + \frac{\ln\left(\frac{1.90}{1.70}\right)}{2\,\pi \times 4 \times 62} + \frac{\ln\left(\frac{1.94}{1.90}\right)}{2\,\pi \times 52 \times 62} + \frac{1}{10 \times 2\,\pi \times 1.94 \times 62}}$$

$$\phi = 3.38 \times 10^6 \text{ MW}$$

b) Pertes par rayonnement :

Nous avons : $\ddot{Q} = \varepsilon\, \sigma\, T_s^4$ avec $\varepsilon = 0.25$ pour l'acier constituant la virole du four

$$= 0.25 \times 5.68 \times 10^{-8} \times 298.15^4$$

$$= 112.21 \text{ W / m}^2$$

Et sachant que la surface du four de la cimenterie Holcim Fès, de forme cylindrique, est égale à :

$$S_{cylindre} = 2 \times \pi \times 1.94 \times 62$$

$$= 755.74 \text{ m}^2$$

Le flux des pertes par rayonnement s'écrit alors : $\phi' = 112.21 \times 755.74$

$$= 84.8 \times 10^3 \text{ W}$$

La somme des pertes par convection, conduction et rayonnement est alors :

$$\phi_{pertes} = \phi + \phi'$$

$$= 3.38 \times 10^6 + 84.8 \times 10^3$$

$$= 3.46 \times 10^6 \text{ W}$$

L'ensemble des pertes du four de la cimenterie de Fès constitue un pourcentage de :

$$\eta = \frac{\phi pertes}{\phi Combustion} = \frac{3.46}{27.55} = 0.1256 = 12.56\,\%$$

3- DÉTERMINATION DE LA VALEUR NOMINALE DE LA CONSOMMATION CALORIFIQUE :

Les responsables de la société Holcim Fès font une étude chaque fin d'année pour évaluer la valeur nominale de la consommation calorifique de l'année qui se suit en se basant sur l'historique des années précédentes et sur les contraintes présentes. Cette valeur est calculée à partir du tableur « Excel ». Ce dernier indique une valeur appelée **« guide value »**, limitant la consommation calorifique à un seuil donné à ne pas dépasser. Il s'ajoute à ce seuil les contraintes de la société y compris le taux de production, les pertes de chaleur et le type des combustibles utilisés. Une opération d'addition accumule tous les indicateurs pour donner la valeur réelle de la consommation de l'année en question.

Voici ci-dessous un exemple de calcul de consommation calorifique pour l'année 2015 (Figure 21) :

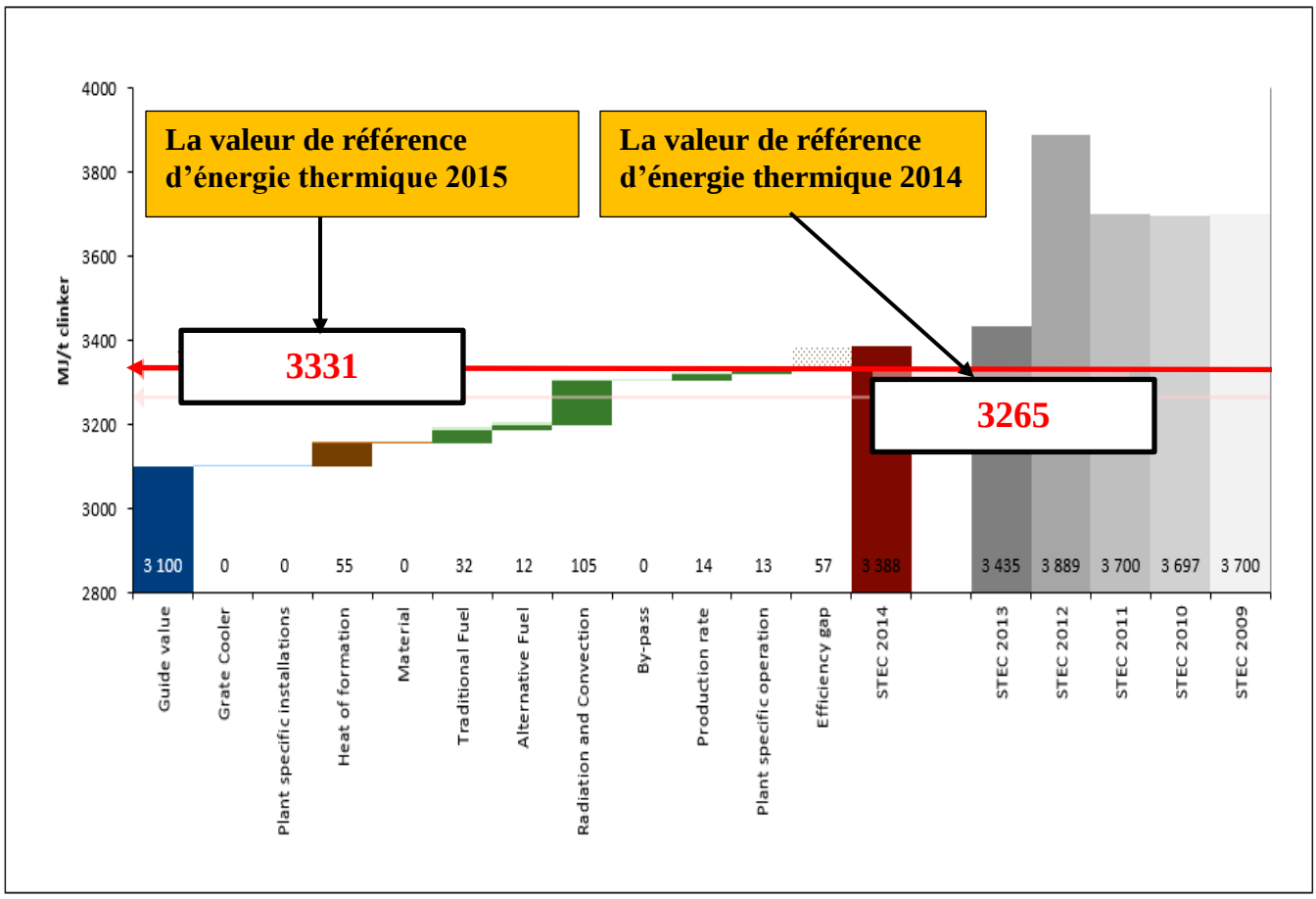

Figure 21 : Détermination de la valeur de référence de la consommation calorifique pour 2015

Interprétation :

Dans le graphe ci-dessus, la valeur 3100 MJ/t clinker présente la « guide value », à laquelle s'ajoutent les éléments suivants :

- 55 MJ/t clinker pour la chaleur de formation.
- 32 MJ/t clinker pour le coke de pétrole.
- 12 MJ/t clinker pour le combustible alternatif.
- 105 MJ/t clinker pour les pertes de chaleur.
- 14 MJ/t clinker pour le taux de production.
- 13 MJ/t clinker pour la récupération d'énergie des autres équipements de l'usine.

La somme de toutes ces valeurs donne le seuil 3331 MJ/t clinker qui est la valeur de référence de la consommation calorifique pour l'année 2015.

Si on fait une comparaison avec la consommation calorifique de l'année 2014, de valeur 3388 MJ/t clinker, on constate qu'il y a 57 MJ/t clinker de différence ce qui constitue par conséquent le gain entre les deux années. Ce gain correspond à 1.71 %.

Pour cette année, et avec la méthode ci-dessus, nous avons trouvé que la valeur de référence de la consommation calorifique est de 3360 MJ/t clinker.

4- POINTS D'AMÉLIORATION :

4-1- Introduction :

Afin d'optimiser l'énergie thermique dans le four de cimenterie de Holcim Fès, j'ai travaillé sur les axes concernant les modules de fabrication du clinker, le tirage du four et la volatilisation du soufre.

Les trois axes vont contribuer vers une diminution de la consommation calorifique qui sera utilisée par la suite afin d'estimer le gain économique résulté après l'implication des trois points d'améliorations cités ci-dessus.

4-2- Les modules :

4-2-1- La phase liquide (P.L) :

La formule générale du calcul de la phase liquide s'écrit :

$$\mathbf{P.L = 3\ Al_2O_3 + 2.25\ Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O + SO_3}$$

Avec :

Al_2O_3 : c'est l'aluminate, le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions.

Fe_2O_3 : c'est la ferrite. Le terme ferrite désigne en effet l'acier à très faible teneur en carbone.

MgO : l'oxyde de magnésium, se présente sous la forme de poudre blanche absorbant l'eau et le dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère.

K_2O : l'oxyde de potassium, se présente sous la forme d'un solide cristallisé ionique jaune pâle très réactif et par conséquent très rare dans le milieu naturel.

Na_2O : l'oxyde de sodium, il réagit avec l'eau pour donner l'hydroxyde de sodium.

SO_3 : le trioxyde de soufre, c'est un solide cristallisé incolore fondant dès 16.9 ˚C. Il se présente souvent sous forme de particules blanches (fumée). C'est un polluant majeur de l'atmosphère terrestre, résultant de l'oxydation du dioxyde de soufre SO_2, et notamment responsable des pluies acides.

La farine commence à s'agglomérer et forme des boulettes avec la rotation du four dans la zone de cuisson, ce qui provoquera l'apparition d'une fusion partielle.

Cette fusion donne « la phase liquide » :

- Si les fondants (Al_2O_3 et Fe_2O_3) sont insuffisants, la phase liquide est basse et le clinker se forme difficilement.
- Si les fondants sont élevés, le clinker se forme facilement.

Il existe alors les deux cas suivants :

- **PL < 20 %** : le four devient instable et le clinker tend à devenir pulvérulent, ce qui rend difficile la vision dans la zone de cuisson.
- **PL > 30 %** : l'excès de faible viscosité et de densité élevée attaque les briques réfractaires du four et détruit le croûtage de ce dernier.

Dans le cas général, il faut vérifier la condition : **24% < PL < 28%**

Afin de pouvoir agir sur la valeur de la phase liquide, il faut intervenir au niveau des modules du cru.

4-2-2- Le facteur de saturation en chaud (F.S.C) :

$$F.S.C = \frac{CaO * 100}{2.80\,SiO2 + 1.18\,Al2O3 + 0.65\,Fe2O3}$$

Le module F.S.C est fonction du potentiel d'attaque de la chaux et il est d'ailleurs le module le plus significatif dans la chimie du clinker puisqu'il regroupe tous les composants chimiques de la farine crue.

CaO : c'est la chaux, un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium, elle est obtenue par calcination du calcaire ($CaCO_3$) à environ 900˚C, on obtient de la chaux vive et un fort dégagement de dioxyde de carbone (CO_2).

C’est une réaction de décarbonatation, elle s’accompagne d’une perte massique pouvant atteindre 45% et volumique jusqu'à 15%, correspondant à la perte en dioxyde de carbone selon la réaction suivante :

$$\mathbf{CaCO_{3\ minéral\ ou\ roche}} \longrightarrow \mathbf{CaO_{solide}} + \mathbf{CO_{2gaz}}$$

SiO_2 : c’est la silice, le nom donné à un groupe de minéraux composés de silicium et d’oxygène, les deux éléments les plus abondants de l’écorce terrestre, il s’agit d’un solide de grande dureté, blanc ou incolore. La silice existe sous différentes formes, généralement, elle se trouve sous forme cristalline mais elle peut se trouver à l’état amorphe (non cristallisé). La silice cristalline est dure et elle présente un point de fusion élevé.

4-2-3- Le Module Silicique (M.S)

$$\boldsymbol{M.S = \frac{SiO2}{Al2O3 + Fe2O3}}$$

M.S caractérise bien le produit en ce qui concerne le rapport $\frac{\textbf{Solide}}{\textbf{Liquide}}$ en zone de cuisson.

La silice passe surtout, lors de la clinkérisation dans les phases solides (alite et bélite), tandis que l’alumine et l’oxyde de fer passent dans la phase fondue, et ils sont les agents de fusion, grâce auxquels commence la formation de la phase liquide, s’il y en a peu le MS est élevé et donc la cuisson est difficile.

4-2-4- Module Alumino Ferrique (M.A.F) :

$$\boldsymbol{M.A.F = \frac{Al2O3}{Fe2O3}}$$

La valeur du module M.A.F caractérise la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3.

Quand $\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{F}}$ est faible, la viscosité de la phase fluide diminue, et plus $\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{F}}$ est élevé, plus la proportion d’aluminates est grande, plus la phase liquide est visqueuse, et plus la température de clinkérisation sera élevée.

L’intervention se fait surtout sur les deux derniers modules (le **M.S** et le **M.A.F**).

Afin de visualiser l'impact de la phase liquide sur la diminution de la consommation calorifique, nous avons réalisé une analyse pour les mois de Janvier (sans changement de phase liquide) et Février (avec changement de phase liquide) de l'année 2016.

a) Le mois de Janvier 2016 :

Les données concernant la consommation calorifique et le pourcentage de la phase liquide sont regroupées dans le tableau 7 :

Date	Phase liquide en %	Consommation calorifique en KJ/Kg clinker
01,01,2016 22:00	24,1	3467,38
02,01,2016 00:00	24,3	3468,46
03,01,2016 02:00	24,1	3534,23
04,01,2016 04:00	24,2	3569,73
05,01,2016 06:00	24,3	3407,32
06,01,2016 08:00	24,5	3734,68
07,01,2016 10:00	24,7	3592,67
08,01,2016 13:00	24,5	3555,82
09,01,2016 14:00	24,9	3407,82
10,01,2016 16:00	24,5	3379,95
11,01,2016 12:00	24,1	5668,95
12,01,2016 14:00	24,1	3586,20
13,01,2016 14:00	24,0	3273,09
14,01,2016 16:00	23,8	3333,15
22,01,2016 08:00	24,0	3032,53
23,01,2016 10:00	24,1	3120,19
24,01,2016 12:00	24,3	3085,10
25,01,2016 14:00	24,4	3152,97
26,01,2016 16:00	24,5	3056,58
27,01,2016 00:00	24,5	6419,18

Tableau 7 : Variation de la consommation calorifique selon la phase liquide pour le mois de Janvier

Interprétation :

Durant le mois de Janvier, le pourcentage de la phase liquide ne dépassait pas 24.9 % et sa valeur minimale était 23.8 %. Par conséquent, ces valeurs avaient une influence remarquable sur la consommation calorifique arrivant à sa valeur maximale de 6419.18 KJ/Kg clinker.

Voici ci après le graphe de la variation de la consommation calorifique selon le pourcentage de la phase liquide pour le mois de Janvier de l'année 2016 (Figure 22).

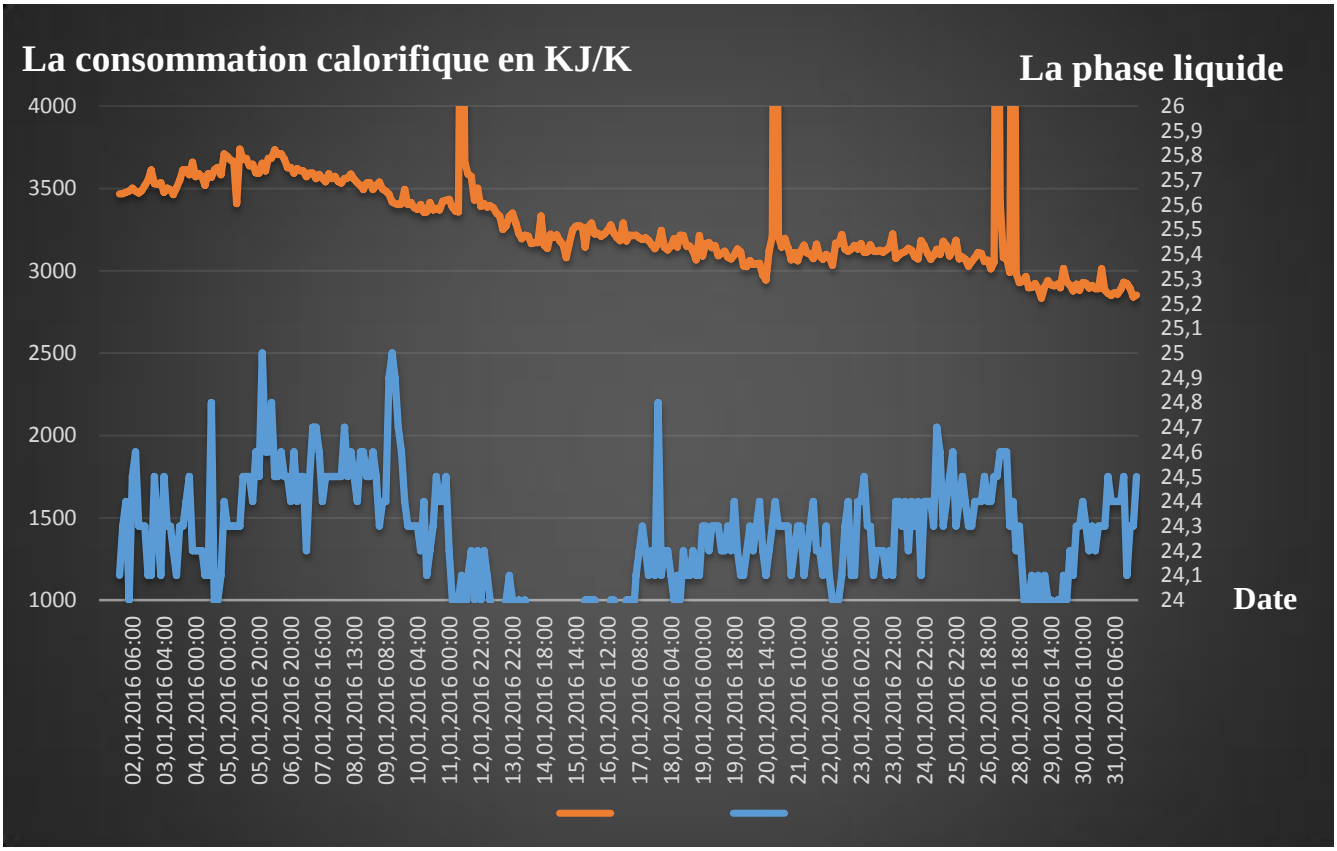

Figure 22 : Tendance de la consommation calorifique selon la phase liquide en Janvier

b) Le mois de février 2016 :

Le pourcentage de la phase liquide a connu une augmentation partielle arrivant à 25.9 %, ce qui a influencé positivement sur la consommation calorifique pour atteindre la valeur 2813.21 KJ/Kg clinker.

Voici ci-après, (le tableau 8), la variation du pourcentage de la phase liquide et son influence sur la consommation calorifique durant le mois de février :

Date	La phase liquide en %	La consommation calorifique en KJ/Kg clinker
01,02,2016 00:00	24,5	2855,98
02,02,2016 02:00	24,3	2937,01
03,02,2016 04:00	24,2	2910,81
04,02,2016 06:00	24,4	2896,93
05,02,2016 04:00	24,5	2834,33
06,02,2016 16:00	24,8	2854,90
07,02,2016 00:00	24,7	2883,65
08,02,2016 16:00	24,7	2842,82
09,02,2016 22:00	25,7	2872,49
10,02,2016 10:00	25,9	2862,91
11,02,2016 02:00	25,7	2839,08
12,02,2016 08:00	25,2	2874.70
13,02,2016 22:00	25,5	2899,34
14,02,2016 16:00	25,5	2817,23
15,02,2016 12:00	25,6	2863,38
16,02,2016 08:00	25,0	2825,18
17,02,2016 10:00	24,7	2813,21
18,02,2016 04:00	24,4	2864,83
19,02,2016 02:00	24,4	2837,46
20,02,2016 10:00	24,4	2891,60
21,02,2016 20:00	24,7	2856,77
22,02,2016 12:00	25,2	3049,12
23,02,2016 06:00	25,0	3085,88
24,02,2016 06:00	25,1	3023,98
25,02,2016 20:00	25,1	2991,19
26,02,2016 08:00	24,9	3044,70
27,02,2016 04:00	25,0	3276,75
28,02,2016 20:00	25,0	3282,77

Tableau 8 : Variation de la consommation calorifique selon la phase liquide pour le mois de Février

Voici ci après le graphe (Figure 23) de la variation de la consommation calorifique selon le pourcentage de la phase liquide pour le mois de Février de l'année 2016.

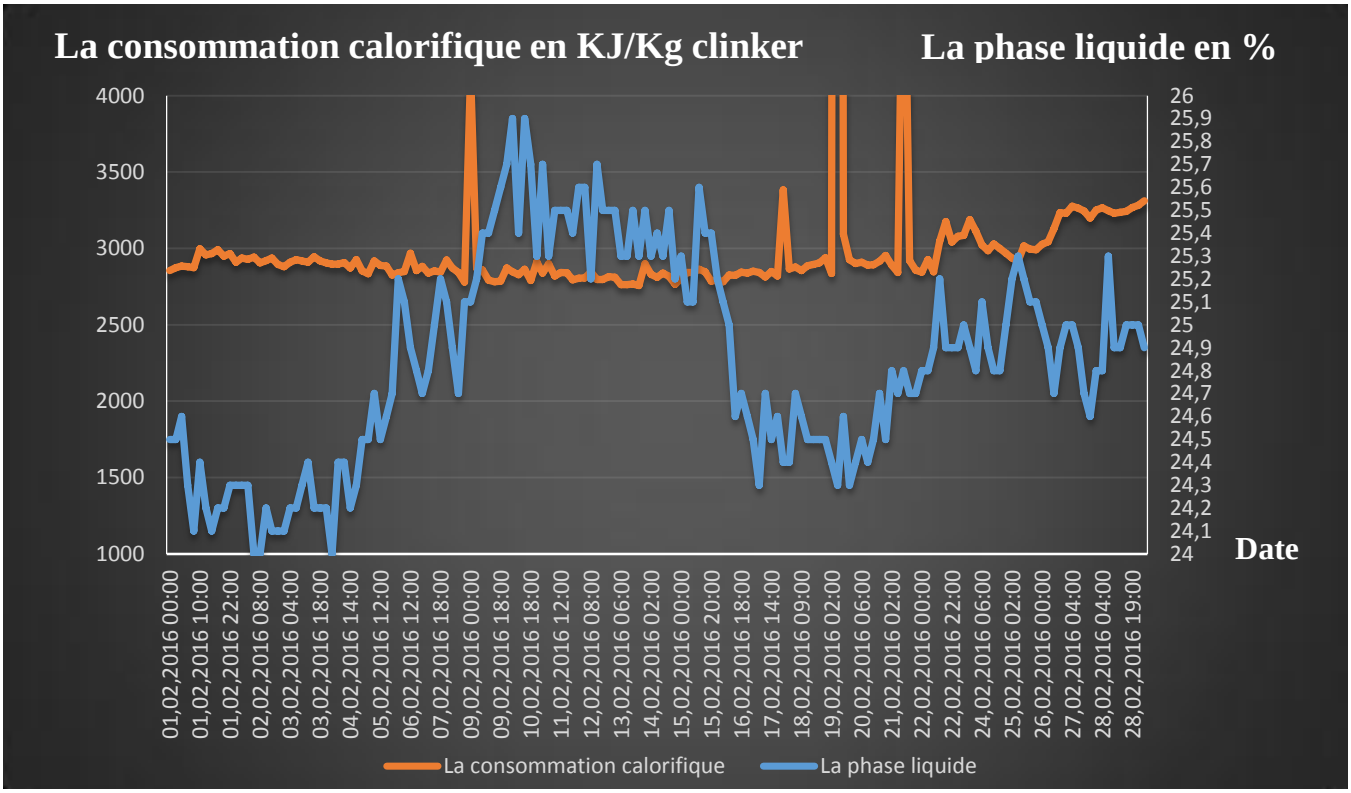

Figure 23 : Tendance de la consommation calorifique selon la phase liquide en Février

c) Conclusion :

Il s'en déduit de ce qui précède qu'une augmentation du pourcentage de la phase liquide a été efficace pour la diminution de la consommation calorifique. Cependant une haute augmentation de ce pourcentage aura des effets contradictoires sur la consommation calorifique, ce qui implique la condition suivante : **24.8 % < Phase liquide < 25.3 % (**selon le graphe de la figure 23**)**.

4-3- Le tirage du four :

4-3-1- Définition :

Le tirage du four est assuré par une tuyère dont la forme est donnée ci-après dans la figure 24 :

Figure 24 : Photo d'une tuyère

La tuyère est un conduit de section droite variable placé à l'arrière d'un moteur produisant des gaz de combustion chauds qui permet de transformer l'énergie thermique de ceux-ci en énergie cinétique. Pour atteindre cet objectif et en fonction du contexte de mise en œuvre, une tuyère peut être convergente, divergente ou comporter une section convergente et une autre divergente. Il se trouve notamment des tuyères des moteurs à réaction équipant les avions et les moteurs de fusés.

L'objectif d'une tuyère est d'augmenter l'énergie cinétique du fluide qui la traverse, c'est-à-dire sa vitesse. Le principe de fonctionnement d'une tuyère repose sur les propriétés des gaz lorsqu'ils circulent aux vitesses subsonique (vitesse inférieure à la vitesse du son) et supersonique (vitesse supérieure à la vitesse du son). Lorsqu'un gaz circule à une vitesse subsonique dans un tuyau dont le diamètre se rétrécit, sa vitesse augmente. En effet, en régime d'écoulement supersonique, le comportement du gaz s'inverse : pour que sa vitesse augmente, il faut que le diamètre du tuyau augmente.

La tuyère a une importance capitale dans le déroulement de la combustion. Il permet en effet de produire une flamme constamment stable pour tous les débits, ce qui aura pour conséquence un croûtage stable et par la même, une protection adéquate du réfractaire.

4-3-2- Description de la tuyère de la cimenterie Ras El Ma :

a) Caractéristiques :

La tuyère utilisée chez Holcim Fès est représentée sur la figure suivante :

Figure 25 : Photo de la tuyère de la cimenterie de Fès

Cette tuyère est de type Diesel et combustible pulvérisé dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 9 :

Caractéristiques de la tuyère	Valeur
Puissance calorifique	57 MW
Longueur partie avant	5.5 m
Longueur totale approximative	11 m
Poids unitaire approximatif avec béton réfractaire	8 000 Kg
Revêtement réfractaire, épaisseur conseillée	80 mm
Débit d'air de combustion	60 500 Nm^3/h
Débit maxi du coke de pétrole	9 000 Kg/h
Débit nominal du coke de pétrole	7 900 Kg/h
Débit diesel	1 000 Kg/h

Tableau 9 : caractéristiques de la tuyère du four de Holcim Fès

b) Canaux d'air et de combustibles :

La tuyère contient plusieurs canaux selon la fonction dans le four (Figure 26) :

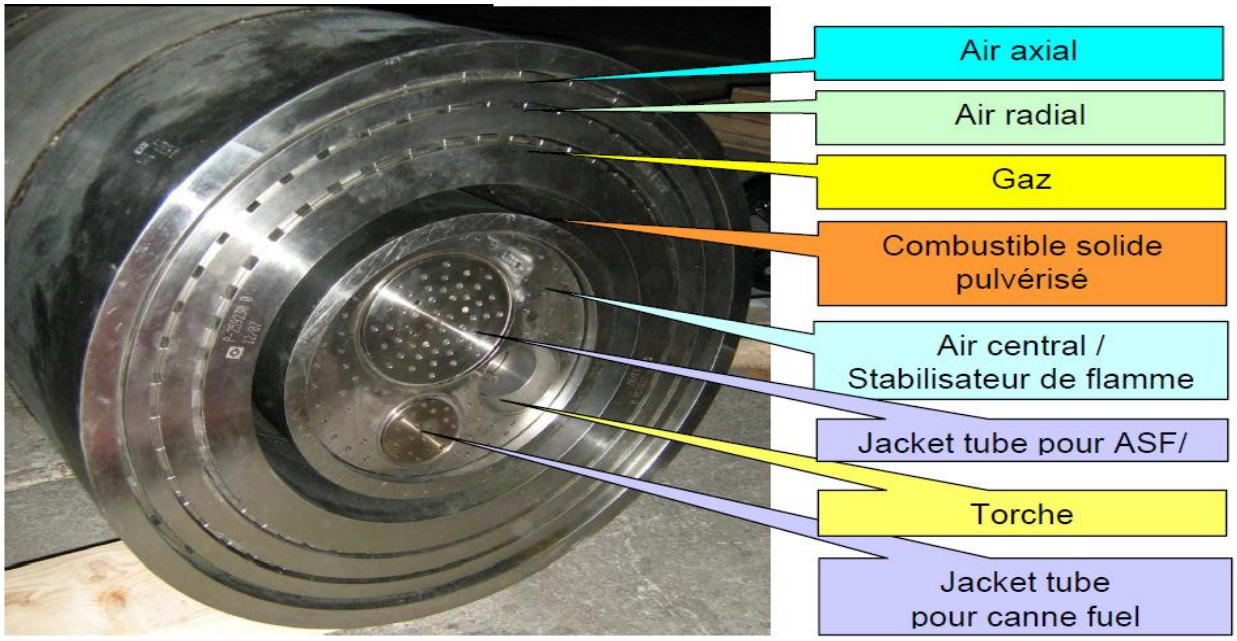

Figure 26 : Différents canaux de la tuyère

1) L'air axial :

L'air axial permet d'obtenir une flamme dure à forte impulsion. La section de passage des rainures améliore la pénétration de l'air secondaire (l'air issu du refroidisseur du clinker) dans la flamme alors que la section de passage annulaire permet de limiter la divergence de la flamme (Figure 23). La proportion entre la section des rainures et la section annulaire est ajustée par la modification de la position des sections des circuits d'air axial appelés l'embout axial.

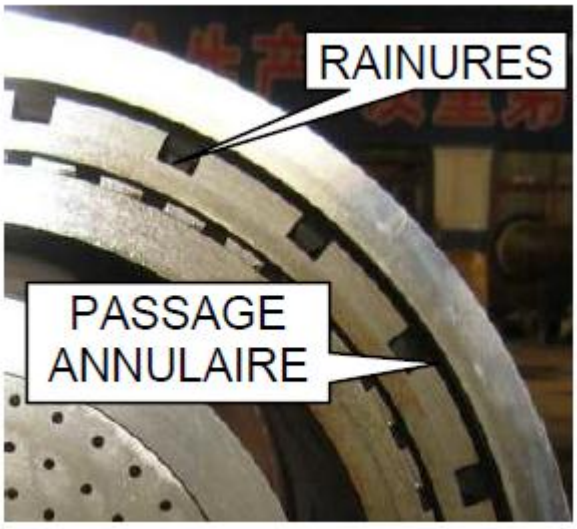

Figure 27 : Embout d'air axial

2) L'air radial :

L'air radial permet la modification de la composante rotationnelle. Avec un rotationnel plus grand, la flamme devient plus large et le mélange entre le combustible et l'air plus rapide.

3) Circuit gaz :

Les combustibles gazeux sont injectés à travers une rosace, à une vitesse d'environ 300m/s.
La section de sortie est réglable, afin de permettre un contrôle de l'impulsion du jet de gaz par modification de sa vitesse.

4) Circuit combustible solide pulvérisé (charbon ou coke de pétrole) :

Il permet l'injection de combustibles solides pulvérulents par transport pneumatique. Le combustible est injecté avec une faible divergence à une vitesse variable (jusqu'à 35 m/s) en fonction des caractéristiques du combustible (finesse, pourcentage de volatilité…).

5) Circuit d'air central :

Ce circuit d'air comporte à son extrémité le stabilisateur de flamme au travers duquel passe une très faible quantité d'air. Le stabilisateur, constitué d'un disque en acier réfractaire percé d'une multitude de trous, permet de générer une dépression à la racine de la flamme facilitant ainsi son accrochage.

6) Jacket tube (s) :

Il autorise la mise en place soit d'une canne de pulvérisation fioul ou gaz, permettant d'assurer le démarrage et/ou le débit nominal. Un ou plusieurs jacket tube (s) supplémentaire (s) peuvent être prévus pour recevoir la torche d'allumage et/ou un ou plusieurs cannes d'injections de combustibles liquide ou solide alternatifs.

4-3-3- Principe de réglage de la tuyère :

Un réglage précis des sections nommées embouts est possible grâce au système suivant (Figure 28) :

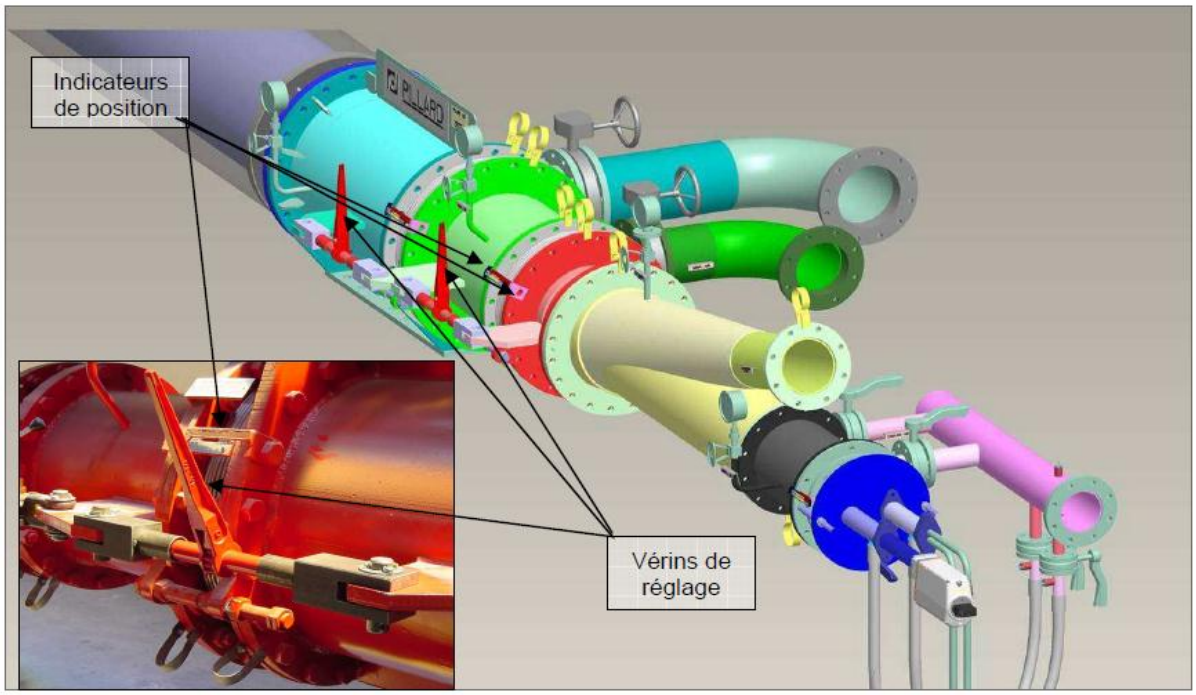

Figure 28 : Système de réglage de la tuyère

a) Réglage de l'air axial :

L'air axial peut être régler en déplaçant (avançant ou reculant) le tube intérieur du circuit axial d'environ 20 mm au maximum. Le réglage de la position axiale modifie le profil de température de flamme grâce à :

- La variation de la section de sortie ainsi que le ratio section des rainures / section passage annulaire.
- La variation du débit d'air axial.

En position ouverte (position de l'indicateur sur "0") :

Dans cette position, la section annulaire de l'embout est à son minimum, le débit d'air axial est notablement réduit et la pénétration de l'air secondaire dans la flamme augmentée entraînant une racine de flamme plus chaude.

En position fermée (position de l'indicateur sur "35") :

Dans cette position, la section annulaire de l'embout est à son maximum, le débit d'air primaire est maximum et le diamètre de la flamme à son minimum, pour un réglage donné de l'embout radial.

b) Réglage de l'air radial :

L'air radial contrôle l'effet rotationnel de la flamme. Quand l'air radial est réduit, l'effet rotationnel est réduit et la flamme devient plus mince. Quand l'air radial (débit et/ou pression) augmente, l'effet rotationnel augmente et la flamme devient plus large.

L'effet rotationnel peut être réglé :

- Soit en agissant sur la pression d'air radial (faire baisser la pression fera baisser le débit et la vitesse d'éjection).
- En modifiant la section de l'embout radial en avançant ou en reculant le tube intérieur radial (réduire la section va faire décroître le débit à pression constante). A l'inverse de l'embout axial, l'embout radial est fermé (section mini) en position 35 et ouvert (section maxi) en position 0.

Le réglage des embouts de la tuyère a été effectué grâce à une simulation réalisée sur le tableur Excel comme suit : on fait entrer les différentes données concernant les caractéristiques du four (longueur et diamètre), la température, la production du clinker et le type de combustibles utilisés.

Le calculateur Excel calcul à l'aide de différentes équations, la position des embouts de chacun de l'air axial et de l'air radial selon la valeur de la consommation calorifique souhaitable.

La simulation a donné les résultats suivants :

- Pour l'air axial : la diminution de la position de l'embout de 35 à 30.
- Pour l'air radial : l'augmentation de la position de l'embout de 20 à 35.

4-4- La volatilisation du soufre :

4-4-1- Définition :

Le soufre est l'élément chimique de numéro atomique 16, de symbole S et il est classé parmi les non-métaux. C'est un membre du groupe des chalcogènes dans le tableau périodique chimique. Cet élément est aujourd'hui l'un des plus importants de la chimie moderne, le soufre à l'état standard un solide jaune, inodore, sans saveur, insoluble dans l'eau, aux propriétés mécaniques médiocres et très mauvais conducteur. Par ailleurs, le soufre est essentiel à tous les organismes, et il se trouve naturellement dans le gypse, dans le schiste, dans le charbon, dans le grès et dans la chaux.

Figure 29 : Types de soufre

Dans le charbon et le pétrole, le soufre se trouve en petites quantités produisant ainsi, lorsqu'ils brûlent, le dioxyde de soufre (un composé chimique de formule SO_2, il s'agit d'un gaz incolore, dense et toxique et il est libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de certains charbons, pétroles et gaz naturels non désulfurés).

Des normes sur les carburants exigent de plus en plus que le soufre soit extrait des combustibles fossiles, parce que le dioxyde de soufre se combinant avec l'eau présente dans l'atmosphère (gouttelettes de pluie) engendre la production des pluies acides.

4-4-2- Changement du type du coke de pétrole :

Auparavant, le coke de pétrole utilisé dans le four de HOLCIM Ras El Ma était de type haute teneur en soufre, la chose qui a augmenté la volatilité durant la combustion et par conséquent a agrandi la consommation calorifique.

a) Le mois de Janvier 2016 :

La variation de la consommation calorifique durant le mois de Janvier est donnée dans le tableau 10 :

Date	Coke de pétrole HTS en t	Consommation calorifique en KJ/Kg clinker
01/01/2016 00:00	11,35	3438,50
02/01/2016 00:00	11,43	3468,46
03/01/2016 00:00	11,48	3527,51
04/01/2016 00:00	11,56	3571,32
05/01/2016 00:00	11,83	3694,40
06/01/2016 00:00	12,22	3606,44
07/01/2016 00:00	12,45	3619,55
08/01/2016 00:00	12,38	3572,93
09/01/2016 00:00	12,16	3494,47
10/01/2016 00:00	11,86	3414,47
11/01/2016 00:00	11,78	3434,41
12/01/2016 16:00	11,14	3573,92
13/01/2016 00:00	11,18	3407,97
14/01/2016 00:00	10,70	3291,60
15/01/2016 00:00	10,55	3204,25
16/01/2016 22:00	10,21	3289,28
17/01/2016 22:00	10,09	3244,60
18/01/2016 22:00	10,21	3214,73
19/01/2016 02:00	09,99	3164,76
20/01/2016 18:00	09,79	3209,92
21/01/2016 02:00	10,24	3196,72
22/01/2016 14:00	09,56	3219,39
23/01/2016 22:00	09,85	3222,88
24/01/2016 20:00	09,49	3183,24
25/01/2016 22:00	09,55	3184,36
26/01/2016 12:00	09,39	3111,81
28/01/2016 06:00	09,50	3415,22
29/01/2016 22:00	09,49	3013,30
30/01/2016 22:00	09,79	3010,98

Tableau 10 : Variation de la consommation calorifique selon le type HTS en Janvier

Interprétation :

Il s'en déduit, d'une part, qu'avec un coke de pétrole HTS, la consommation calorifique a atteint des valeurs élevées arrivant à 3694.40 KJ/Kg clinker.

D'autre part, il est remarquable que lorsque le nombre de tonnes du coke de pétrole HTS diminue, la consommation calorifique diminue.

La distribution de ces variations est donnée dans le graphique ci-dessous (Figure 30) :

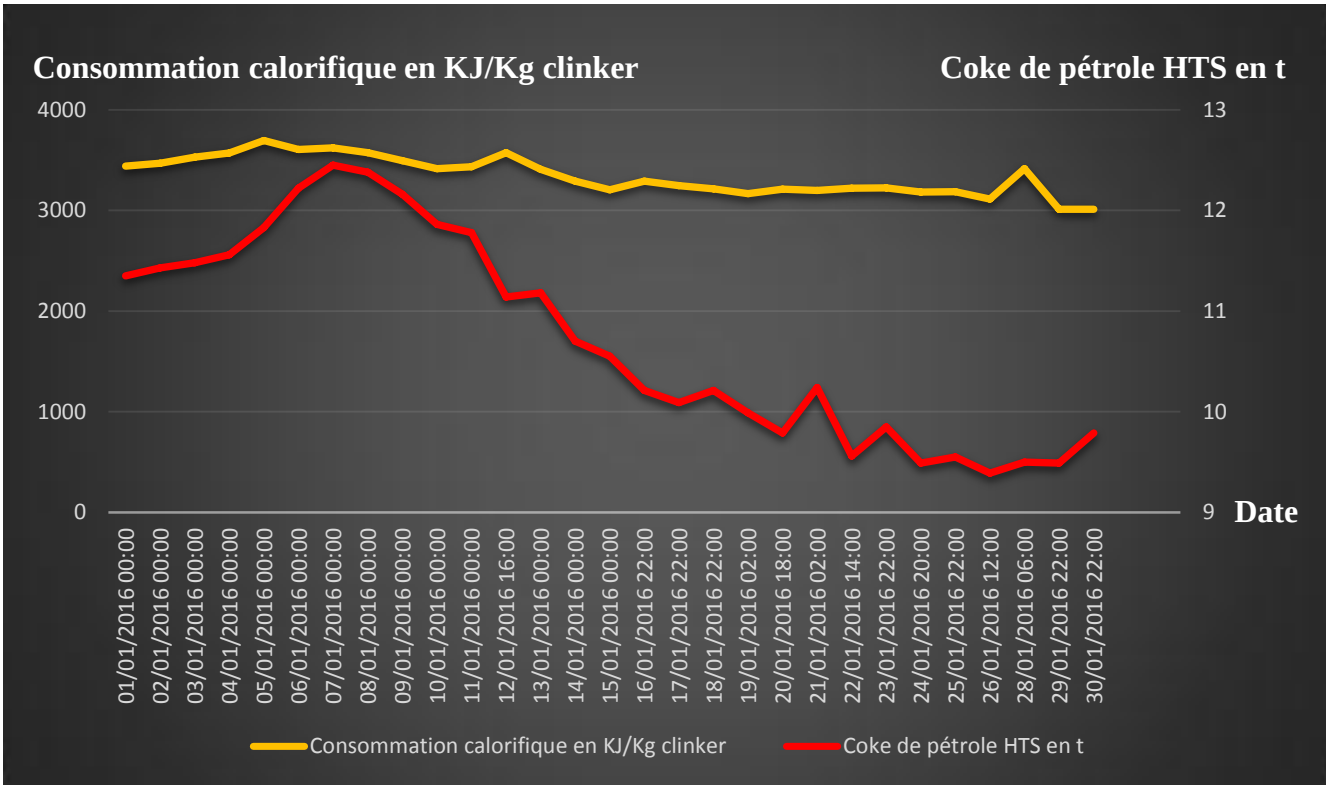

Figure 30 : Variation de la consommation calorifique avec le coke de pétrole HTS

Interprétation :

On constate que la variation de la consommation calorifique suit l'allure de la masse du coke de pétrole à haute teneur en soufre injectée dans le four.

L'amélioration de cet inconvénient a été au niveau du type du combustible utilisé. Il fallait donc le changer par un autre type de coke de pétrole ayant une teneur inférieure en soufre.

Après l'introduction de ce nouveau type (coke de pétrole à moyenne teneur en soufre), nous avons enregistré de nouveaux résultats (Voir Tableau 11).

b) Le mois de Février 2016 :

Date	Coke de pétrole MTS en t	Consommation calorifique en KJ/Kg clinker
01/02/2016 10:00	20,39	2997,18
02/02/2016 06:00	20,85	2944,35
03/02/2016 17:00	20,05	2946,13
04/02/2016 22:00	06,89	2925,77
05/02/2016 08:00	06,89	2918,87
06/02/2016 12:00	06,89	2968,42
07/02/2016 00:00	06,69	2883,65
08/02/2016 02:00	06,89	2925,17
09/02/2016 22:00	06,50	2872,49
10/02/2016 22:00	06,30	2910,95
11/02/2016 04:00	06,50	2899,93
12/02/2016 08:00	06,30	2847,70
13/02/2016 22:00	05,91	2899,34
14/02/2016 10:00	05,91	2838,81
15/02/2016 12:00	06,10	2863,38
16/02/2016 18:00	06,11	2844,28
17/02/2016 02:00	06,10	2850,63
18/02/2016 09:00	06,10	2854,98
19/02/2016 02:00	05,91	2837,46
20/02/2016 10:00	00,00	2891,60
21/02/2016 06:00	00,00	2843,40
22/02/2016 22:00	04,72	3042,22
23/02/2016 02:00	04,73	3079,70
24/02/2016 22:00	06,26	2967,49
25/02/2016 06:00	05,91	2916,16
26/02/2016 00:00	06,10	3026,82
27/02/2016 20:00	04,73	3198,78
28/02/2016 12:00	06,21	3229,89

Tableau 11 : Variation de la consommation calorifique selon le type MTS en Février

Interprétation :

Les résultats enregistrent une chute importante au niveau de la consommation calorifique arrivant à 2837.46 KJ/Kg clinker.

La variation de la consommation calorifique selon la masse du coke de pétrole MTS est donnée dans le graphe de la figure 31 :

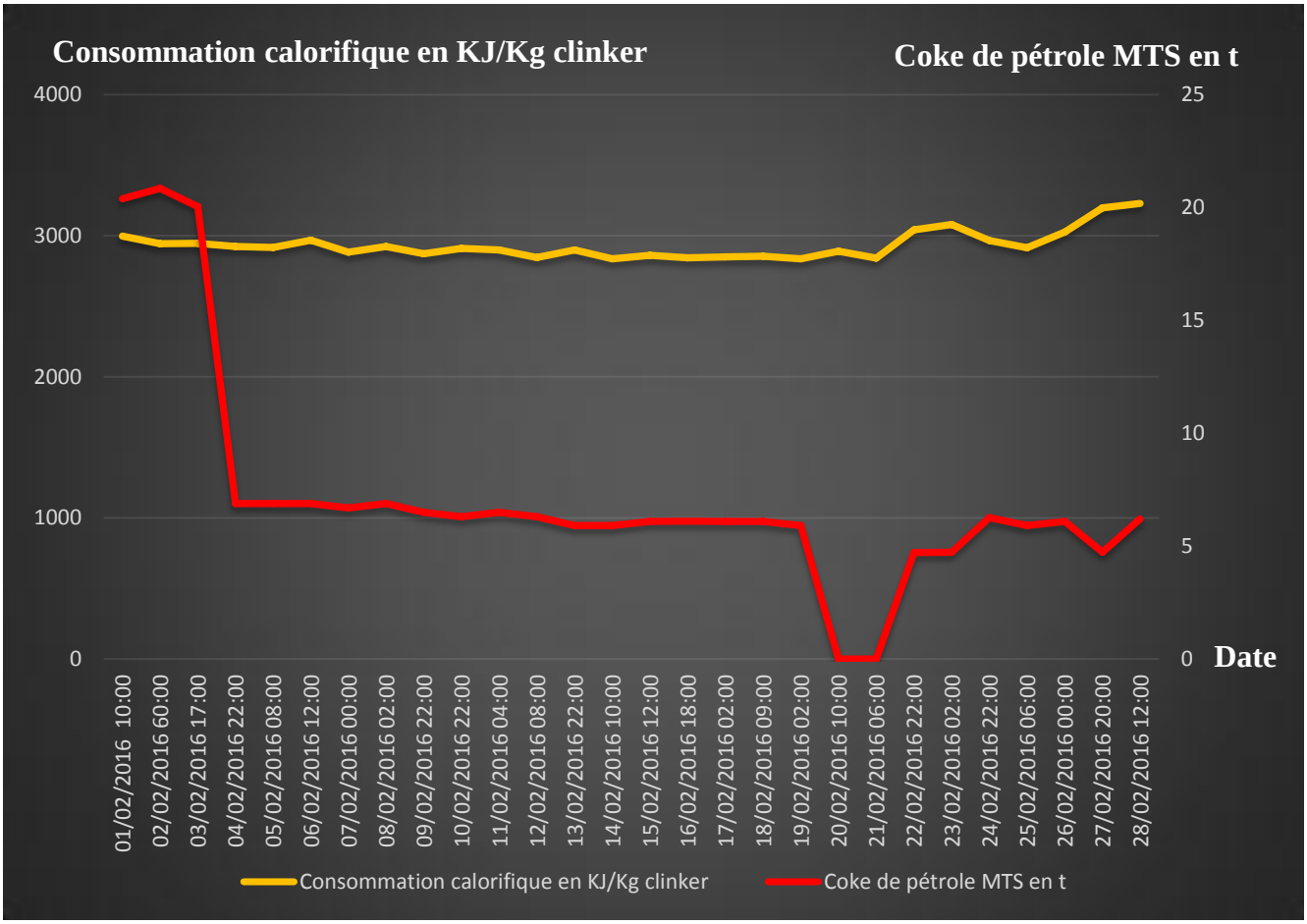

Figure 31 : Variation de la consommation calorifique avec le coke de pétrole MTS

Interprétation :

La même remarque qu'avec le coke de pétrole HTS, la consommation calorifique a une tendance parallèle avec la variation du tonnage du coke de pétrole MTS.

5- LE GAIN ÉCONOMIQUE :

L'optimisation de la facture énergétique doit entrer au cœur du processus de fabrication du ciment à cause de l'augmentation du prix des combustibles utilisés pour la clinkérisation de la farine crue.

5-1- La consommation annuelle de la cimenterie Holcim Fès en 2015 :

Pour l'année 2015, le four de cimenterie a consommé une valeur énergétique de 3380 MJ/t clinker.

Le prix du coke de pétrole est 980 MAD/t, et son pouvoir calorifique est de 7500 Mcal/t.
On obtient alors la relation suivante :

$$\textbf{Prix du combustible} = \frac{980}{7500 \times 4.18} = 0.03126\ \textbf{MAD/MJ}$$

D'où : $\mathbf{3380 \times 0.03126 = 105.66\ MAD/t}$

La performance φ de l'usine est calculée selon la formule empirique issue du département de la production de la cimenterie Holcim:

$$\varphi = \frac{\text{Débit} \times 0.6 \times 24\ \text{h}}{\text{Production}} = \frac{185 \times 0.6 \times 24\ \text{h}}{2800} = 0.95 = 95\ \%$$

Avec : **Débit** : représente la production horaire de clinker en t/h.

Coefficient 0.6 : représente le taux de transformation de la farine crue en clinker.

Production : représente le cas idéal de fabrication du clinker en t/j.

Suite à cette performance, la production quotidienne du clinker devient alors :

$$\mathbf{2800 \times 0.95 = 2660\ t/j}$$

Pendant une année, la production du clinker est étalée sur 8.5 mois (255 jours), car il y a des arrêts du four suite à des stocks pleins ou à cause des opérations de la maintenance.

Par an, on obtient la production : $\mathbf{2660 \times 255 = 678\ 300\ t/an}$

Le coût de l'énergie thermique annuelle du four en 2015 est par la suite :

$$\mathbf{678\ 300 \times 105.66 = 71\ 669\ 178\ MAD/an}$$

5-2- Le gain économique en 2016 :

Calculons maintenant le gain obtenu après la réalisation des trois améliorations citées auparavant :

D'une consommation calorifique de 3380 MJ/T clinker en 2015, on a pu gagner 20 MJ/T clinker en 2016 pour obtenir une consommation ne dépassant pas 3360 MJ/T clinker :

Donc : **$20 \times 0.03126 = 0.6252$ MAD/T**

Et : **$0.6252 \times 678\,300 = 424\,073$ MAD/an**

D'où la nouvelle facture énergétique :

$71\,669\,178 - 424\,073 = 71\,245\,105$ MAD/an

En pourcentage, ce gain correspond à :

$$\alpha\,(\%) = \frac{424\,073}{71\,669\,178} = 0.59\ \%$$

6- VOLET ENVIRONNEMENTAL :

6-1- Introduction :

L'industrie cimentière est fortement émettrice de gaz à effet de serre (CO_2, NO_x), provenant des besoins en énergie thermique, mais aussi du procédé de fabrication du ciment.

Dans le domaine de l'industrie du ciment, la réduction des émissions polluantes est devenue une priorité, afin de satisfaire les normes mondiales, mais aussi comme un sérieux argument de vente. Diverses techniques sont appliquées aux fours de cimenterie, selon les solutions imaginées par les ingénieurs praticiens, cependant, une solution ne peut être efficace que si elle est appuyée par une bonne analyse qualitative et quantitative.

6-2- Cas de la cimenterie de Fès :

Certifiée ISO 14 001 et ISO 9 001, la cimenterie de Ras El Ma travaille dans le plus strict respect des exigences environnementales, notamment par la mise en place de systèmes de dépoussiérage performants, d'un réseau d'assainissement moderne et d'un dispositif renforcé de prévention et de lutte contre les incendies.

La gestion de l'environnement de l'usine est assurée par une équipe professionnelle qui s'appuie sur les outils suivants :

- Équipements de dépoussiérage et de protection de l'environnement.
- Appareillage de contrôle des émissions.
- Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de l'usine.
- Formation continue et sensibilisation des collaborateurs et des sous-traitants.

Le volet protection de l'environnement se matérialise également par l'installation d'équipements portant la capacité de traitement des déchets de 24 000 tonnes grâce aux technologies de traitement des déchets qui sont mises en place.

Les usines de ciment peuvent avoir, du point de vue de la gestion des déchets, un effet bénéfique sur l'environnement. Cette technologie et son procédé de fabrication s'adaptent bien à la réutilisation ou à la destruction d'un certain nombre de déchets, dont des déchets dangereux tel les déchets pharmaceutiques.

Les points d'émission de poussières dans la cimenterie sont :

- Les fours,
- Les refroidisseurs à clinker,
- Les broyeurs à ciment.

Les émissions fugitives de poussières sont principalement liées au stockage et à la manutention des matières premières, des combustibles et du clinker ainsi qu'à la circulation des véhicules sur le site de fabrication.

Les émissions atmosphériques conséquentes à l'exploitation de la cimenterie sont :

- Les gaz de combustion du four canalisés en cheminée ;
- L'air de ventilation des broyeurs et l'air ayant servi au transfert ou au refroidissement des produits rejetés en cheminées après filtration ;
- Des rejets non canalisés provenant emportés par le vent à partir des convoyeurs, du stockage des matières et produits, du combustible…

Pour l'usine Ras El Ma, les responsables sur l'environnement font des mesures en continu sur les émissions à la cheminée principale du four.

Les résultats sont représentés sur la figure 32 :

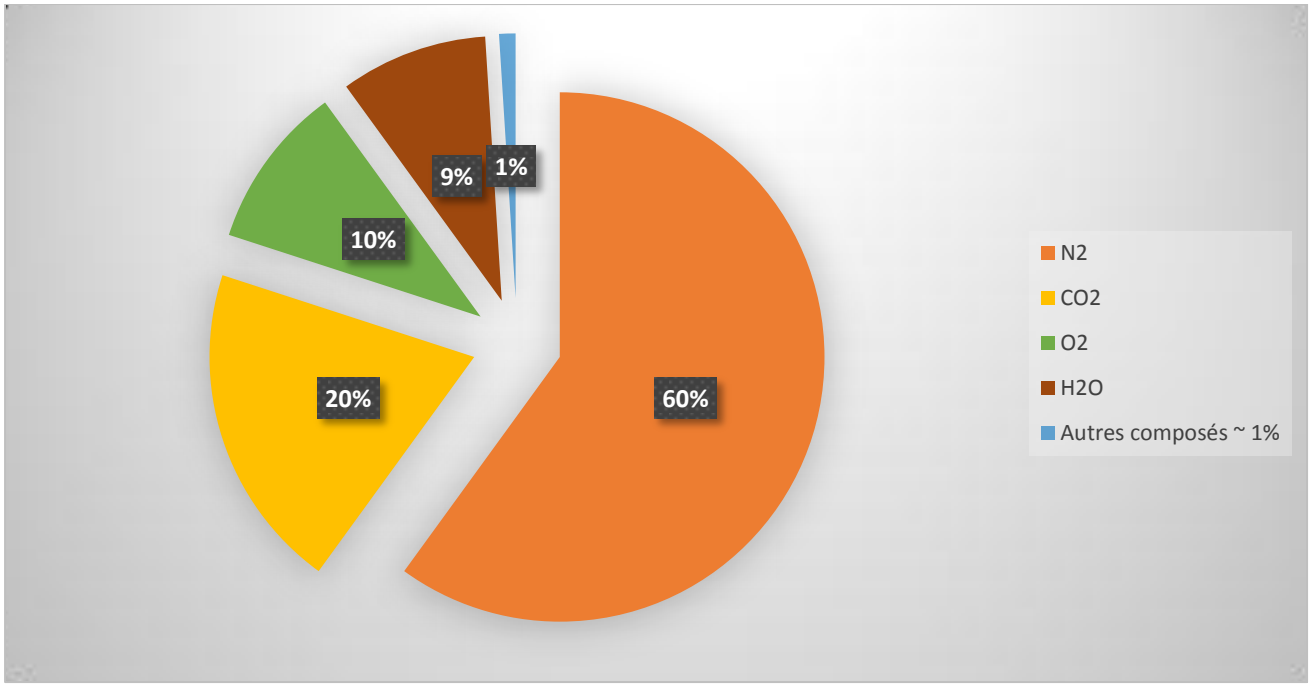

Figure 32 : Émissions des gaz de combustion à la cheminée principale

Les autres composés constituant un pourcentage proche de 1 % sont :

- Les NO_x.
- Le SO_2.
- Les Composés Organiques Volatiles (COV).
- Le monoxyde de carbone (CO).
- Les poussières.
- Les métaux lourds.

Les objectifs du contrôle des émissions pour la société Holcim sont :

- Eviter un impact négatif sur les êtres humains, animaux, plantes aussi bien que sur l'environnement.
- Se conformer aux limites locales d'émissions.
- Eviter une perte de crédibilité et de représentation en cas de fortes émissions.
- Eviter des réductions de production ou même des arrêts d'équipements pour dépassement des limites.
- Réduire les impacts négatifs sur les équipements dus à la corrosion (SO_2).
- Assurer que les métaux lourds contenus dans le ciment sont acceptables.

6-3- Les mesures prises pour maîtriser les émissions :

6-3-1- Les émissions de SO_2 :

Réduire les émissions de SO_2 pendant la fabrication du clinker avec des modifications du procédé :

- Eviter de volatiliser le soufre (marche en atmosphère oxydante).
- Favoriser la réaction entre le SO_2 et le calcaire ou d'autres composés qui peuvent capter du SO_2.

6-3-2- Les émissions de NO_x :

- Optimisation du procédé : améliorer la stabilité du processus car les formations de NO_x sont sensibles aux fluctuations de marche.
- Améliorer l'aptitude à la cuisson du cru.
- Utiliser des combustibles à haute teneur en matière volatile.
- Réduire l'atmosphère dans le calcinateur.
- Utiliser des combustibles à bas taux d'azote.

6-3-3- Les émissions de COV :

- Assurer une combustion complète, éviter un excès d'alimentation en combustible.
- Changer la composition de la farine crue dans l'optique de réduire les organiques.

6-3-4- Les émissions des métaux lourds :

- Contrôler les entrées (analyse des métaux lourds pour tout nouvel AFR).
- Analyser les poussières de filtre.
- Purger s'il y a un enrichissement de métaux lourds.

La cimenterie de Fès fait alors des progrès pour vaincre les défis qu'elle rencontre et suit les développements scientifique, technologique et environnemental du siècle.

Elle fait face à l'exigence du consommateur actuel, s'oppose à la concurrence internationale et améliore la qualité de ses produits tout en respectant l'environnement.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le présent travail, qui a pour objectif l'optimisation de l'énergie thermique dans le four de la cimenterie Holcim-Fès, a commencé par une analyse de la problématique du projet tout en décrivant les différents combustibles utilisés dans l'usine (le coke de pétrole + les grignons d'olive) et en définissant la formule de calcul de la consommation calorifique.

Le diagramme d'Ishikawa s'est avéré d'une grande utilité, puisqu'il a détecté les causes possibles ayant un impact sur la consommation d'énergie thermique.

Afin d'optimiser la consommation calorifique du four, nous nous sommes basés sur l'amélioration des paramètres suivants :

1) Les modules.
2) Le tirage du four.
3) La volatilisation du soufre.

● Concernant le premier paramètre, il fallait augmenter le pourcentage de la phase liquide et la fixer dans l'intervalle : $24.8\ \% < PL < 25.3\ \%$

● Pour le deuxième paramètre, nous avons réalisé une simulation sur le tableur EXCEL concernant la position des embouts d'air axial et d'air radial de la tuyère.

La simulation a donné les résultats suivants :

- Pour l'air axial : la diminution de la position de l'embout de 35 à 30.
- Pour l'air radial : l'augmentation de la position de l'embout de 20 à 35

● Pour le dernier paramètre, nous avons changé le type du combustible utilisé en remplaçant le coke de pétrole à haute teneur en soufre par un autre ayant une teneur moyenne.

Ces actions ont pu réellement diminuer la consommation calorifique de l'énergie thermique du four ce qui a donné par conséquent un gain au niveau de la facture énergétique arrivant à 424 073 MAD / an, constituant un pourcentage d'environ 0.6 %. Par conséquent, il y aura moins de gaz brulés.Ce stage m'a offert d'abord l'opportunité de se confronter avec le secteur industriel, en particulier l'industrie cimentière qui représente une part importante de l'économie nationale. Ensuite, ce projet de fin d'études m'a permis d'appliquer certaines connaissances théoriques, surtout en ce qui concerne les transferts thermiques d'une part et le management de l'entreprise d'une autre part. Finalement, ce stage m'a permis de m'intégrer avec l'ensemble du personnel de la société Holcim-Fès, ce qui m'a permis d'améliorer en moi l'esprit d'équipe de travail pour une meilleure communication afin de pouvoir trouver des solutions adéquates à la problématique de ce projet de fin d'études.

ANNEXE

1976	**L'ODI crée une société nouvelle dénommée Cimenterie de l'Oriental (CIOR) qui reprend les actifs de la CIMA avec pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.**
1979	Holcim Maroc, 30 ans au service de la construction du Maroc. AR mise en service dans l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.
1982	Installation à Casablanca d'un centre d'ensachage d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
1999	Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca. Mise en service d'un centre de broyage et d'ensachage à Nador. Mise en service des installations de valorisation de combustibles de substitution à l'usine de Fès Ras El Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador.
2002	Changement de l'identité visuelle : CIOR devient Holcim Maroc. Démarrage de la nouvelle activité granulats (Ben Slimane). Début des investissements relatifs à la rationalisation du dispositif industriel de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie d'Oujda.
2009	Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : BATIPRO Distribution. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settat et de la plateforme de traitement de déchets Ecoval.

Tableau 1 : Historique de la société Holcim Maroc

Date	Phase liquide en %	Consommation calorifique en KJ/Kg clinker
15,01,2016 18:00	23,9	3263,96
16,01,2016 20:00	23,9	3183,62
17,01,2016 22:00	24,1	3244,60
18,01,2016 00:00	24,2	3141,11
19,01,2016 02:00	24,3	3164,76
20,01,2016 04:00	24,3	3063,21
21,01,2016 06:00	24,1	3066,59
28,01,2016 06:00	24,6	3415,22
29,01,2016 08:00	23,9	2833,63
30,01,2016 10:00	24,4	2928,16
31,01,2016 12:00	24,5	2930,71

Tableau 2 : Variation de la consommation calorifique selon la phase liquide pour le mois de Janvier

BIBLIOGRAPHIE

{1} : Le Professeur Said HAOUACHE : Cours de transferts thermiques, LST, AU 2012/2013

Documents internes de l'entreprise

WEBOGRAPHIE :

{2} : http://www.holcim.co.ma/uploads/MA/fes.pdf

{3} : http://www.mssmat.ecp.fr/files/content/sites/mssmat/files/Personnel/jehelp/Cours2_Ciments-ppt.pdf

{4} : http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10981

{5} : http://www.adilca.com/combustion-carburants.pdf

{6} : file:///C:/Users/hp/Downloads/5385d5479a288.pdf

{7} : http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160504&id2=6

Stage effectué à : HOLCIM-FÈS

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: LAAZAAR Kaoutar

Année Universitaire : 2015/2016

Titre: L'optimisation de l'énergie thermique dans le four de la cimenterie Holcim-Fès.

Résumé

Face à une population mondiale et un développement croissants, les besoins en produits cimentiers pour la construction des bâtiments et des infrastructures sont considérables. Dans l'industrie cimentière, la diminution des coûts de la consommation calorifique est devenue une préoccupation majeure pour réduire la facture énergétique du processus de fabrication du ciment.

La production du clinker nécessite un combustible de pouvoir calorifique important pour une qualité acceptable mais avec moins de coûts supplémentaires.

L'objectif de ce travail est d'optimiser l'énergie thermique du four. Les résultats ont montré qu'un pourcentage de phase liquide compris entre 24.8 % et 25.3 %, et un réglage de la position des embouts de la tuyère ainsi qu'un changement du type de combustible, réduisent le taux de consommation calorifique. La réduction de la consommation calorifique a un impact positif sur l'environnement.

Mots clés : consommation calorifique, bilan énergétique, chaleur sensible, chaleur latente, énergie interne, enthalpie, diagramme d'Ishikawa, clinker, phase liquide, embouts, tuyère, volatilisation du soufre.

Abstract

Faced with a growing world population and development, the need for cement products for building construction and infrastructure are considerable. In the cement industry, cost reduction of the heat consumption has become a major concern to reduce the energy bill of the cement manufacturing process.

The clinker production requires a large heating value fuel to an acceptable quality but with less additional costs.

The objective of this work is to optimize the thermal energy of the furnace. The results showed that a percentage of liquid phase of between 24.8% and 25.3%, and adjusting the position of tips of the nozzle and a change in the type of fuel, reduce the heat consumption rate. Reducing calorie consumption has a positive impact on the environment.