

*Faculté des Sciences et Techniques de Fès*



*Département de Génie Industriel*



*LST de Génie Industriel*

## **Projet de Fin d'Etudes**

Optimisation de la consommation calorifique du  
four 2 de la ligne de cuisson de LAFARGE de  
MEKNES

**Lieu : LAFARGE DE MEKNES**

**Référence : 19/13GI**

**Préparé par :**

- Sadok Chaimae.

-El Attaoui Yousra.

**Soutenu le 10 Juin 2016 devant le jury composé de :**

- Pr S.Houache (Encadrant FST)

- Pr D. Sqalli (Examineur FST)

- Pr M.F. Gadi (Examineur)

- Ms Bouhou (Encadrant de l'entreprise)

# **DEDICACE**

*Nous dédions le fruit de ce modeste travail :*

## ***A nos très chers parents***

*Qui ont toujours été là pour nous, et qui nous a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous espérons qu'ils trouveront dans ce travail toute notre reconnaissance et tout notre Amour.*

## ***A nos frères et nos sœurs***

*Vous vous êtes dépensés pour nous sans compter, en reconnaissant tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour nous permettre d'atteindre cette étape de notre vie.*

## ***A nos enseignants***

*De l'école primaire jusqu'à l'université*

## ***A nos amis***

*On vous remercie de votre patience et de votre soutien*

## ***A nos camarades***

*De la faculté science et techniques pour les moments forts et agréables qu'on a passés Ensemble. A tous ceux qui sont proches de nos cœurs*

***Merci à tous***

## REMERCIEMENT

*Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant **Mr BOUHOU Mustapha** responsable du secteur cuisson pour tout le temps qu'ils nous ont consacré, leurs directives précieuses, et pour la qualité de leurs suivis durant toute la période de notre stage.*

*Nous remercions et nous exprimons notre reconnaissance à notre encadrant de la FST **Mr HOUACHE Saïd** pour ses conseils, ses remarques, sa disponibilité et son soutien tout au long de la période du stage.*

*Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble du personnel du secteur cuisson, et particulièrement, aux agents du service procédé, **M. JALAL Abdelhakim**, et **M. EL MANSOURI Hamid** pour leur chaleureux accueil, leur aide technique et son support moral, et pour leur amabilité à nous écouter et à répondre à nos questions chaque fois que nous les sollicitons.*

*Enfin, nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tout le cadre professoral et administratif de la FST Fès, ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I:PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET SON PROCESSUS DE FABRICATION	
1. Préambule.....	2
2. PRESENTATION DE L'USINE .....	2
2.1. Groupe LAFARGE .....	2
2.2. LAFARGE Maroc .....	4
3. Présentation de LAFARGE - Meknès.....	4
3.1. Historique .....	5
3.2. Implantation de Lafarge de Meknès.....	5
3.3. Les services de LAFARGE de Meknès.....	5
3.3.1. Service carrière .....	6
3.3.2. Service fabrication .....	6
3.3.3. Service électrique et régulation.....	6
3.3.4. Service commercial.....	6
3.3.5. Direction financière .....	6
3.3.6. Direction administrative.....	7
3.3.7. Service contrôle de qualité.....	7
3.3.8. Service procédé .....	8
3.3.9. Service sécurité .....	8
3.4. Organigramme.....	9
4. PROCESSUS DE FABRICATION .....	9
4.1. Définition de ciment.....	9
4.2. Différents types de ciments .....	11
4.3. Étapes de fabrication du ciment .....	12
4.3.1. Carrière .....	12
4.3.2. Concassage.....	12
4.3.2. Préparation de cru .....	13
4.3.3. Pré-homogénéisation.....	13
4.3.4. Broyage cru .....	14
4.3.5. Homogénéisation .....	14
4.3.6. Ligne de cuisson : .....	14
4.3.7. Broyeur cuit .....	17
4.3.8. Stockage et expédition (ensachage) :.....	18

5. CONCLUSION .....	18
<b>CHAPITRE II:LES OUTILS D’ANALYSE ET FORMULES DE CALCULS</b>	
1. INTRODUCTION.....	19
2. LES METHODES D’ANALYSE UTILISEE.....	19
2.1. Lean six sigmas .....	19
2.2. Méthode QQQQCP (Quoi, Qui, Où, Quand, Comment, Pourquoi).....	20
2.3. Le diagramme SIPOC : .....	21
2.4. diagramme Ishikawa (cause/effet) .....	22
3. RAPPELS THEORIQUES ENERGETIQUES ET FORMULES EMPERIQUES UTILISEES .....	22
3.1. formules theoriques thermiques .....	22
3.2. Rappel sur les pertes thermiques .....	23
3.3.1. Transfert thermique par convection .....	24
3.3.2. Transfert thermique par rayonnement .....	24
3.3.3. Transfert thermique par conduction .....	25
3.3. formules empériques utilisées .....	25
4. Conclusion.....	26
<b>CHAPITRE III: APPLICATION DE LA METHODE DMAIC SUR LA LIGNE DE CUISSON 2</b>	
1. PRESENTATION DU PROJET .....	27
1.1. Cahier des charges.....	27
1.2. Planification du projet .....	27
2. APPLICATION DE DMAIC SUR LA LIGNE DE CUISSON .....	28
2.1. Définition de problème.....	29
2.2. La Mesure de performance.....	39
2.2.1. Comparaison entre la consommation prévue et la consommation atteinte	30
2.3. Analyse des causes .....	33
2.3.1. Le soufflage du refroidisseur .....	33
2.3.2. Les Pertes thermiques .....	35
2.3.3. L’ Air Faux .....	36
2.3.4. Finesse du cru .....	38
2.4. Plan d’action.....	40
CONCLUSION GENERALE .....	42
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Logo de LAFARGE.....	2
Figure 2: Présence mondiale du groupe LAFARGE.....	3
Figure 3: équipement de protection individuel(EPI).....	8
Figure 4 : Organigramme de LAFARGE.....	9
Figure 5: Constitution du ciment.....	10
Figure 6: les types des ciments.....	11
Figure 7: la carrière .....	12
Figure 8: Extraction et transport de la matière première.....	12
Figure 9:le concasseur .....	12
Figure 10:De la carrière au pré-homo .....	13
Figure 11:le broyeur cru .....	14
Figure 12: la tour EVS .....	15
Figure 13:étapes de cuisson de la farine.....	15
Figure 14:le Four rotatif .....	16
Figure 15:Le diagramme d'Ishikawa .....	22
Figure 16 : La structure du four .....	24
Figure 17: Diagramme de Gantt.....	27
Figure18: histogramme de comparaison entre la consommation prévue et organiser .....	30
Figure19: Histogramme de la comparaison entre la production prévue et atteinte.....	31
Figure 20: les pourcentages des dépenses .....	32
Figure 21: diagramme cause effet .....	33
Figure 22: la température de la virole en fonction de la surface .....	37
Figure 23: l'Air faux dans la tour EVS .....	37
Figure 24:pourcentage des AF dans EVS .....	38
Figure 25:évolution de la finesse de cru >100 µm.....	39
Figure 26:Evolution de l'indice de finesse du cru dans le temps >200 µm.....	39
Figure 27: Effet de la hauteur lit clinker sur la température sortie clinker .....	41

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: évolution de LAFARGE Meknès .....	5
Tableau 2: composition du ciment .....	10
Tableau 3: Les types de ciments en pourcentage .....	11
Tableau 4: Les propriétés du four .....	16
Tableau 5: méthode QQQCP .....	28
Tableau 6: la méthode de SIPOC .....	29
Tableau 7: Consommation prévue et atteinte La figure suivante permet une illustration plus claire de la comparaison: .....	30
Tableau 8: les coûts de production variables .....	32
Tableau 9: Pertes totales de différentes surfaces .....	36
Tableau 10: pourcentage de AF dans la tour à cyclones .....	37

# INTRODUCTION GENERALE

Le progrès que connaît la fabrication du ciment vient accompagner l'évolution du domaine des travaux publics et de construction.

Cependant, l'économie de marché mondiale astreint les industriels à rester toujours plus compétitifs pour la survie de leurs activités. Ceci implique en partie de développer des moyens de production performants et économiquement fiables.

Pour produire le ciment qui est un produit de base élaborée, mais ayant pourtant un prix de vente assez faible, l'industrie cimentière a dû optimiser son processus de fabrication. Il s'agit d'un procédé de fabrication très consommateur d'énergie calorifique, surtout au niveau de la ligne de cuisson.

Dans ce contexte, notre projet traite le sujet d'optimisation de la consommation calorifique au niveau du four<sup>2</sup>. Il est nécessaire d'étudier tout d'abord le processus de fabrication du ciment afin de trouver toutes les principales causes de l'excès de consommation, et de suggérer des solutions pouvant atténuer ce problème.

Dans ce sens ce rapport est subdivisé en trois chapitres. Le premier est dédié à la présentation de l'entreprise et son processus de fabrication du ciment, le deuxième est consacré à un rappel sur les outils d'analyse utilisés, ainsi que les formules de calculs nécessaires au traitement. Enfin, le dernier chapitre porte sur le sujet de notre stage, en utilisant la méthode DMAIC qui a pour but d'organiser la recherche des causes d'instabilité de la consommation calorifique, elle repose sur la définition des principaux paramètres influant cette consommation d'une part, et de proposer des actions correctives ou préventives appropriées d'autre part.





# **CHAPITRE I**

---

## **PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET SON PROCESSUS DE FABRICATION**

## 1. PREAMBULE

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter l'organisme d'accueil qui est LAFARGE Meknes, après nous arborons à un aperçu sur le processus de fabrication du ciment.

## 2. PRESENTATION DE L'USINE



### 2.1. Groupe LAFARGE

Figure 1 :Logo de LAFARGE

**LAFARGE** est un groupe français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur, **suivi par Holcim** Il est présent dans quatre activités principales : béton et granulats, ciment, plâtre, toiture, et dans 75 pays. Son chiffre d'affaires, en 2006, s'est élevé à 16,9 milliards d'euros, dont 47 % dans le ciment, 33 % dans le béton et les granulats, 11 % dans le plâtre et 9 % dans les toitures. Le groupe emploie environ 90 000 personnes dans le monde.

L'industrie des matériaux de construction, dont le ciment constitue la matière de base, détient une place importante dans le secteur des industries de transformation, avec un pourcentage de 8,6% du total des entreprises du secteur industriel marocain.

L'industrie du ciment est ce qu'on appelle une industrie de base parce qu'elle se situe à la source du développement économique. De son principal dérivé, le béton, dépend tout l'équipement du pays : logements, écoles, ponts, barrages, routes...

C'est aussi une industrie lourde du fait qu'elle traite une grande masse des matières premières de faible valeur initiale, pour aboutir à un produit également d'un faible prix, mais dans des installations d'un coût élevé.

En vue d'assurer la régularité d'approvisionnement du marché national en ce produit de base, le ministère du commerce et de l'industrie a procédé, en 1990, à la libération du ciment.

La capacité totale du marché excède 9 millions et se répartit entre 11 usines couvrant tout le territoire national. Remarquons que le marché du ciment au Maroc est caractérisé par le poids des frais de transport qui grève les prix.

Cependant, la demande de ciment semble inélastique au prix et reste directement liée au développement de l'économie.

- ✓ **1833** : l'entreprise est fondée par Léon Pavin de Lafarge, par reprise d'une activité familiale lancée en **1749** ; l'usine exploite une carrière de pierre à chaux dans la montagne Saint-Victor dominant le Rhône entre Le Teil et Viviers, en Ardèche, en France.
- ✓ **1864** : Livraison de 11 000 tonnes de chaux pour le Canal de Suez ; c'est le premier chantier d'envergure internationale pour l'entreprise.
- ✓ **1919** : Transformation en SA sous le nom de "Société anonyme des chaux et ciments de Lafarge et du Teil".
- ✓ **1939** : Lafarge est le premier cimentier français

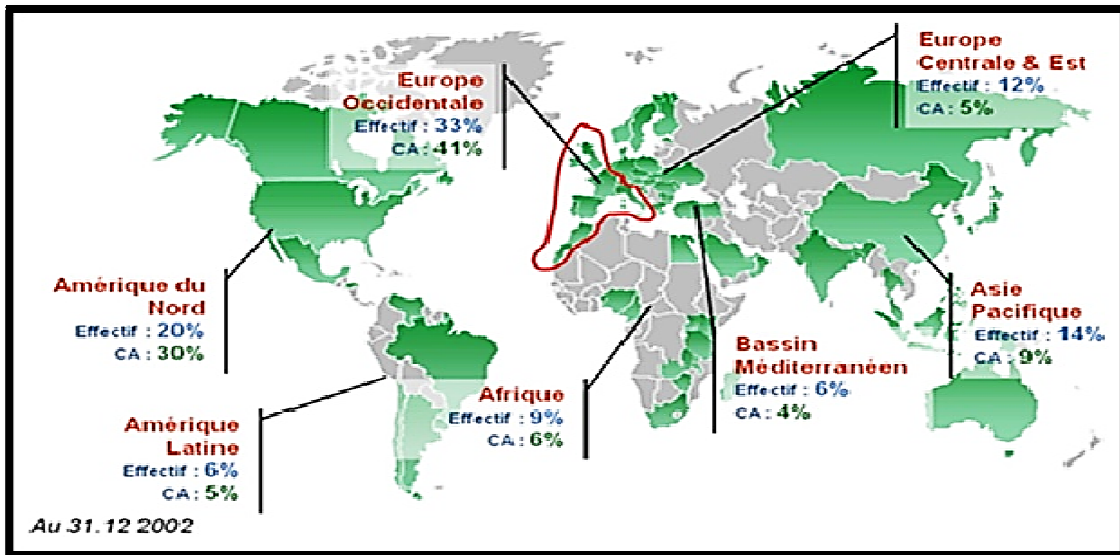


Figure 2 : Présence mondiale du groupe LAFARG

Le groupe Lafarge, dirigé par Bertrand Colomb, est le leader mondial des matériaux de construction. Il est en particulier le deuxième dans le marché mondial du ciment. Il est présent dans plus de soixante pays avec un effectif de 66 000 collaborateurs.

Présent au Maroc depuis 1913, Lafarge Maroc a bâti son leadership au fil des années pour devenir le leader national des matériaux de construction à travers ses 4 métiers : le ciment, les granulats et bétons, le plâtre et la chaux.

## **2.2. LAFARGE Maroc**

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

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

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

- Création d'une nouvelle usine à Agadir en 1952 avec une capacité de production de 60 000 T/ an.
- Démarrage de la cimenterie de Meknès en 1953 avec un nominal de production de 150 000 T/an.
- Dans le Nord du pays, deux unités ont vu le jour à Tanger en 1953 (60 000 tonnes / an) et à Tétouan en 1954 (86 000 T / an).

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

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

### 3. Présentation de LAFARGE - Meknès

#### 3.1. Historique

La cimenterie de Meknès se trouve au Nord-est de la ville à proximité immédiate de Hay Soussi et non loin de la route principale Meknès Fès.

Dénoté CADEM (Ciments Artificiels de Meknès), l'usine a démarré en **1953** avec une seule ligne de production à voie humide d'une capacité de 400 tonnes par jour.

#### 3.2. Implantation de Lafarge de Meknès

L'évolution de LAFARGE Meknès peut se résumer dans le tableau ci-dessous :

Année	Evénement
1971	Extension des capacités avec l'installation d'un nouveau four de 650 t/j et augmentation de la capacité broyage ciment à 650.000 t
1985	Conversion du procédé voie humide en voie sèche, tout en augmentant la capacité de production qui atteint 1500 tonnes par jour
1989	Installation d'un broyeur à ciment BK4.
1990	La capacité de production passe de 1500 à 1800 tonnes par jour, grâce à des modifications au niveau du pré-calciateur et du refroidisseur
1993	Nouvelle extension avec le démarrage d'une seconde ligne de cuisson d'une capacité de 1.200 t/j clinker

Tableau 1 : évolution de LAFARGE Meknès

#### 3.3. Les services de LAFARGE de Meknès

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

### **3.3.1. Service carrière**

Il permet l'approvisionnement des matières premières : Calcaire, Argile de la carrière. Celles-ci sont extraites sur un site à 5km de l'usine et sont concassées sur un concasseur de type HAZEMAG à marteau. Les matières sont ensuite acheminées vers l'usine par un tapis transporteur.

### **3.3.2. Service fabrication**

Les ateliers composant la fabrication du ciment (concassage de la matière première, pré-homogénéisation, broyage cru, cuisson, broyage cuit...) fonctionnent automatiquement. Leur suivi se fait à partir d'une salle de contrôle.

Le service fabrication est donc composé de chefs de postes, d'opérateurs et de rondiers qui assurent la production 24h/24h.

### **3.3.3. Service électrique et régulation**

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

### **3.3.4. Service commercial**

Ce service est le plus mouvant car il permet de fixer les objectifs de vente de ciment sur une clientèle bien identifiée

Leur travail se base sur la réception des bons de commande et des effets de commerce, la saisie des commandes et des bons de livraison.

### **3.3.5. Direction financière**

#### **a. Comptabilité générale**

Le service comptabilité générale s'occupe de tous les projets d'investissement quelle que soit leur nature, car pour tous les achats et les approvisionnements, des commandes sont établies et



présentées à la section « fournisseurs d'exploitation », qui s'occupe d'établir ces commandes par l'envoi d'une facture préforma.

Les fournisseurs avisent la société de leur possession des produits demandés, les bons de commandes sont préparés par le bureau du service achat et rapatrié ultérieurement au service de la comptabilité fournisseurs afin de vérifier la conformité de la marchandise et d'enregistrer et classer les bons de commande.

b. Trésorerie

La direction commerciale envoie à la trésorerie l'ensemble des effets de commerce qu'elle reçoit auprès de ses clients. Chaque encaissement est matérialisé par une pièce interne appelée ordre de recette, et toutes les pièces réunies du dossier sont inscrites sur un registre de trésorerie.

### **3.3.6. Direction administrative**

Ce bureau s'occupe de la gestion du personnel pour répondre à un ensemble d'objectifs:

- Ajuster l'effectif des employés de façon à réaliser les objectifs fixés.
- Motiver le personnel pour une organisation du travail au sein de l'entreprise.

### **3.3.7. Service contrôle de qualité**

LAFARGE CEMENTS usine de Meknès est dotée d'un laboratoire équipé de tous les équipements nécessaires à la réalisation des contrôles, depuis la réception des matières premières jusqu'aux expéditions du produit fini, et ce conformément aux normes en vigueur et aux besoins de la clientèle. Le personnel de ce laboratoire ayant en charge le contrôle de la qualité est compétent, et suit des formations continues en matière de contrôle de qualité et selon un planning de formation préétabli.

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

### **3.3.8. Service procédé**

Le service procédé est un service qui s'intéresse aux différents procédés s'effectuant au sein de l'usine. Il contrôle en collaboration avec les services de fabrication et de qualité le

processus de fabrication du ciment, aussi cherche-t-il à optimiser les paramètres de réglage de différentes installations (cuisson, broyage...).

En effet des audits et des tests de performance se réalisent systématiquement dans le but d'améliorer le rendement des unités de production.

### 3.3.9. Service sécurité

Il est le moteur pour la réalisation et l'encadrement de l'effectif de l'usine pour produire un ciment avec un objectif de zéro accident. Il a pour mission l'animation de la sécurité, le soutien de la hiérarchie en matière de sécurité, l'animation d'un comité de sécurité usine, instauration des procédures de sécurité, le reporting sécurité et la gestion du réseau sécurité inter usines (figure 3).

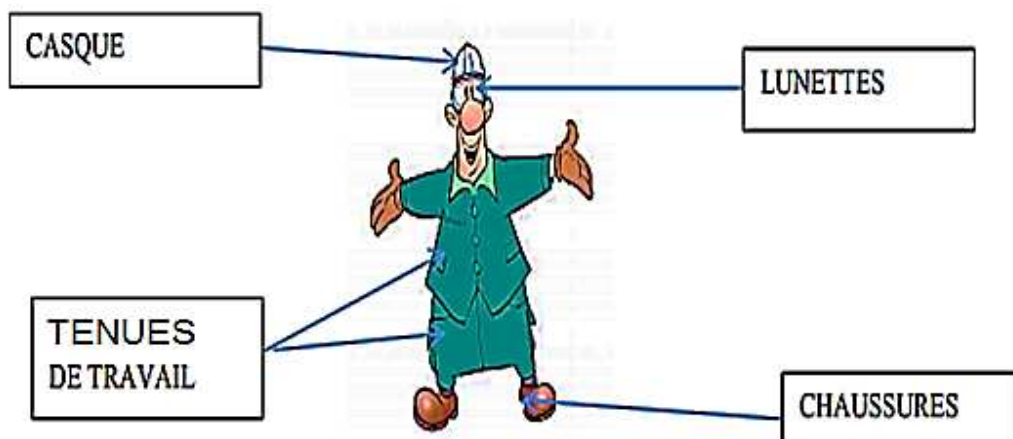


Figure 1:équipement de protection individuel(EPI)

### 3.4. Organigramme

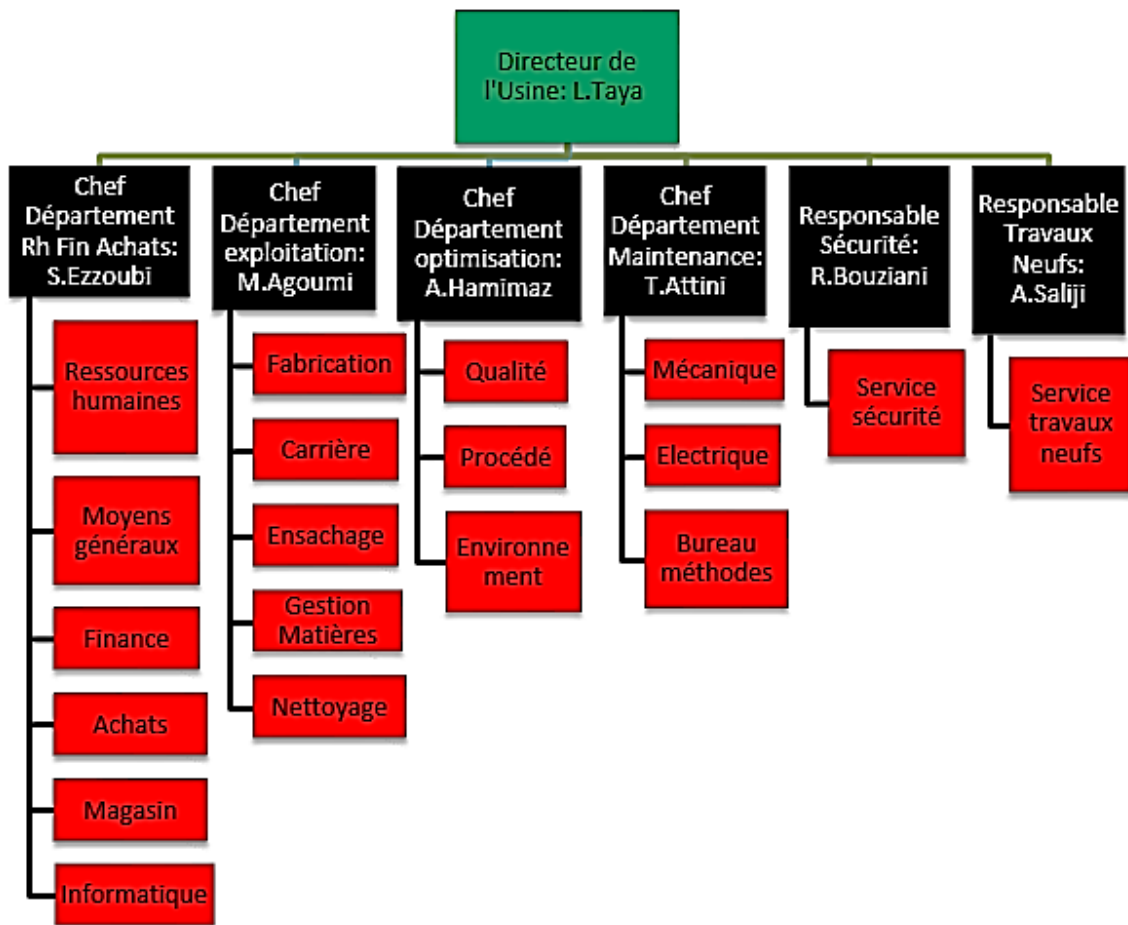


Figure 2 : Organigramme de LAFARGE

## 4. PROCESSUS DE FABRICATION

### 4.1. Définition de ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué d'une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenu par broyage et cuisson à 1450 °C d'un mélange de calcaire et d'argile. Le produit de la cuisson, appelé clinker, forme une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique (Tableaux 2).

Le ciment résulte du broyage de clinker et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse. Il forme avec l'eau une pâte plastique faisant prise et durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, notamment sous l'eau.

Les constituants anhydres, présents sous forme de cristaux polygonaux assez réguliers et homogènes, se combinent à l'eau et se décomposent. En s'hydratant, ils recristallisent, prenant des formes très variées : Aiguilles, bâtonnet, prismes, divers...etc.

Nom	Symbole chimique	Notation cimentière	Masse molaire
Oxyde de calcium ou chaux vive	CaO	C	56
oxyde de silice ou silice	SiO <sub>2</sub>	S	60
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	160
oxyde d'aluminium	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	102

Tableau 2 : composition du ciment

Ces cristaux adhèrent aux adjuvants granuleux du béton : sable, gravier, cailloux.... C'est l'hydratation qui constitue le ciment

La figure ci dessus (Figure5) résume les éléments qui entrent dans la constitution du Ciment.

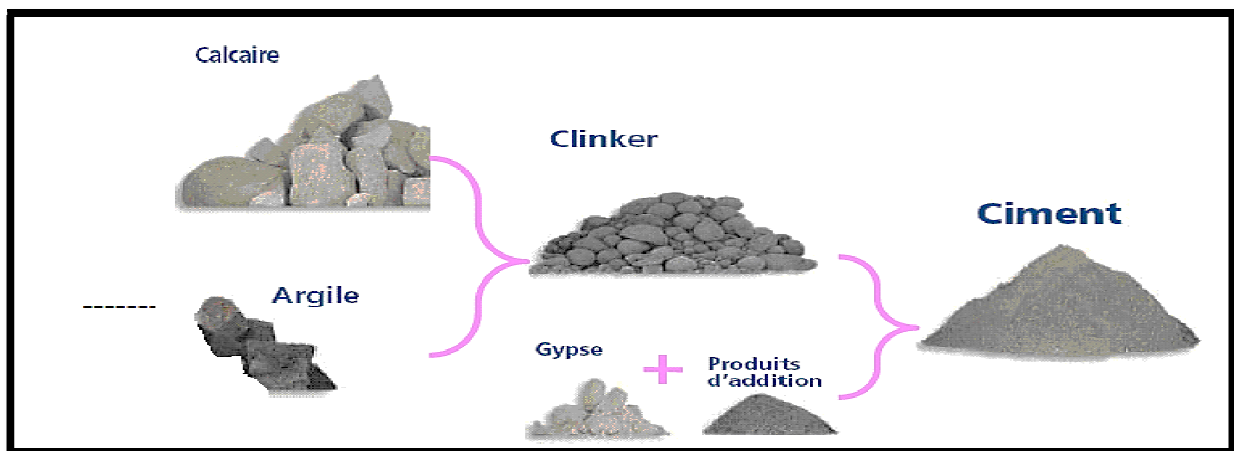


Figure 5: Constitution du ciment

## 4.2. Différents types de ciments

LAFARGE MAROC s'intéresse à la fabrication des trois catégories de ciments, à savoir : CPJ35, CPJ45 et CPA55 (figure 6).

Concernant le ciment blanc, le groupe l'importe sous forme de matière cuite (clinker) pour être broyé et mit en sacs en vue de son expédition

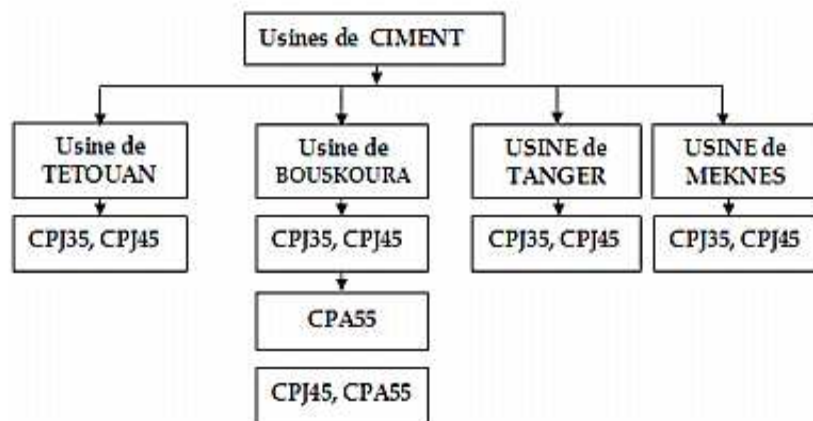


Figure 6 : les types des ciments

Ciments	CPJ35	CPJ45	CPJ55
Compositions			

En outre, les trois types de ciments (CPJ35,

CPJ45, CPA55) se différencient selon des pourcentages précis des ajouts au clinker (Tableau 3).

Calcaire	35.60%	24.00%	0.00%
Cendres volantes	3.21%	6.52%	0.00%
Gypse	2.80%	3.14%	5.64%
Clinker	58.39%	66.34%	94.36%

Tableau 3 :  
Les

types de ciments en pourcentage

### 4.3. Étapes de fabrication du ciment

Avant d'obtenir du ciment, la matière première passe par diverses étapes de transformation physico-chimiques de l'extraction jusqu'à l'expédition.[2]

#### 4.3.1. Carrière

LAFARGE ciments Meknès exploite une carrière qui fournit deux matières premières : le calcaire et le schiste (figure 7).



L'extraction de ces roches se fait par abattage à l'explosif, Il consiste à fragmenter le massif exploité à l'aide d'explosifs

- Concassage
- Préparation du cru
- Cuisson de la farine
- Broyage du clinker
- Ensachage

Figure 3: la carrière



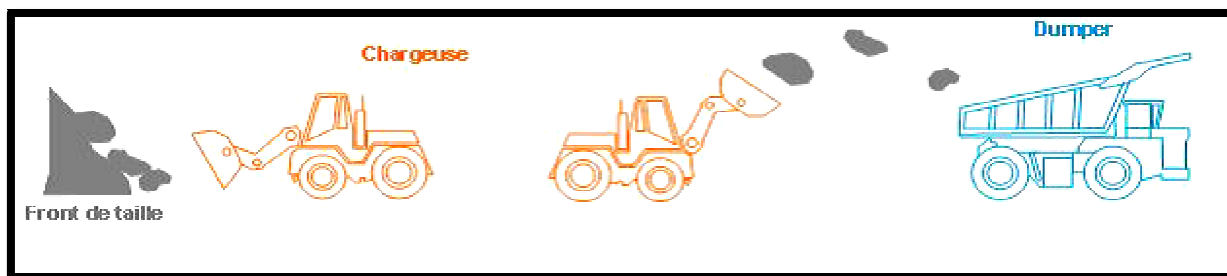
### 4.3.2. Concassage

Lafarge est équipée d'une installation de criblage et concassage (figure 9) de matières premières ayant un débit horaire de 500 tonnes par heure. Les blocs de calcaire extraits peuvent atteindre

3m de volume, ils sont concassés et ramènés à des dimensions inférieures à 120 mm, le tout venant d'être concassé, est acheminé du concasseur jusqu'à l'usine par une bande transporteuse.

Figure 9 : le concasseur

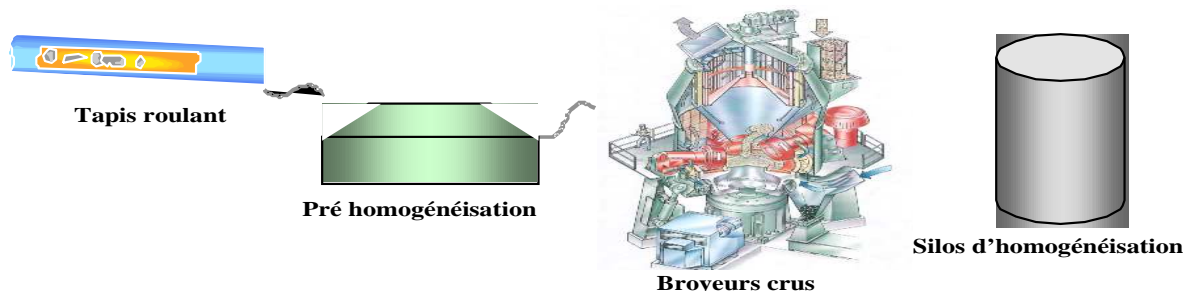
Ce transporteur est le plus long convoyeur dans l'Afrique avec un seul moteur à bagues



de 5500V et de démarrage par élimination des résistances rétorquent.

### 4.3.3. Préparation de cru

Pour déterminer la classe de qualité de la matière première, l'usine de Meknès est équipée d'une tour d'échantillonnage de type ITECA à 4 étages, constituée de trois coupeurs, qui dévient une partie du flux vers le circuit de la tour, puis de deux concasseurs pour réduire la granulométrie de la matière échantillonnée, cette tour permet d'obtenir en continu un échantillon de 800g de matière prélevée à la sortie du coupeur tertiaire pour chaque lot de 1500 tonne.



#### 4.3.4. Pré-homogénéisation

La Pré homogénéisation constitue un mode de stockage qui permet de construire un tas de matière pré dose à partir des différentes matières concassées. Son objectif principal est d'avoir un stock aussi régulier que possible à la reprise. L'usine dispose actuellement de deux pré-homos polaires à chevrons, de capacité 2\*18 000 tonnes chacun.

#### 4.3.5. Broyage cru

Le cru est réduit en poudre (farine) dans deux broyeurs verticaux, avant le broyage de la matière, on procède souvent à des ajouts en constituants secondaires (schiste, minerai de fer...), à travers des trémies entrée broyeur et ce pour régler les trois indices ( $\Delta BC$ , MS, A/F). La matière et les ajouts passent ensuite dans un atelier broyage dont l'objectif est d'atteindre la finesse souhaitée. L'usine de Meknès dispose de deux broyeurs crus verticaux à trois galets (figure 11), la capacité nominale de broyage est de 2 \* 120 t/h, au cours du broyage, le cru est sèche à une humidité de 0,6% par les gaz chauds en provenance de la tour de préchauffage.



Figure 11:le broyeur cru

#### 4.3.6. Homogénéisation

Deux tours d'homogénéisation assurent le mélange et le stockage de la farine avant cuisson, la farine est acheminée au silo d'homogénéisation par des aéroglisseurs, le silo de la ligne 1 a une capacité de 8000 tonnes, alors que celle de la ligne 2 est de 7000 tonne, les deux silos sont de types IBAU, à fond conique de sommet dirigé vers le haut, ce type de silo assure à la fois le stockage et l'homogénéisation de la farine. L'extraction de la farine se fait de trois points, et ce d'une manière cyclique.

#### 4.3.7. Ligne de cuisson :

Nous entendons par cuisson, le processus de transformation de la matière crue en clinker par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes, conduisant à l'élimination presque totale de chaux non combinée. En fait c'est la partie du processus qui nous intéresse.

La ligne de cuisson est constituée de :

- Une tour à cyclones
- Un four rotatif
- Un refroidisseur

a. Tour à cyclones :

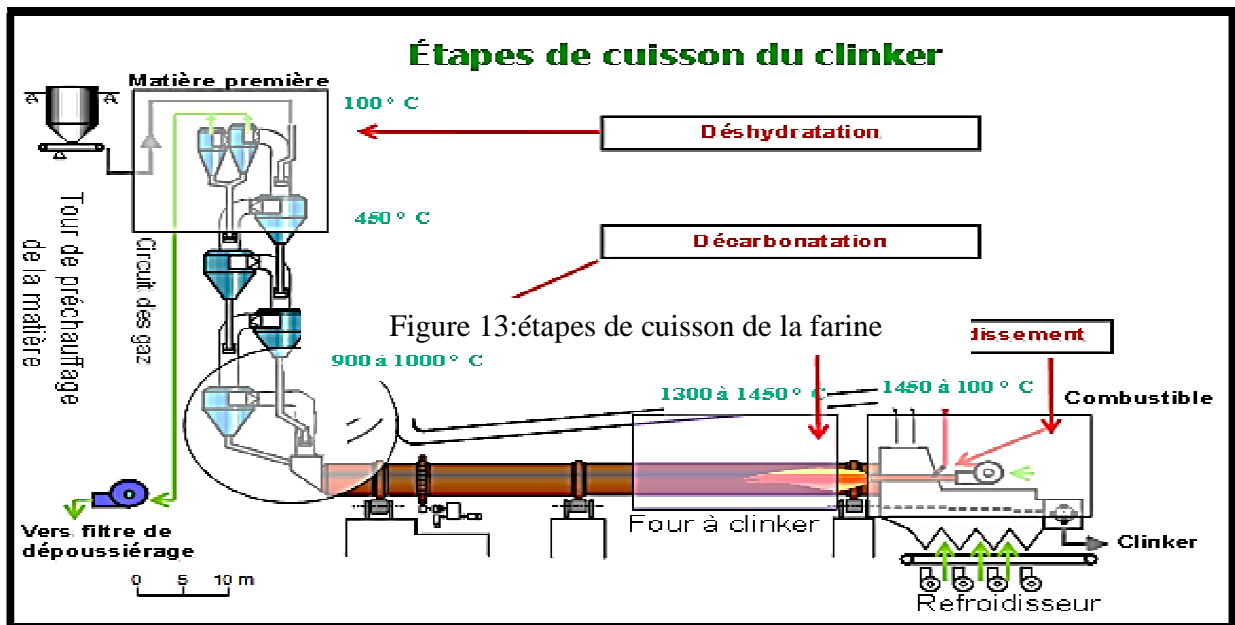
Elle est appelée aussi la tour EVS (Echange à Voie Sèche). C'est un échangeur de chaleur à voie sèche constituée de cinq étages et contenant quatre cyclones et pré-calcinateur (pour le four1). Elle permet d'effectuer un échange thermique à contre-courant entre les gaz chauds (850°C) sortant du four, et la farine froide (50 à 60°C).



Figure 12: la tour EVS

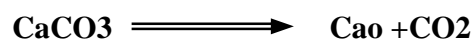
Les gaz parcourent l'édifice de bas en haut, alors que la matière le parcourt en sens inverse (figure 12).

Les granules du cru humide passent dans une grille mobile (grille LEPOL), qui les fait progresser jusqu'au four, la grille LEPOL divisée en deux chambres : la première pour le séchage et le deuxième pour la décarbonatation.



### - La décarbonatation

Le cru étant séché, il s'échauffe sans grande réaction chimique jusqu'à une température de l'ordre de 950 °C où intervient la décarbonatation de la phase calcaire :



De cette réaction endothermique résulte la formation de CaO naissante indispensable pour la formation des différentes phases du clinker.

### b. Four rotatif

Figure14:le  
Les  
du four sont  
le tableau ci -



Four rotatif  
caractéristiques  
indiquées dans  
dessous

	Longueur (m)			capacité (t/j)
<b>Four 1</b>	96	3,75	3	<b>1800</b>
<b>Four 2</b>	64	4	3	<b>1200</b>

Tableau 4 :Les propriétés du four

Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four rotatif vers la partie basse à la rencontre de la flamme. Cette source de chaleur est alimentée au charbon broyé, fuel lourd, gaz, ou encore en partie avec des combustibles de substitution provenant d'autres industries, tels que le coke de pétrole, les pneus usagés, les farines animales, les huiles usagées.

Les réactions qui se passent dans le four rotatif sont : la décarbonatation en phase finale et la clinkérisation.

- **La clinkérisation :**

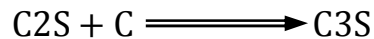
A la sortie de grille LEPOL, la farine dans un four rotatif de longueur L=41m et de diamètre D=3m, où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation, l'alimentation en farine est située à l'extrémité opposée au brûleur, la rotation et l'inclinaison du four de 5° font progresser la

matière, la clinkérisation commence vers 1200 °C pour culminer à 1450 °C, nous y distinguerons deux grandes étapes :

- Les combinaisons avec formation de phase liquide.
- Reactions à d'état sol.

c. Le refroidissement

Le silicate tricalcique C3S est un composé métastable qui peut se décomposer en C2S et C :



Cette décomposition qui nuit aux propriétés hydrauliques du clinker est évitée par un refroidissement rapide du clinker. Plusieurs refroidisseurs peuvent être envisagés :

- Refroidisseurs rotatifs.
- Refroidisseurs planétaires.
- La grille de refroidisseur

#### **4.3.8. Broyeur cuit**

Le clinker est broyé dans un broyeur à boulet avec des matières d'ajouts, qui sont le calcaire et le gypse qui est un régulateur de prise. Le broyeur à boulets est constitué de:

- Le premier compartiment : sert au concassage de la matière après 5000h de travail on trie les boulets
- Le deuxième compartiment : sert à la finesse de la matière, plus le temps de séjour est long plus le rendement est élevé après chaque 10000h de travail on trie les boulets ;
- Blindage (fond d'entrée, blindage 1er compartiment, cloison double, blindage 2ème compartiment et fond de sortie) ;
- Charge bruyante : ce sont les boulets qui sont de diamètre de 60 à 90 mm pour le premier compartiment (C1) et de 15 à 25 mm pour le deuxième (C2).

L'atelier de broyage de l'usine est équipé de 3 broyeurs à boulets nommés BK3, BK4 et BK5

#### **4.3.9. Stockage et expédition (ensachage) :**

Le ciment est expédié par des pompes à vis (de marque FULLER) à l'aide des compresseurs d'air vers des silos de stockage du produit fini.

Usine de MEKNES dispose de 2 silos d'environ 5000 tonnes chacun, et 4 silos de 1800 tonnes chacun.

La capacité de stockage totale est d'environ 18000 tonnes de ciment, pour la mise en sacs du ciment, LAFARGE dispose de trois Ensacheuses rotatives « HAVER » ayant chacun débit de 100 T/h et trois Ensacheuse en ligne « BATE » d'un débit de ;50 T/h chacune.

## 5. CONCLUSION

Nous concluons que ce chapitre forme un point de départ de notre projet de fin d'études, vu qu'il présente un aperçu sur l'organisme d'accueil comme première partie, ensuite une deuxième partie a été consacrée au processus de fabrication du ciment, ce qui nous permet d'acquérir les concepts de base de la production afin d'élaborer un travail approprié répond au cahier des charges, pour ce faire nous aborderons dans le chapitre suivant les outils à employer dans l'élaboration de la méthode d'analyse de la problématique.

## **CHAPITRE II**

---

# **LES OUTILS D'ANALYSE ET FORMULES DE CALCULS**

## 1. INTRODUCTION

Dans le but de mieux répondre à notre problématique, il s'avère important de révéler les méthodes d'analyse à utiliser ainsi que les formules de calculs, formants l'objectif de ce chapitre.

## 2. LES METHODES D'ANALYSES UTILISEES

### 2.1. Lean six sigmas

Le Lean Manufacturing est souvent associé à d'autres concepts d'amélioration de la qualité comme le six sigma. On l'appelle alors le Lean Six Sigma (LSS).

IL faut bien distinguer les deux concepts :

- Le Lean Manufacturing est un système, un ensemble d'éléments incluant les outils précédemment cités.
- Le Six Sigma est un outil pour améliorer un processus de production, logistique ou de développement, afin que le résultat soit toujours prévisible et identique selon certains critères (spécification).

Le six Sigma a été initié dans les années 80 par Motorola, et a été amélioré par General Electric, dans les années 90. C'est une méthode pour réduire les variations au sein d'un processus. C'est donc un outil d'amélioration continue, au même titre que le Kaizen par exemple. On peut donc aisément l'associer au Lean Manufacturing, et l'intégrer dans les outils de la boîte Lean Six Sigma (LSS).

Le principe est vraiment similaire au Lean Manufacturing, puisqu'il consiste à faire bien du premier coup, en éliminant les retouches, les rebuts et recyclages inutiles. C'est un outil de chasse aux gaspillages.

Le six Sigma est une méthode statistique qui s'assure que tous les paramètres caractérisant un processus soient toujours compris dans un intervalle de moins de six sigma par rapport à la moyenne de ces paramètres. Le but est donc de réduire la variabilité des paramètres d'un processus, donc du processus et par conséquent du produit ou service résultant de ce processus, pour livrer au client un produit ou service conforme à ses attentes spécifiques.

Les six sigmas s'appuient sur la méthode en cinq étapes, **la DMAIC** :

- **Définir**: quel est l'objectif ? Comprendre le problème. Identifier les paramètres critiques pour le client.

- **Mesurer:** Mesurer les paramètres critiques, les capacités du processus; évaluer le système de mesure.
- **Analyser:** Quelles sont les causes profondes ? Analyses des paramètres critiques.
- **Innover:** Améliorer, Optimiser les processus, mettre en place les changements.
- **Contrôler:** Vérifier, mesurer selon un plan défini les paramètres critiques, pour garantir une performance durable

En résumé, le six sigma est un outil supplémentaire d'amélioration continue, très puissant, que l'on peut ajouter à la liste des outils utiles de la boîte à outils Lean. [7]

## 2.2. Méthode QQQQCP (Quoi, Qui, Où, Quand, Comment, Pourquoi)

Le QQQQCP est un outil de questionnement qui se pratique en groupe de travail. Il permet de caractériser une situation en la décrivant selon un «angle» bien défini, en fonction du but recherché. Utiliser toutes les informations disponibles afin de répondre aux questions :

- Qui ?**
- Qui est concerné : responsables, acteurs,
  - Quels sont les personnes, services et sites concernés par la situation ?
    - Qui est acteur, responsable ?
    - Quelle est la fonction impliquée ?
- Quoi ?**
- De Quoi s'agit-il : objet, méthodes, opérations, ...
  - Quels sont les éléments, actions, opérations qui caractérisent la situation ?
    - Qu'est-ce que c'est ?
    - Que fait-on ?
- Où ?**
- Où le problème apparaît-il : service, atelier, processus, ...
    - Où se passe la situation, à quel endroit ?
      - Dans quel milieu ?
    - A l'arrêt, pendant un déplacement, un transport ?
    - Dans quel service, à quel poste de travail ?
- Quand ?**
- Date, durée, fréquence, planning, ...
  - Quand se passe la situation : date, mois, jour, poste, ... ?
  - Quelle est sa fréquence, à quel moment se produit-il ?



- Depuis quand le problème a-t-il été découvert ?
- Comment ?**
  - Moyens, matériels, procédure, manière, ...
    - Comment se déroule la situation ?
  - De quelle manière : procédures, instructions, modalités ?
    - Avec quel outillage, quelle machine ?
- Pourquoi ?**
  - A chaque question, se demander pourquoi ?
    - Pourquoi réaliser telle action ?
    - Pourquoi respecter telle procédure. [1]

### 2.3. Le diagramme SIPOC :

Le diagramme SIPOC est un outil de visualisation permettant de créer une cartographie en identifiant tous les éléments pertinents associés à un processus P, en définissant:

- Les fournisseurs (*Suppliers*) : Les personnes ou groupes qui fournissent tout ce qui est transformé au cours du processus (informations, formulaires, matériels)
- Les entrées (*Inputs*) : Les informations ou les matériels utilisés (matières premières)
- Le processus (*Process*) : Les différentes étapes du processus
- Les sorties (*Outputs*) : Le produit, le service ou les informations fournies au client
- Les clients (*Customers*) : L'étape suivante dans le processus ou le client final.

Ce diagramme est un outil qui suit les flux du processus depuis l'intégration d'un entrant jusqu'à la génération d'un extrant. Il permet ainsi, de se concentrer sur l'optimisation du processus en entier et pas uniquement sur des éléments pris de façon individuelle. Le SIPOC se présente sous la forme d'un schéma, de type tableau.[5]

### 2.4. Diagramme Ishikawa (cause/effet)

Le diagramme causes/effet (appelé aussi diagramme d'Ishikawa ou arête de poisson) se pratique en groupe de travail. Il consiste à classer par famille les causes susceptibles d'être à l'origine.

Le diagramme d'Ishikawa (ou diagramme en arête de poisson, diagramme cause-effet ou 5M) permet de limiter l'oubli des causes et de fournir des éléments pour l'étude des

solutions. Cette méthode permet d’agir sur les causes pour corriger les défauts et donner des solutions en employant des actions correctives. [1]

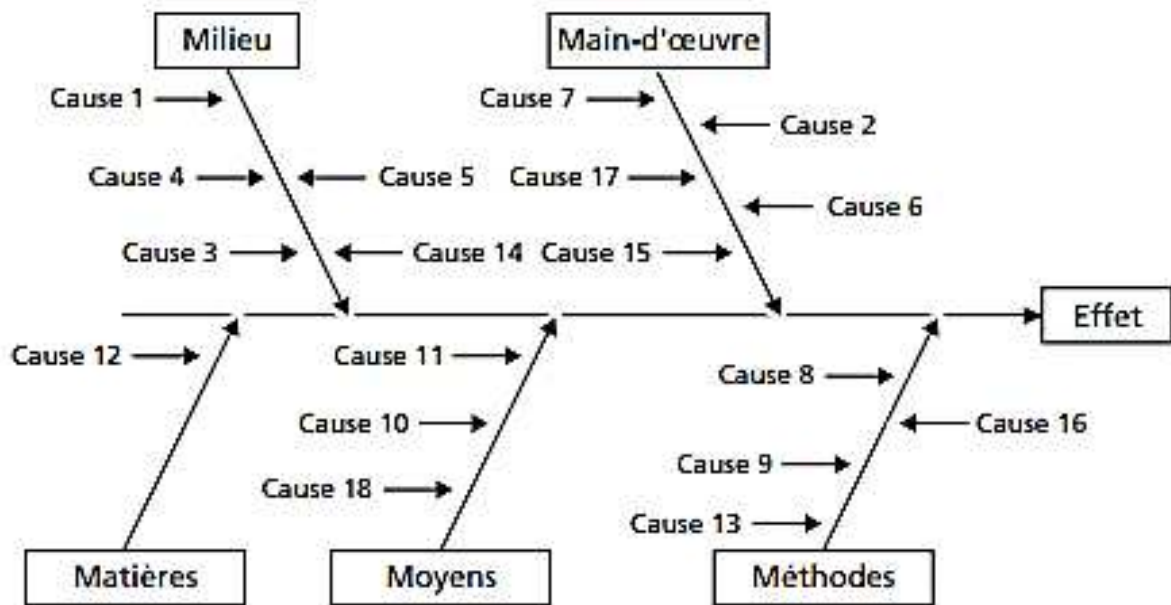


Figure 15 :Le diagramme d'Ishikawa

### 3. RAPPELS THEORIQUES ENERGETIQUES ET FORMULES EMPIRIQUES UTILISEES

#### 3.1. Formules théoriques thermodynamique

- **Définition d'enthalpie  $H(T, P)$  :**

Sa différentielle est égale :

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right) dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right) dP = \delta Q + VdP$$

Si la pression est constante :

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT = \delta Q_P$$

Pour n moles :

$$\delta Q_P = n C_{Pm} dT$$

D' où :

$$\Delta H = Q_P - n C_{Pm} \Delta T$$

Avec  $C_{pm}$  : la capacité thermique a pression constante.

- **Formule de calcul des flux d'énergie thermique :**

$$\phi = \frac{m}{t} * c * \Delta T$$

Avec :

- m : la masse
- t : le temps
- C : la capacité calorifique
- $\Delta T$  : la différence de température entre la sortie et l'entrée.

Pour le calcul du bilan thermique il faut :

$$\sum \phi_{entrée} = \sum \phi_{sortie} + \text{Pertes thermiques}$$

### 3.2. Rappel sur les pertes thermiques :

Le four est un tube enveloppé par une virole réalisée par une tôle en acier roulée de forte épaisseur 25 à 40 mm (figure 16).

Elle est protégée intérieurement par revêtement réfractaire dont la qualité est adaptée tout au long du four aux températures matières et gaz afin d'assurer une bonne isolation et d'assurer une protection thermique. Toute usure de ce revêtement causera des pertes de l'énergie calorifique à travers les parois du four.[4]

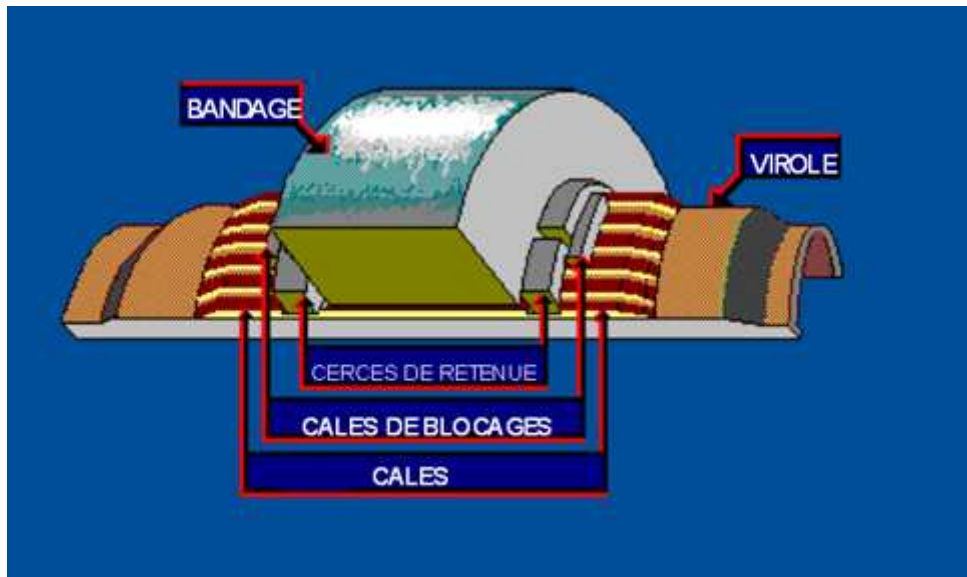


Figure16 : La structure du four

### Transfert thermique par convection :

Il s'agit ici, d'une paroi en contact avec un fluide en mouvement. Le transfert thermique se fait donc, par convection. Le flux thermique est exprimé par la relation suivante :

$$\phi = S * h * (T(\text{paroi}) - T(\text{fluide}))$$

Avec :

- h : coefficient de convection et S : Surface d'échange. [6]

### Transfert thermique par rayonnement :

Un corps de température T1 et de surface s placé dans une enceinte de température T2 de température S échange avec celle-ci le flux. [6]

$$\phi = S * \varepsilon * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

- Avec : -  $\varepsilon$ : coefficient d'émissivité -  $\sigma$ : constante de Boltzmann

Cette formule est utilisée lorsque la surface  $s$  est négligeable devant  $S$ .

### Transfert thermique par conduction :

L'énergie se propage au sein d'un même corps ou passe d'un corps à un autre sous l'influence d'un gradient de température [6]

$$\phi = -\lambda * S * dT/dx$$

Avec :

- $S$  : la surface d'échange
- $\lambda$  : conductivité thermique du matériau
- $d_T$  : différence de température

### 3.3. Formules empiriques utilisées

Les formules utilisées dans cette partie sont empiriques et elles sont fournies par le service procédé de LAFARGE Meknès. [8]

Formule de calcul de la consommation calorifique

$$CC = \frac{pci\ fuel * débit\ fuel + PCI\ coke * débit\ coke + PCI\ pneus * débit\ pneus}{débit\ clinker}$$

PCI coke = 8200 kcal /kg      -PCI pneus = 7000 kcal /kg      -PCI fuel = 9600 kcal /kg.

- **La formule du rendement de four :**

$$\text{rendement du four} = \frac{\text{débit clinker}}{\text{débit farine}} = 0.54$$

Avec :

- Débit clinker = 45625 kg/h
- Débit farine = 84490 kg/h
- **Formule de calcul de ratio de soufflage :**

$$R = \frac{\text{débit d' air soufflé}}{\text{débit clinker}}$$

- **Formule de calcul de rendement de récupération :**

$$\mu = \frac{H_{as}}{H_k + (Q_{as} * H_{ca}) / Q_{ca}} * 100$$

Avec :

- $H_{as}$  : enthalpie d'air secondaire.

- $H_k$  : enthalpie du kk sortie du four.

- $H_{ca}$  : enthalpie d'air soufflé par le ventilateur

- $Q_{as}$  : volume d'air secondaire

- $Q_{ca}$  : volume d'air soufflé par le ventilateur.

- **Formule de calcul de facteur de récupération :**

$$K = \frac{-\log(1 - \mu)}{Q_{as}}$$

- **Formule de calcul de pourcentage d'air faux :**

$$V = 100 * \frac{[(\%O2 \text{ sortieEVS} - \%O2 \text{ entréeEVS})]}{(20.2 - \%O2 \text{ entréefour})}$$

**Remarque :**

1 Unites thermiques =0,252 kilocalories

#### 4. Conclusion

Après avoir déterminé les méthodes d'analyses de la problématique, ainsi que les outils de calculs, nous entament dans le chapitre suivant l'application de la méthode DMAIC dans la résolution da la problématique.



## **CHAPITRE III**

---

# **APPLICATION DE LA METHODE DMAIC SUR LA LIGNE DE CUISSON**



# 1. PRESENTATION DU PROJET

## 1.1. Cahier des charges

L'usine se compose de deux lignes de cuisson, l'une est équipée d'un pré-calcinateur et débitant 135t/h de cru, et l'autre sans pré-calcinateur avec un débit de 94t/h. La consommation globale des deux fours est instable depuis plusieurs années et dépasse la norme prédéfinie et qu'est fixé à 840th/t .

Dans ce contexte, notre sujet a pour objectif d'optimiser la consommation calorifique du four2. Pour se faire, nous allons suivre la méthode DMAIC :

- ✓ Définir Le problème par la méthode de QOOQCP et le diagramme DE SIPOC
- ✓ mesurer les performances qui sont la consommation calorifique, la production et les couts de production
- ✓ chercher les causes de la haute consommation calorifique nous allons utiliser le diagramme d'Ishikawa,
- ✓ finalement nous allons traiter chaque cause à part afin de trouver les solutions compatible.

## 1.2. Planification du projet

La planification du projet est représentée par le diagramme de Gantt (figure17) qui montre le déroulement du traitement de la consommation calorifique de la ligne de cuisson

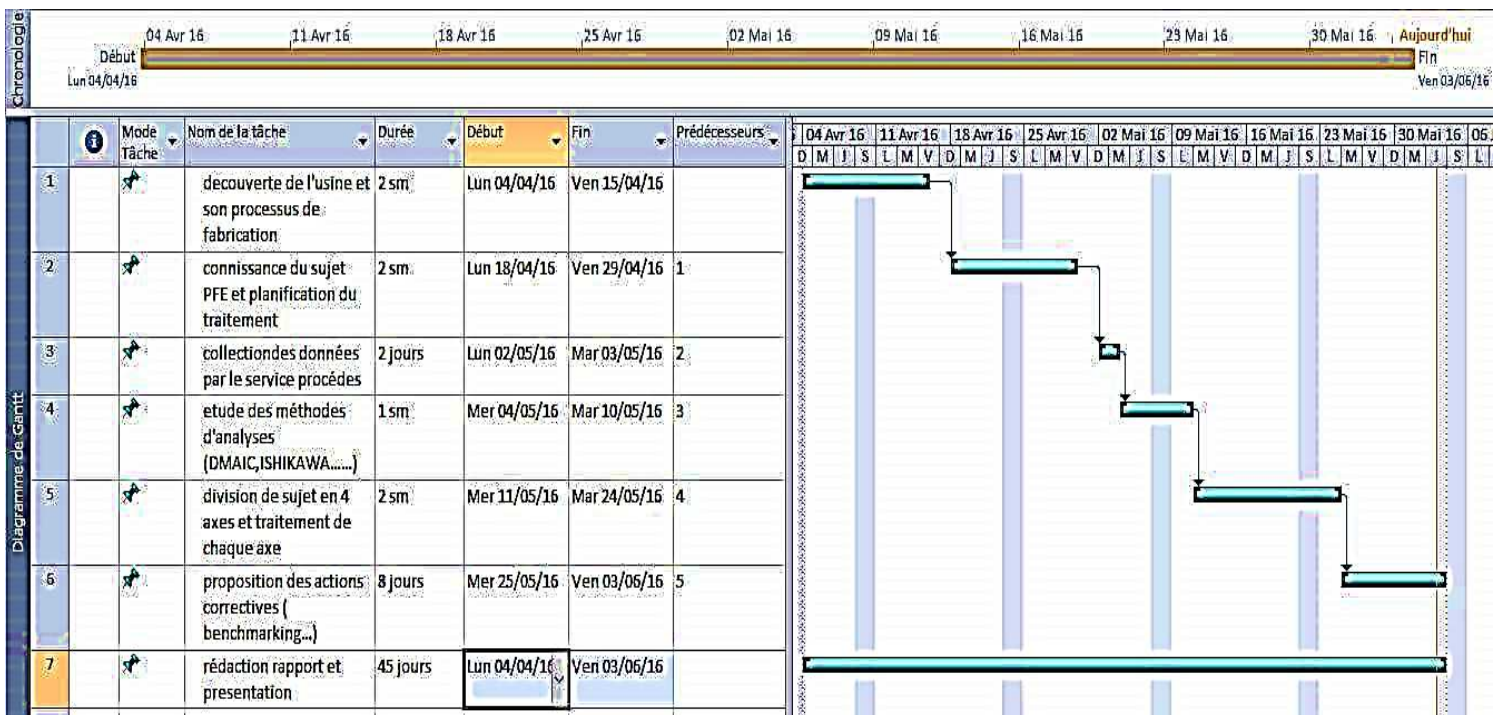


Figure 17 : Diagramme de Gantt

## 2.APPLICATION DE DMAIC SUR LA LIGNE DE CUISSON

### 2.1. Définition de problème

Dans cette partie nous allons définir le problème de surconsommation par la méthode QQQCP et diagramme SIPOC :

Qui ?	-Le département de fabrication de l'entreprise -La ligne de cuisson 2
Quoi ?	-Surconsommation calorifique
Où ?	Spécialement la ligne de cuisson 2
Quand ?	A partir de quelques années avec le vieillissement des lignes de cuisson
Comment ?	Analyser le processus de fabrication Chercher les causes les plus critiques
Pourquoi ?	Pour améliorer les performances des équipements Pour diminuer les charges de production du clinker Pour respecter le budget dédié à la production

Tableau 5:méthode QQQCP

Le tableau ci dessous montre la définition du problème par le diagramme de SIPOC :

Suppliers (Fournisseur)	Input(Entrée)	Process(Processus)	Output (Sortie)	Customers (Consommateur)
Carrière Service broyage cru Fournisseur MP	Farine	Préchauffage (déshydratation et décarbonatation) ↓	Farine préchauffée	Four 1
Tour EVS	Farine préchauffée	Cuisson ↓	Clinker	Refroidisseur
Four 1	Clinker	Refroidisseur ↓ Stockage	Clinker stocké	Service broyage clinker

Tableau 6: la méthode de SIPOC

## 2.2. La Mesure de performance

Dans cette étape, nous allons chercher et extraire toutes les mesures qui permettent de bien montrer la performance des éléments de la ligne de cuisson ainsi que localiser les sources des problèmes détectés. Pour ce faire, nous allons nous baser sur le rapport du four 2 de service fabrication afin d'extraire le maximum possible d'informations.

### 2.2.1. Comparaison entre la consommation prévue et la consommation atteinte

En se basant sur l'historique de l'entreprise de la consommation calorifique (voir annexe 1) nous avons élaboré la comparaison entre la consommation calorifique prévu et atteinte en 2015 au niveau du four 2. (th=0,252Kcal)

Les mois	dec	janv	Fev	mars	avril	mai	Jui	juil	aout	sept
Consommation Prévues (th/t)	883	878	879	879	993	878	878	877	883	881
Consommation Atteinte (th /t)	848	848	848	848	848	848	848	848	848	848

Tableau7: Consommation prévue et atteinte

La figure suivante permet une illustration plus claire de la comparaison:

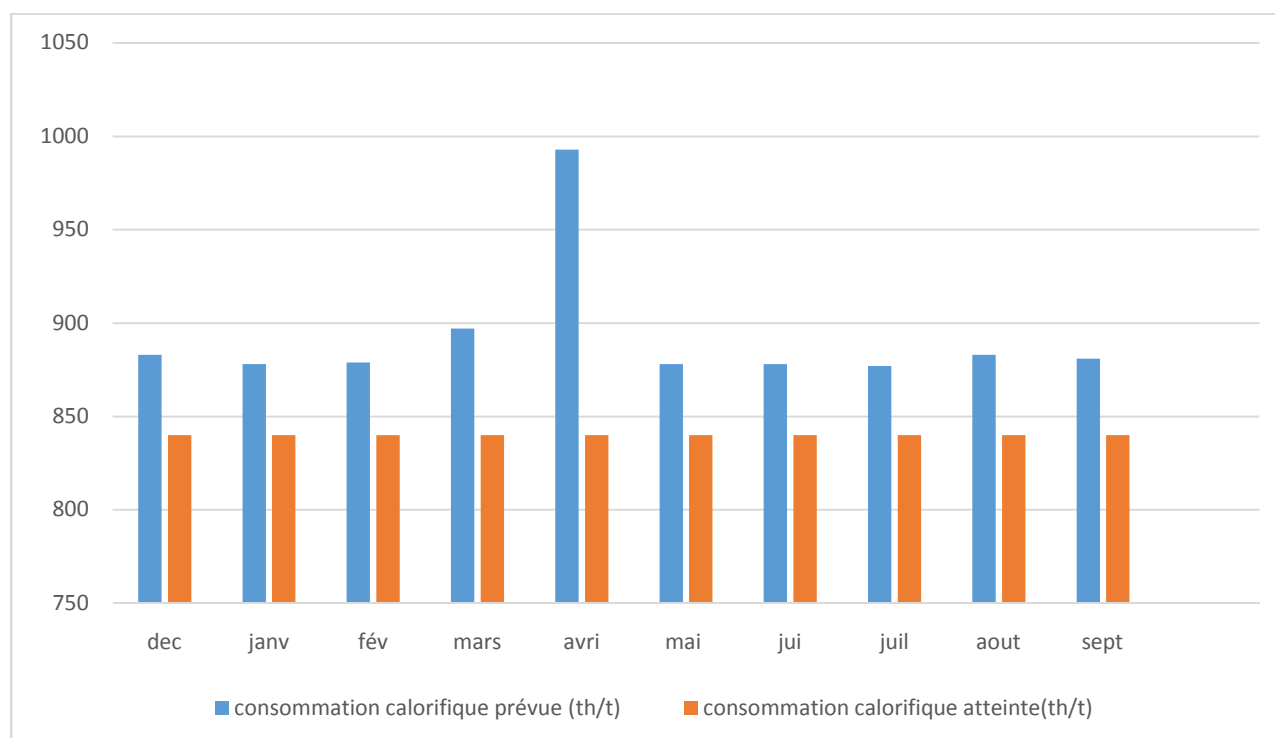


Figure 18 :histogramme de comparaison entre la consommation prévue et organiser

#### - **Interpretation :**

Nous constatons que la consommation calorifique obtenue en 2015 a toujours dépassé celle prévue pour chaque mois, et surtout durant le mois avril, ce qui nous a permis de conclure qu'il existe un vrai problème de consommation calorifique auquel il faut donner plus d'importance pour pouvoir l'optimiser.

a. La Mesure de la production prévue et organiser

En se basant sur la base de données de l'entreprise de l'année 2015 (voir annexe 2), nous avons comparé la quantité de production en clinker réalisée avec la quantité fixée pour chaque mois, le graphe ci-dessous représente le résultat obtenu.

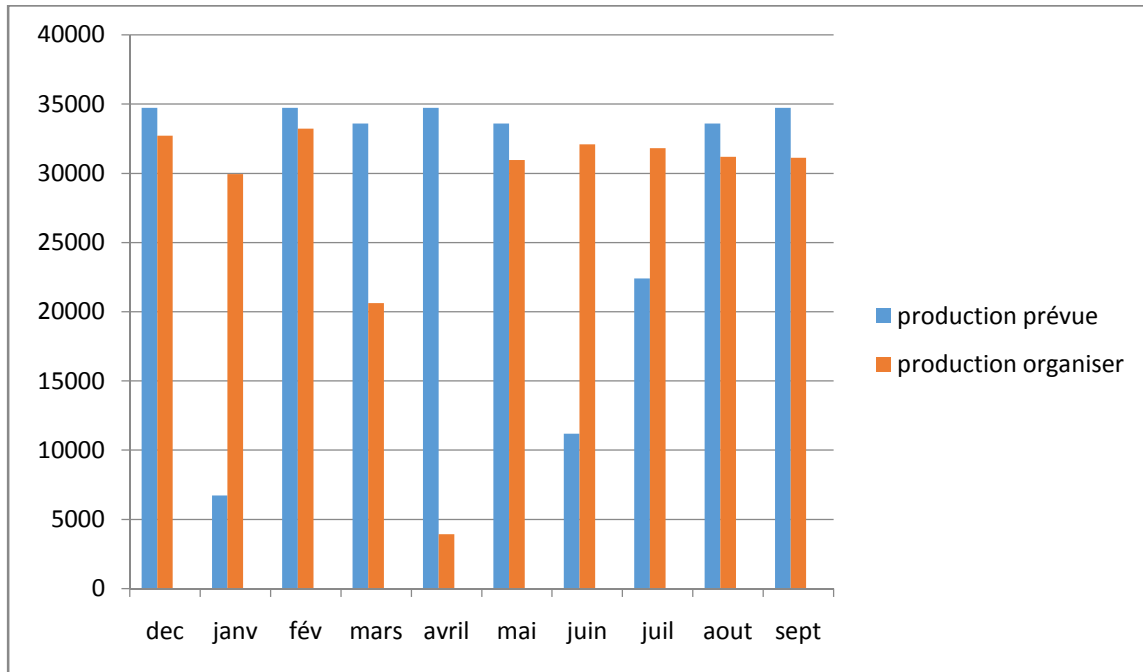


Figure 19: Histogramme de la comparaison entre la production prévue et atteinte

**Interprétation :**

D'après la figure ci-dessus nous remarquons que la quantité de production en clinker est toujours inférieure à celle prévue, sauf des dépassements constatés en mois de janvier, juin et juil.

Nous concluons alors que la production en clinker en 2015 n'a pas pu atteindre, en général, le budget mensuel fixé.

b. Mesure des coûts de production

Le coût de production d'une entreprise ou d'une administration est prédéfini, comme étant la somme des dépenses réalisées pour produire des biens ou services. Ce paramètre prend deux types, le coût variable ou le coût fixe.

En effet, les coûts fixes sont déjà optimisés par l'entreprise et ne présentent aucun problème, ce qui nous a amené à négliger les coûts fixes et agir que sur les coûts variables, tandis que ces derniers ne sont pas optimisés et connaissent des dépassements remarquables gênant le budget.

Le four à un rendement de 54 % donc pour avoir une tonne de clinker on doit préparer 1,835 t de farine. Alors pour une tonne de clinker on aura :

Pour 1t de clinker	quantité	Montant (dh)	Pourcentage
Matières premières	1,835 t de farine	40,17	17 ,86
Energie électrique	51.15 kWh	38, 36	17.05
Consommation calorifique	883 (th)	146.33	65.07
Total		224.86	100

Tableau 8 :les couts de production variables

-Ce Graphe récapitulatif des pourcentages

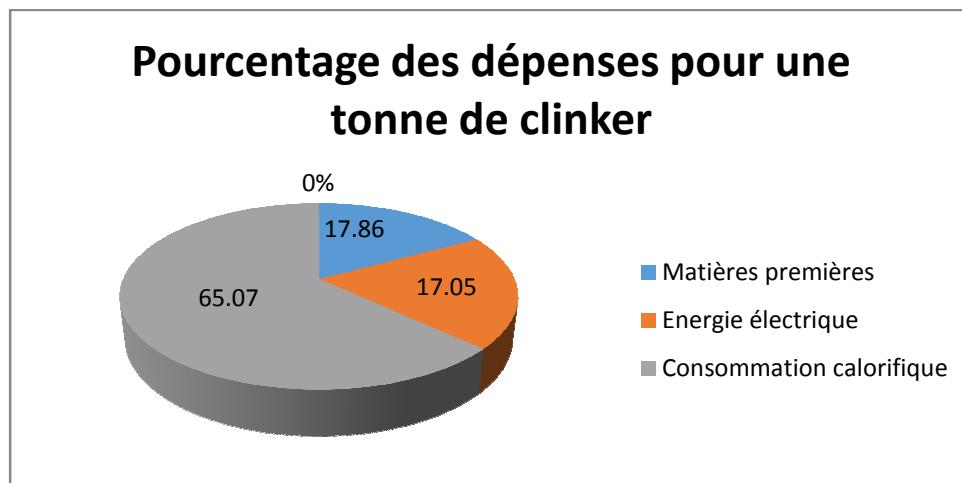


Figure 20: les pourcentages des dépenses

#### - **Interprétation**

Nous remarquons que le plus grand pourcentage atteint 65 .07% est achevé par la consommation calorifique suivi par la matière première pour un pourcentage de 17.85%, puis par les dépenses de la énergie électrique pour le pourcentage 17.05%.

De se faite nous doivent se focaliser sur la consommation calorifique et l'optimiser tout en gardant une bonne fiabilité.

Après avoir définir le problème et mesurer la performance, nous allons passer aux deux dernières étapes : l'analyse des sources du problème et proposition des améliorations

## 2.3. Analyse des causes

Dans le but de diminuer la consommation calorifique du four il faut d'abord chercher les paramètres qui influencent cette consommation. [3]

Le diagramme d'Ishikawa fait l'objet de cette recherche et de visualisation claire des causes de la surconsommation.

La figure ci-dessous présente le diagramme d'ISHIKAWA de notre projet :

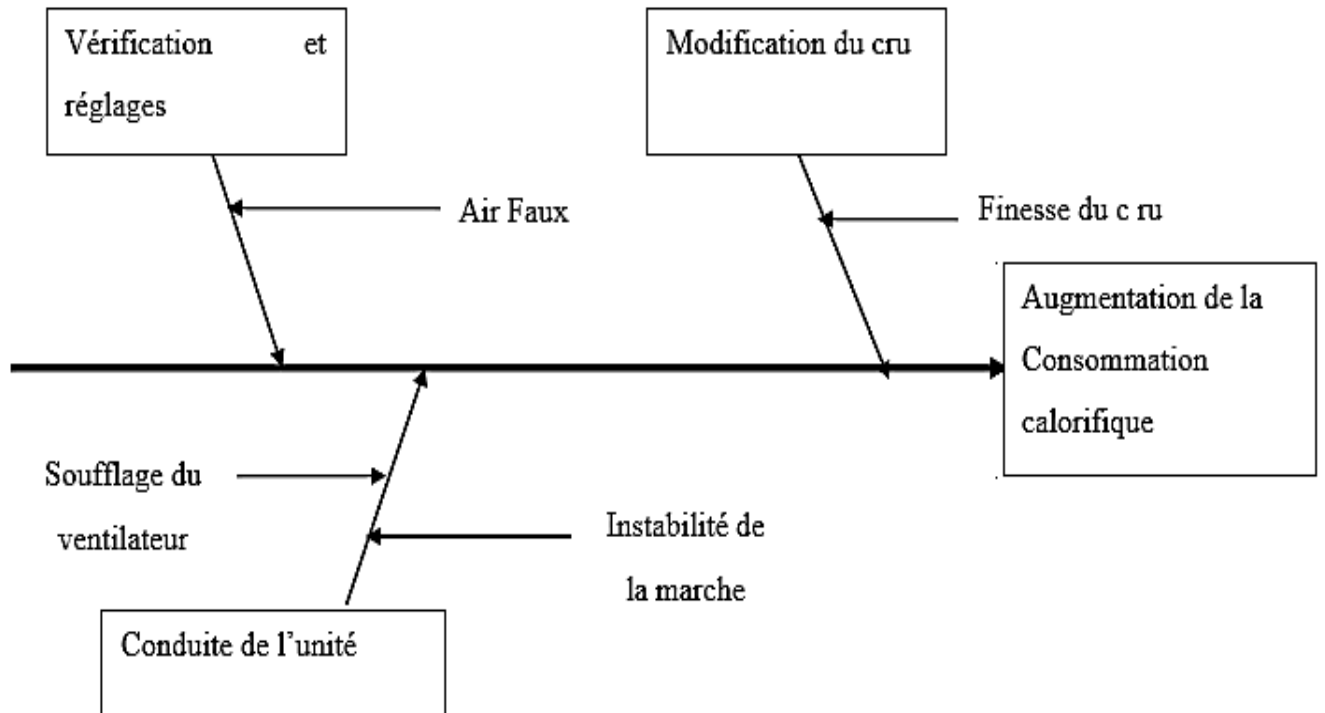


Figure 21 : diagramme cause effet

Après avoir identifié les causes de la surconsommation, il est obligatoire de traiter chaque axe afin d'élaborer une vision précise et d'y remédier.

### 2.3.1. Le soufflage du refroidisseur

#### a. Mise en situation

Pour refroidir le clinker d'une température environ 1400 °C à l'entrée du refroidisseur à une valeur de 100 °C à la sortie du refroidisseur, un débit d'air de refroidissement est nécessaire, ce dernier dépend du débit de la farine crue introduite dans le four. Si nous divisons la somme de débit d'air de refroidissement de tous les ventilateurs d'air de refroidissement par le débit de clinker produite, nous obtenons le débit d'air de refroidissement. Ce dernier est indiqué en  $\text{Nm}^3/\text{kg}$

Du coup si nous augmentons le débit d'air de refroidissement, la température du clinker en sortie diminue, néanmoins la consommation calorifique nécessaire pour le chauffage d'air nécessaire à la cuisson et au tour EVS (air secondaire) augmente. En résulte le débit d'air de refroidissement doit donc être optimisé.

b. Les paramètres de marche du refroidisseur

- **La température du CLINKER:** la température du clinker à l'entrée du refroidisseur atteint une valeur de 1450°C, cette valeur doit s'abaisser jusqu'à 100°C à la sortie du refroidisseur.
- **L'air Secondaire:** il représente l'air aspiré par le ventilateur de l'EVS (échangeur à voie sèche) vers le four, et nous devons récupérer le maximum de ces gaz chauds qui vont servir à augmenter la température du four, et de garder la flamme au niveau de la phase de clinkérisation. Nous visons une bonne récupération des thermies (calories) et donc une bonne récupération des gaz chauds (air secondaire).
- **L'air Exhaure:** c'est l'air refoulé à l'extérieur du refroidisseur. Ce dernier est filtré afin de récupérer la matière en suspension. La température de l'air exhaure ne doit pas dépasser 300°C pour assurer un bon fonctionnement du filtre.
- **Le rendement de récupération  $\mu$ .** (voir chapitre II)
- **Le facteur de récupération.** (chapitre II)

Concernant l'optimisation de quantité d'air refroidisseur, nous allons baser sur le calcul des paramètres ratio de soufflage, rendement de récupération et le facteur de récupération pour se faire, nous allons utiliser les équations pré-pensionnés dans le chapitre précédent et le bilan thermique du four 2 calculé (voir annexe 3) par le service procédés. Nous avons obtenu le résultat suivant:

- La ration de soufflage=**0.47** (la valeur de référence (1.8 à 2.2)) (Equation4)
- Le facteur de récupération **k=1.50** (valeur de référence  $\geq 1.4$ ) (Equation5)
- Le rendement de récupération  **$\mu=58.7\%$**  (la valeur de référence  $\geq 70\%$ ) (Equation6)



- La température du clinker sortie refroidisseur 122 °C (valeur de référence 100)
- Température d'air secondaire 1060 (valeur de référence 1196)
- La température d'air exhaure 238(valeur de référence 250)

En se basant sur ces résultats nous remarquons que :

- une faible valeur de ratio de soufflage.
- température du clinker sortie refroidisseur dépasse la référence.

### 2.3.2. Les Pertes thermiques

En brûlant, le combustible dégage une énergie dont sa majeure partie est exploitée comme source d'énergie thermique du four, tant qu'une partie de puissance est perdue.

D'après le bilan thermique du four 2 (voir annexe 3), nous avons :

$$\sum \text{enthalpies d'entrée} = 969.3 \text{ kcal Et} \quad \sum \text{enthalpies des sorties} = 944.1 \text{ kcal}$$

La différence entre le flux d'entrée et de sortie montre la présence des pertes thermique qui se partage en pertes par parois, par convection ou par rayonnement.

- Pertes par parois

La mesure des pertes par parois est déduite à partir des mesures des températures de

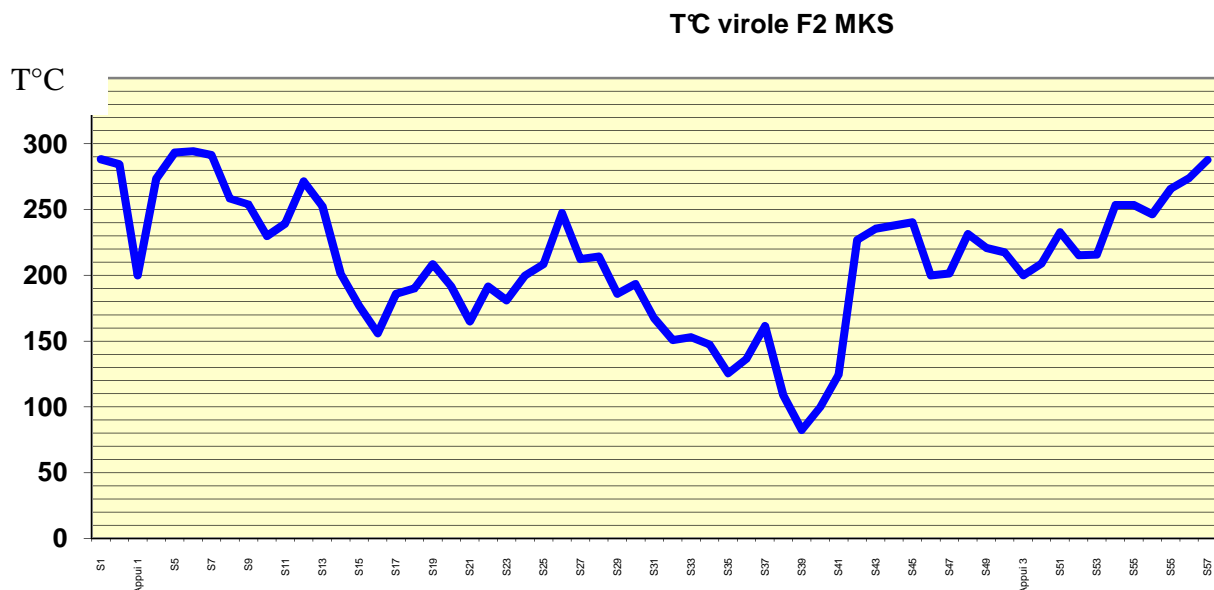


Figure 22 :la température de la virole en fonction de la surface

différentes surfaces de la paroi, l'analyse effectuée en 2012, donne les résultats suivants :

Concernant les pertes par convection et par rayonnement Le tableau suivant donne quelques

	diamètre (m)	surface (m2)	température		convection		radiation		pertes totales	
			°C	°K	h	Qconv	e	Qrad	Q (kcal/h)	Q (kcal/kgkk)
S1	4	17,6	289	562	3,3	15484	0,95	75130	90614	1,99
S2	4	12,6	285	558	3,3	10854	0,95	52030	62885	1,38
Appui 1	4	12,6	200	473	3,0	6709	0,95	24893	31602	0,69
S4	4	12,6	274	547	3,2	10293	0,95	47715	58008	1,27
S5	4	12,6	294	567	3,3	11318	0,95	55756	67074	1,47
S6	4	12,6	295	568	3,3	11370	0,95	56181	67551	1,48
S7	4	12,6	292	565	3,3	11215	0,95	54913	66127	1,45
S8	4	12,6	259	532	3,2	9537	0,95	42237	51774	1,13
S9	4	12,6	254	527	3,2	9313	0,95	40681	49994	1,10
S10	4	12,6	230	503	3,1	8135	0,95	33032	41166	0,90
S11	4	12,6	240	513	3,1	8597	0,95	35932	44529	0,98
S12	4	12,6	272	545	3,2	10192	0,95	46958	57150	1,25
S13	4	12,6	253	526	3,2	9263	0,95	40341	49604	1,09
S14	4	12,6	202	475	3,0	6779	0,95	25265	32044	0,70
S15	4	12,6	177	450	2,9	5655	0,95	19617	25272	0,55
S16	4	12,6	156	429	2,8	4726	0,95	15456	20182	0,44
S17	4	12,6	186	459	2,9	6063	0,95	21588	27651	0,61
S18	4	12,6	190	463	2,9	6246	0,95	22502	28748	0,63
S19	4	12,6	209	482	3,0	7107	0,95	27048	34155	0,75

valeurs des températures des parois ainsi que les différents flux issus du bilan 2012 :

Tableau 9 : Pertes totales de différente surface

### Interprétation :

La mise en place d'un béton à résistivité thermique égale à celui de la brique permet une diminution des pertes thermique jusqu'à 51 kcal/kg kk .

L'usure des réfractaires peut être due soit par une inclinaison inappropriée de la flamme, ou à cause de la fatigue du matériau dû aux températures très élevées.

#### 2.1.1. L'Air Faux

Les airs faux sont les airs parasites qui se développent à cause des portes ouvertes et joints défectueux. L'objectif donc est de les minimiser afin de d'augmenter la capacité calorifique du four, augmenter l'efficacité de l'air sec, minimiser le refroidissement des gaz dans la tour EVS et enfin de réduire la consommation calorifique du four. le schéma ci-dessus représente ces airs parasites.

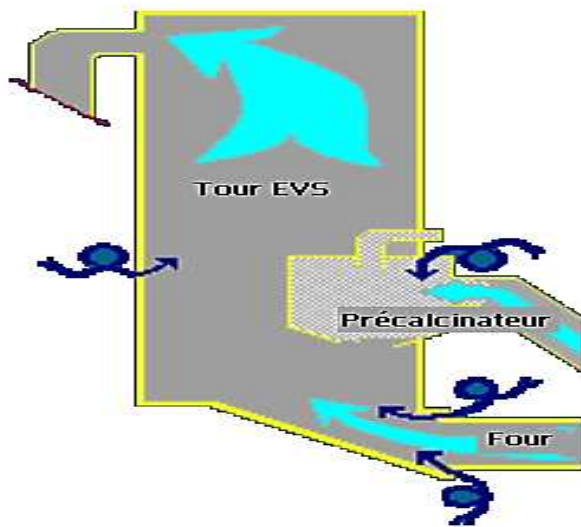


Figure 23 : l'Air faux dans la tour EVS

Le calcul d'air faux se fait par la mesure du pourcentage d'oxygène entre deux points de la section choisie qui doit être la plus petite possible pour une meilleure précision.

Nous calculons le volume d'excès d'air en utilisant la relation citée dans le chapitre précédent (Equation 9)

L'analyse menée en 2014 consiste à mesurer le pourcentage des airs faux à l'entrée et sortie des différents organes en amont du four 2, notamment au niveau de la tour à cyclone, celle-ci donne les résultats suivants :

Organe	Pourcentage
Gaine de sortie C1 et C2 bis	3.01%
Carneau d'entrée C1 bis	8.46%
Carneau d'entrée C1	3.55%
C2	2.08%
C3	1.36%
C4	1.32%
BAF a C4	3.21%
Total tour EVS	17.31%

Tableau 10 :pourcentage des AF dans la tour à cyclones

La figure suivante représente clairement les pourcentages des AF dans la tour à cyclones

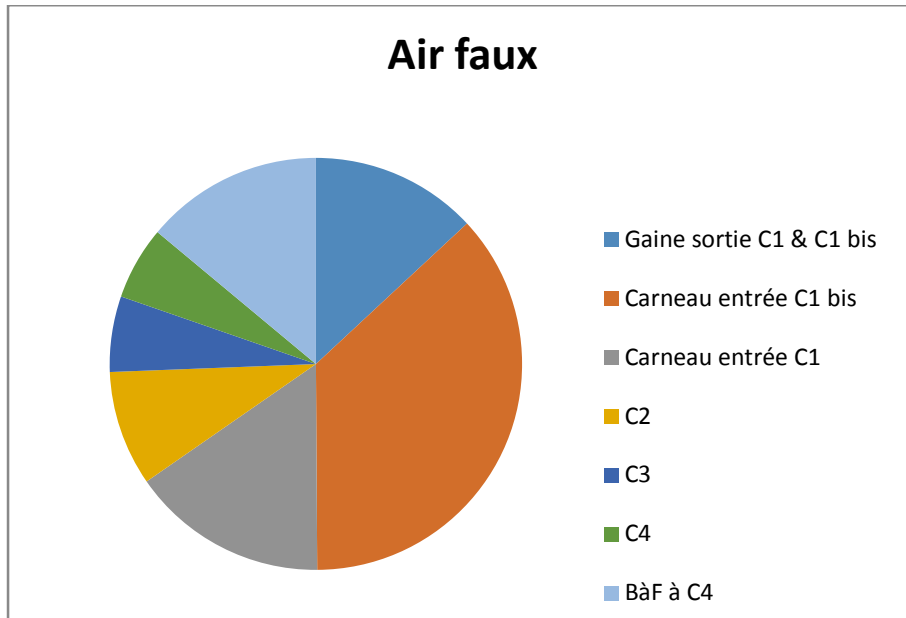


Figure 24 :pourcentage des AF dans EVS

#### - **Interprétation**

Le pourcentage des airs faux est relativement faible dans tous les organes sauf au niveau du carneau entrée C1 bis où il atteint les 8%. Bien que ces pourcentages soient faibles au niveau des différents éléments, leur accumulation est de 17% qui est une quantité importante.

#### **2.1.2. Finesse du cru**

La granulométrie de la matière crue a un impact direct sur la consommation calorifique. Pour cela l'usine doit s'efforcer de garder toujours une granulométrie fine. D'après les responsables du laboratoire d'analyse, l'indice de finesse de la matière exprime la proportion limite des agrégats grossiers, par rapport à la quantité totale, qu'il ne faut pas dépasser. Cette proportion doit rester inférieure ou égale à 21% pour les agrégats de plus de 100 $\mu$ m et 7% pour des agrégats de plus de 200 $\mu$ m. Ces proportions peuvent être exprimées respectivement par les indices suivants :

- ✓  $I_{100\mu m} \leq 21\%$
- ✓  $I_{200\mu m} \leq 7\%$

Concernant la mesure de la finesse du cru, nous mesurons l'évolution de l'indice de finesse du cru dans le temps  $>100\ \mu\text{m}$  et celui  $>200\ \mu\text{m}$ .

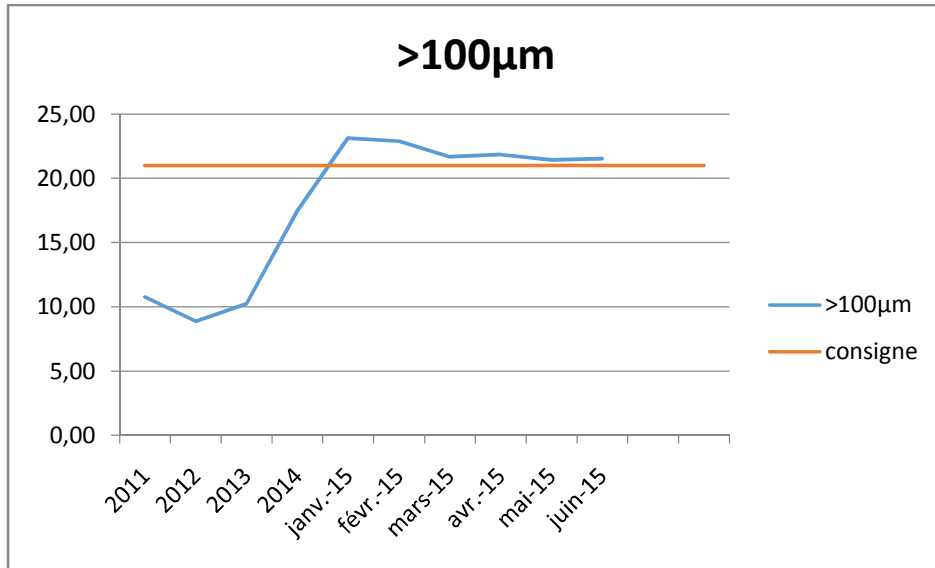


Figure 25 :évolution de la finesse de cru  $>100\ \mu\text{m}$

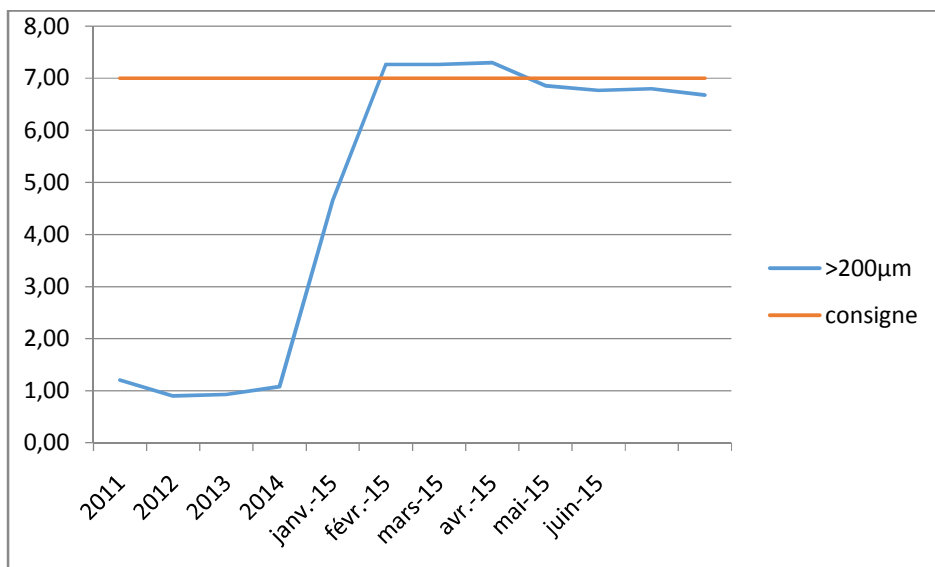


Figure 26 :Evolution de l'indice de finesse du cru dans le temps  $>200\ \mu\text{m}$

## - **Interprétation**

D'après les analyses menées au cours du temps, l'indice de finesse pour les deux types a subi une augmentation rapide dans les derniers mois de l'année 2015, et il a dépassé la norme fixée à 1% pour  $>200 \mu\text{m}$  et à 10% pour  $>100 \mu\text{m}$ . Lafarge s'est donc déterminée une autre limite de 20% pour les refus  $>100\mu\text{m}$  et 7% pour les refus  $>200\mu\text{m}$ .

Alors après avoir analysé les causes de la surconsommation calorifique, nous allons proposer sur quoi il faut agir pour avoir un bon niveau de performance en terme de la consommation calorifique.

## **2.2. Plan d'action**

- **Modification du débit de soufflage du refroidisseur**

Il est clair que le ratio du soufflage du ventilateur est faible devant l'objectif d'où la nécessité d'augmenter le débit

- **L'influence de l'augmentation de la couche clinker sur la température de la sortie Clinker.**

L'augmentation de la hauteur du lit de clinker entraîne une augmentation de la durée de rétention de l'air de refroidissement dans le lit de clinker, de ce fait l'échange de chaleur s'en trouve amélioré ce qui provoque l'augmentation de la température de l'air secondaires réduction de la température de sortie du clinker, Si la limite de hauteur du lit du clinker est dépassée, l'échange de chaleur et l'efficacité du refroidisseur diminue (voir figure ci-dessous).

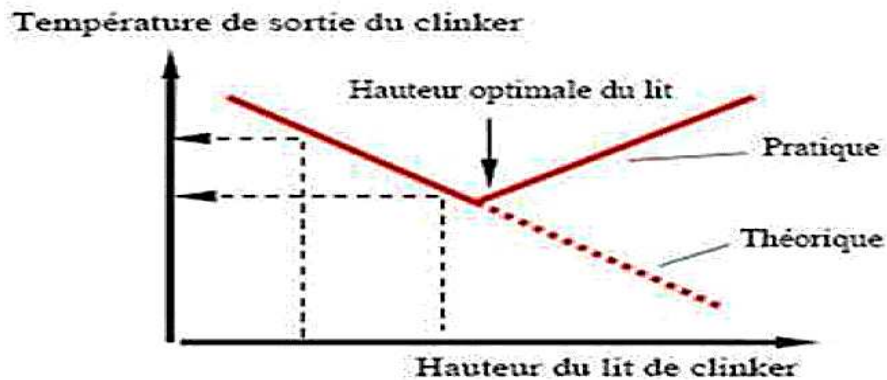


Figure 27: Effet de la hauteur lit clinker sur la température sortie clinker

- **Diminution des pertes thermiques**

Afin de diminuer les pertes thermiques par parois, il est nécessaire de procéder à un entretien régulier de l'état du réfractaire en surveillant la température de la paroi, qui est l'indicateur de son état. La norme exige une épaisseur des briques limitée à 15 cm.

- **Augmentation de la finesse de cru**

Pour garder cette contrainte, il est recommandé de surveiller la qualité du broyage à travers une étude à part au niveau du broyeur du cru

- **minimiser l'Air Faux**

Cette prise d'air peut être expliquée par un problème d'étanchéité au niveau de la tour; la présence d'une fuite au niveau de ces équipements exige un entretien régulier pour chercher les endroits de ces fuites et les réparer.

Pour plus de maîtrise des airs faut, il faut remplir la fiche à chaque visite et faire des comparaisons afin déterminer les point les plus sensibles et la fréquence de progression des airs faux.

## CONCLUSION GENERALE

Rappelons que le but de ce projet de stage est d'optimiser la consommation l'énergie calorifique du four2. Pour cerner ce projet nous avons commencé par une analyse de la situation actuelle de la consommation, et nous avons tiré ce résultat d'analyse, que cette énergie dépasse le seuil préfixé par l'usine. Ceci est dû à des causes diverses : soufflage du refroidisseur, pertes thermiques...etc. Des actions correctives et préventives ont été proposées dans le but d'atténuer l'effet des principaux paramètres.

L'étude particulière du four 2 nous a permis de clarifier les problématiques liées à l'optimisation de la consommation calorifique chez Lafarge de Meknès. L'idée c'est d'organiser le travail en quatre axes d'optimisation, afin de faciliter le travail. De plus l'utilisation des méthodes d'analyse en terme de DMAIC, le diagramme CAUSE EFFET a bien orienté nos idées dans un parcours bien organisé et efficace pour traiter ce genre de problématique.

La vision globale de la consommation calorifique à travers les comparatifs nous a aussi aidés à faire sortir des actions correctives dont nous rappelons les plus importants :

- ✓ modification du débit de soufflage refroidisseur
- ✓ diminution des pertes thermiques
- ✓ augmentation de la finesse de cru
- ✓ minimiser l'air faux

Par manque du temps nous ne sommes pas arrivé a contrôler les actions correctives proposées ainsi nous avons éliminé des axes considères secondaires par le service procédé.









Annexe 3 : bilan thermique du four 2 en 2012

<b>Bilan ligne de cuisson</b>											
Entrées	Nm3/kqkk	Kq/kqkk	T°C	Cp	Enthalpie	Sorties	Nm3/kqkk	Kq/kqkk	T°C	Cp	Enthalpie
<b>Combustibles</b>						<b>Sortie prechauffeur</b>					
Combustible aval		0,083			604,7	Fumées	<b>1,772</b>	2,291	<b>360</b>	0,353	225,3
Combustible amont		0,043			303,5	chaleur sens poussières		0,342	360	0,225	27,7
Chaleur sensible combustibles		0,126	42	0,257	1,4	chaleur lat poussières		0,000			1,6
						H2O vap. cru		0,009			5,2
<b>Cru</b>						H2O vap. eau granules		0,000			0,0
Cru		1,987	<b>64</b>	0,191	23,1	H2O vap. combustible		0,001			0,8
Chaleur latente du cru		0,0011			8,9	CO	0,0062				18,7
Eau granules		0,0000	64	1,002	0,0	Pertes par parois tour					<b>30,5</b>
						Pertes par parois four					<b>51,0</b>
						<b>Chaleur théorique</b>					<b>420,0</b>
<b>Air</b>											
Air soufflé	2,367		26	0,311	19,3	<b>Refroidisseur</b>					
Air primaire four	0,116		109	0,312	3,9	Exhaure 1	0,000		0	0,000	0,0
Air primaire préca	0,000		0	0,000	0,0	Exhaure 2	1,810		238	0,314	135,3
Air aéropol	0,000			0,000	0,0	Exhaure 3	0,000		0	0,311	0,0
Air tertiaire	0,000		0	0,000	0,0	A.tertiaire	0,000		0	0,000	0,0
Air caméra + hublot + Pyro.	0,000		10	0,311	0,0	Indéterminées	-0,031		17	0,311	-0,2
Air entrant nosering aval	0,124		24	0,311	0,9	Pertes par parois ref.					5,0
Entrées d'air amont	0,634		<b>18</b>	0,311	3,6	Clink. sortie refroidisseur		1,000	122	0,191	23,3
<b>Total</b>					<b>969,3</b>	<b>Total</b>					<b>944,1</b>