

## Licence Sciences et Techniques (LST)

# GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### Impact finesse crue sur la consommation énergétique

#### Présenté par :

- ◆ AHSAINI Loubna

#### Encadré par :

- ◆ Mr. El Mansouri  
Hamid(LAFARGEHOLCIM)
- ◆ Pr. HARRACH Ahmed (FST)

Soutenu Le 10 Juin 2021 devant le jury composé de :

- Pr EL GHADRAOUI El Houssine
- Pr KHALIL Fouad
- Pr HARRACH Ahmed

Stage effectué à LAFARGEHOLCIM  
Année Universitaire 2020 / 2021

# Dédicace

## **A mes chers parents,**

*Aucun terme et aucune langue ne pourra exprimer mon amour et mes sentiments envers vous.*

*En témoignage de mon amour, mon affection et ma reconnaissance pour les efforts que vous avez consentis pour moi durant toutes ces années je vous dédie cet humble travail.*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect et mon considération et mes profonds sentiments envers eux.*

## **A mes chers frères et sœurs,**

*Je ne sais comment vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

## **A toute ma famille.**

*Pour tout le soutien que vous m'avez offert*

## **A tous mes professeurs**

*A tous mes amis et ceux qui me sont chers*

*Et à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation*

*Je dédie ce modeste travail.*



## Remerciements :

Avant d'entamer ce rapport, je tiens tout spécialement à exprimer ma sincère gratitude et estime envers mes chers parents pour ses sacrifices, sa patience et ses encouragements durant ma vie estudiantine.

Il n'est jamais facile pour un étudiant de trouver un stage, c'est pourquoi je remercie LAFARGE ciment usine de Meknès de m'avoir accueillie durant cette période, et de m'avoir accordé l'opportunité de vivre une telle expérience enrichissante. Mes vifs remerciements s'adressent également aux responsables de la société, plus spécialement mon tuteur de stage Mr.EL MANSOURI Hamid pour avoir eu l'amabilité de partager son savoir-faire et qui m'a accordé sa confiance et attribué des missions valorisantes durant ce stage.

J'adresse mes sincères et chaleureux remerciements à mon encadrant Monsieur HARRACH Ahmed pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et sa participation au cheminement de ce rapport avec une toute particulière sympathie.

Enfin, je remercie les membres de jury le Professeur EL Ghadraoui El houssine et le Professeur KHALIL Fouad d'avoir accepté de juger ce travail.



# Table des matières:

INTRODUCTION GENERALE	—1
<b>1 Introduction :</b>	<b>2</b>
<i>Chapitre 1: présentation de l'entreprise</i>	
<b>2 Description de l'entreprise LAFARGEHOLCIM Meknès :</b>	<b>2</b>
2.1 LAFARGEHOLCIM avant la fusion :	2
2.2 LAFARGEHOLCIM Maroc :	2
2.3 Lafarge, Usine de Meknès :	4
2.4 Situation géographique :	4
2.5 Produits de la société :	5
2.6 Organigramme de LAFARGEHOLCIM Meknès :	5
➤ Les services :	6
<i>Chapitre 2: Processus de fabrication du ciment</i>	
<b>3 Ciment :</b>	<b>7</b>
➤ Qu'est-ce que le ciment ?	7
<b>4 Procédés et techniques de fabrication du ciment :</b>	<b>7</b>
4.1 Les étapes de fabrication du ciment :	7
4.1.1 Extraction de la matière première :	8
4.1.2 Le concassage :	8
4.1.3 Pré-homogénéisation :	9
4.1.4 Broyage :	9
4.1.5 Homogénéisation :	10
4.1.6 Cuisson de la farine :	10
4.1.7 Broyage clinker :	11
4.1.8 Ensachage et expédition :	12
<b>5 CONCLUSION :</b>	<b>12</b>
<i>Chapitre 3: Impact finesse cru sur la consommation énergétique</i>	
<b>6 Contexte et description du projet :</b>	<b>14</b>
➤ Description de la mission :	14
<b>7 Définition de la problématique:</b>	<b>14</b>
7.1 Description du broyeur cru :	14
7.2 Description de la ligne de cuisson :	15
7.2.1 Tour à cyclones :	16
7.2.2 Four rotatif :	16
7.2.3 Refroidisseur :	17



<b>8</b>	<b>Les causes à analysées pour la consommation énergétique :</b>	<b>18</b>
8.1	<i>La qualité de combustion :</i>	19
8.2	<i>L'air faux :</i>	19
	➤ Calcule des airs faux en amont du four :	20
8.3	<i>Rendement du four :</i>	21
	➤ Formation des anneaux :	21
8.4	<i>Granulométrie de la matière :</i>	22
<b>9</b>	<b>Objectif de l'entreprise :</b>	<b>23</b>
9.1	<i>Pour la consommation électrique d'un broyeur:</i>	23
9.1.1	La variation de CE en fonction du temps :	23
9.1.2	La variation de CE et la finesse en fonction du temps :	23
9.2	<i>Pour la consommation calorifique d'un four :</i>	25
9.2.1	La variation de la finesse de cru en fonction du temps :	25
9.2.2	La variation de consommation calorifique en fonction du temps :	25
9.2.3	Variation du CC et de la finesse de cru en fonction du temps :	26
<b>10</b>	<b>Conclusion :</b>	<b>27</b>
<b>11</b>	<b>Recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique :</b>	<b>27</b>
11.1	<i>Partie économique :</i>	27
11.2	<i>Solutions :</i>	28
11.2.1	Qualité de combustion :	28
11.2.2	L'air faux :	29
11.2.3	Rendement du four :	29
11.2.4	Granulométrie de la matière :	29
	<i>Conclusion Générale</i>	31



## Listes des tableaux et des figures :

### **Liste des tableaux :**

Tableau 1: Pourcentage des ajouts de clinker	5
Tableau 3: Les caractéristiques des deux fours	17
Tableau 4: Comparaison de la consommation électrique dans les deux cas de la finesse crue	24
Tableau 5: Les coûts de SEEC et STEC en fonction des tailles de la crue	27

### **Listes des figures :**

Figure 1: Répartition géographique des cimenteries au niveau national	3
Figure 2: Implantation de LAFARGEHOLCIM au Maroc	3
Figure 3: Carte général	4
Figure 4: Organigramme	5
Figure 5: La constitution du ciment	7
Figure 6: La carrière de matière première	8
Figure 7: Concassage de matière première	9
Figure 8: Hall de pré-homogénéisation (Silos de stockage)	9
Figure 9: Situation du broyeur cru dans le processus de fabrication	10
Figure 10: Tour d'homogénéisation	10
Figure 11: Four rotatif	11
Figure 12: Schéma de l'opération de cuisson	11
Figure 13: L'ensachage et l'expédition du Ciment	12
Figure 14: Broyeur cru à trois galets	14
Figure 15: Tour à cyclones	16
Figure 16: Refroidisseur	18
Figure 17: Aspect du clinker	18
Figure 18: Le diagramme présentant la variation du C.E en fct du temps	23
Figure 19: Diagramme la consommation électrique en fonction de la finesse cru	24
Figure 20: Graphe montrant la variation de R90% au cours du temps	25
Figure 21: Graphe présentant la variation de la consommation calorifique en fonction du temps	26
Figure 22: Diagramme la consommation calorifique et de la finesse cru en fonction du temps	26



## LEXIQUE ET ABBREVIATIONS :

Mots	Définitions
BC	broyage cru.
CC, CE	Consommation calorifique, Consommation électrique.
C <sub>3</sub> S	Alite ou silicate tricalcique (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> ), constituant principale du clinker.
C <sub>2</sub> S	Bélite ou silicate bicalcique (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ), il est un composant du clinker.
C <sub>3</sub> A	Célite ou aluminat tricalcique (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )
C <sub>4</sub> AF	Félite ou aluminoferrite tétracalcique (Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> ), composant principal ayant but noircir le ciment.
CPJ	ciment portland avec ajouts de constituants secondaires.
CPA	Ciment Portland Artificiel
EVS	Echangeur à voie sèche
PH	pré-homogénéisation.
STEC	Specific Thermal Energy consumption
SEEC	Specific electrical Energy consumptical



# INTRODUCTION GENERALE

Le Maroc a connu une forte expansion, de l'immobilier. Ainsi, les besoins en matériaux de construction ont été agrandis, notamment en ciment. C'est pourquoi la cimenterie au Maroc représente une partie importante du tissu industriel national.

Du 27 Avril au 18 Juin 2021, mon stage d'application a été effectué au sein de l'entreprise LAFARGEHOLCIM à l'usine de Meknès, le leader mondial dans le secteur cimentier. Pour produire le ciment, l'industrie cimentière a dû optimiser son processus de fabrication. Il s'agit d'un procédé de fabrication très consommateur d'énergie, et surtout exigeant la fiabilité du produit fini et de sa qualité.

Plus largement, ce stage a été une opportunité d'enrichir nos connaissances techniques et pratiques, ce stage nous a permis de comprendre dans quelle mesure le travail d'équipe est indispensable pour le bon fonctionnement de toute entreprise.

La fabrication du ciment est un procédé complexe et gourmand en énergie. Dans ce contexte, le projet que nous avons traité, le sujet l'impact finesse cru sur la consommation énergétique, dans ce sens ce rapport est subdivisé en trois chapitres. Le premier est dédié à la présentation de l'entreprise, le deuxième consacré sur le processus de fabrication du ciment, enfin, le dernier chapitre est reposé sur le sujet de mon stage.





# **Chapitre 1 :**

# **Présentation de l'entreprise**



## **1 Introduction :**

Ce chapitre donne une présentation générale de LAFARGEHOLCIM de Meknès où j'ai effectué mon stage de 2 mois, après j'arbore à un aperçu sur le processus de fabrication du ciment.

## **2 Description de l'entreprise LAFARGEHOLCIM Meknès :**

### **2.1 LAFARGEHOLCIM avant la fusion :**

Lafarge est un groupe français de matériaux de construction, créée en 1833, leader mondial dans son secteur.

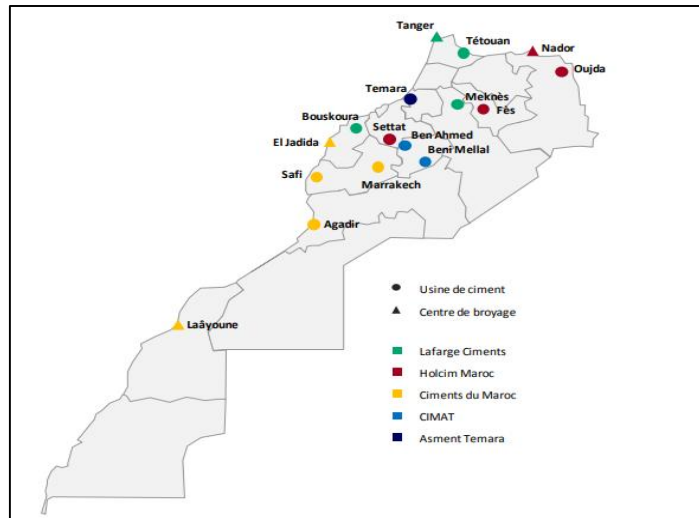
Holcim qui est l'un des plus grands producteurs mondiaux du ciment, HOLCIM : HOL : rappelle les origines du groupe « le village HOLDERBANK » et CIM symbolise l'activité du ciment. Il a été fondé en 1912 sous le nom de « financière Glaris » dans le village d'Holderbank du canton d'Argovie. C'est un groupe suisse à un usage varié, présent dans plus de 77 pays dans le monde, son chiffre d'affaire, en 2006, dépassent 17 Milliard d'Euro, dont 47% dans le ciment, 33% dans le béton et les granulats, 11% dans le plâtre, et 9% dans les toitures.

Le groupe inscrit sa croissance dans une stratégie de développement durable : son savoir-faire concilie l'efficacité industrielle, la création de valeur, la protection de l'environnement, le respect des hommes et des cultures et l'économie des ressources naturelles et de l'énergie.

### **2.2 LAFARGEHOLCIM Maroc :**

LafargeHolcim a été créé en 1976 par l'office du développement industriel (ODI) avec le concours de la banque Islamique sous le nom de CIOR (les ciments de l'oriental). Sa première cimenterie a été construite à OUJDA et elle a démarré en 1979 avec une capacité de production de 12 Millions de Tonnes par an.

Les cimenteries marocaines génèrent un chiffre d'affaire annuel de 15 milliards Dhs. Elles constituent un acteur majeur dans l'économie du Royaume. La moitié du ciment marocain est consommé par 16% du territoire.



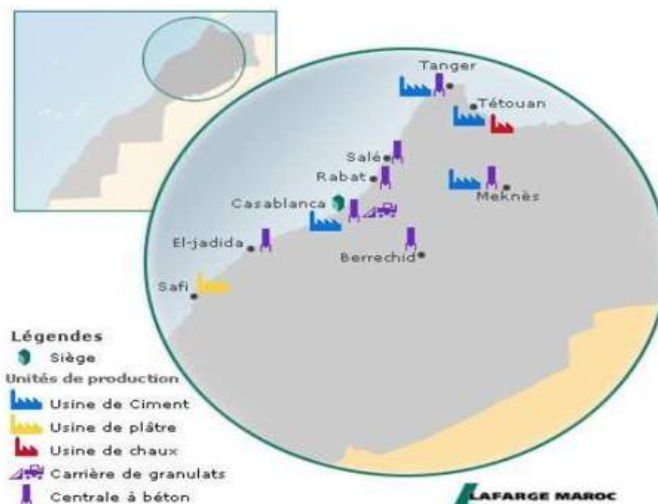
**Figure 1: répartition géographique des cimenteries au niveau national**

Les principaux acteurs du ciment marocain sont au nombre de cinq :

- Lafarge Maroc (groupe français Lafarge),
- Ciments du Maroc (groupe italien Italcementi),
- Holcim Maroc (groupe suisse Holcim),
- Asment Temara (groupe portugais Cimpor),
- Le dernier né, 100 % marocain, les Ciments de l'Atlas (CIMAT).

Lafarge Maroc est présent à travers ses quatre activités : le ciment, les granulats et béton, le plâtre et la chaux.

- Activité et implantation :



**Figure 2: Implantation de LAFARGEHOLCIM au Maroc**

- Ciment : premier cimentier Marocain avec 4 usines à Bouskoura, Meknès, Tanger et Tétouan.
- Chaux : une usine à Tétouan.
- Béton Prêt à l'Emploi : 18 centrales à béton situées à Casablanca, Berrechid, El Jadida, Mohammedia, Rabat, Salé, Meknès, Tanger, Tanger-Med.
- Granulats : une carrière à Khyayta (Berrechid).
- Plâtre : une usine à Safi

### 2.3 Lafarge, Usine de Meknès :

Le groupe LAFARGE Maroc en général et l'usine de Meknès en particulier s'engage à être l'entreprise la plus performante, la plus engagée pour assurer la sécurité des personnes, le respect de l'environnement et surtout la plus appréciée des clients par la qualité de ses produits et de ses services.

Ainsi, en termes de maîtrise technique de la qualité des produits de ciment, l'usine de Meknès veille à tous les niveaux de la ligne de production sur la constitution du ciment et procède à des ajouts correctifs pour garantir la qualité requise par le client.

### 2.4 Situation géographique :

Situé à 8 Km au nord-est de la ville Meknès, la société LAFARGE Ciment usine de Meknès a été créée en 1950, elle est la deuxième cimenterie, en terme de capacité, du groupe LAFARGE MAROC. Elle occupe une position majeure grâce à sa situation géographique.

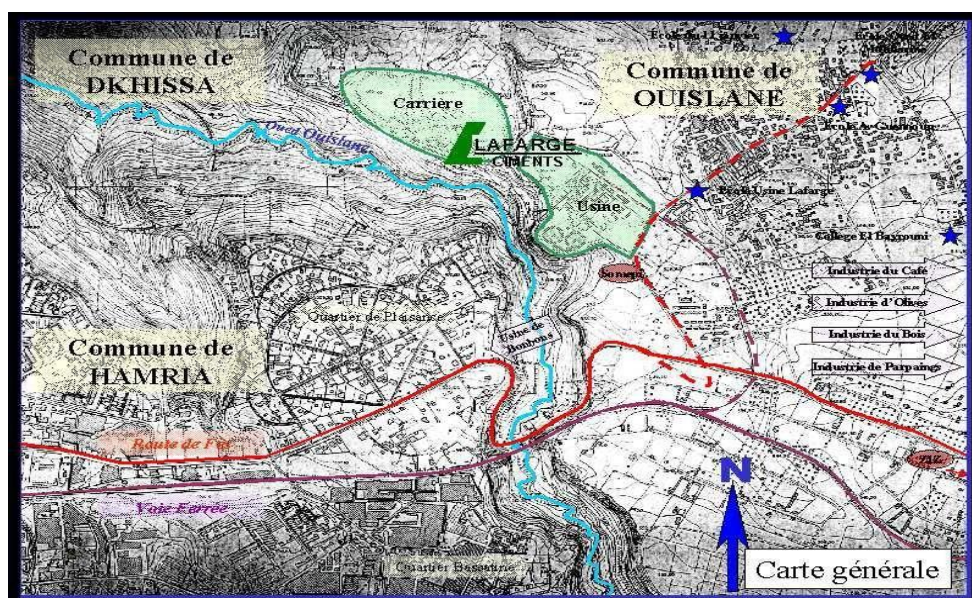


Figure 3: Carte général

## 2.5 Produits de la société :

La différence entre ses catégories réside dans les pourcentages précis des ajouts au clinker comme indique le tableau suivant :

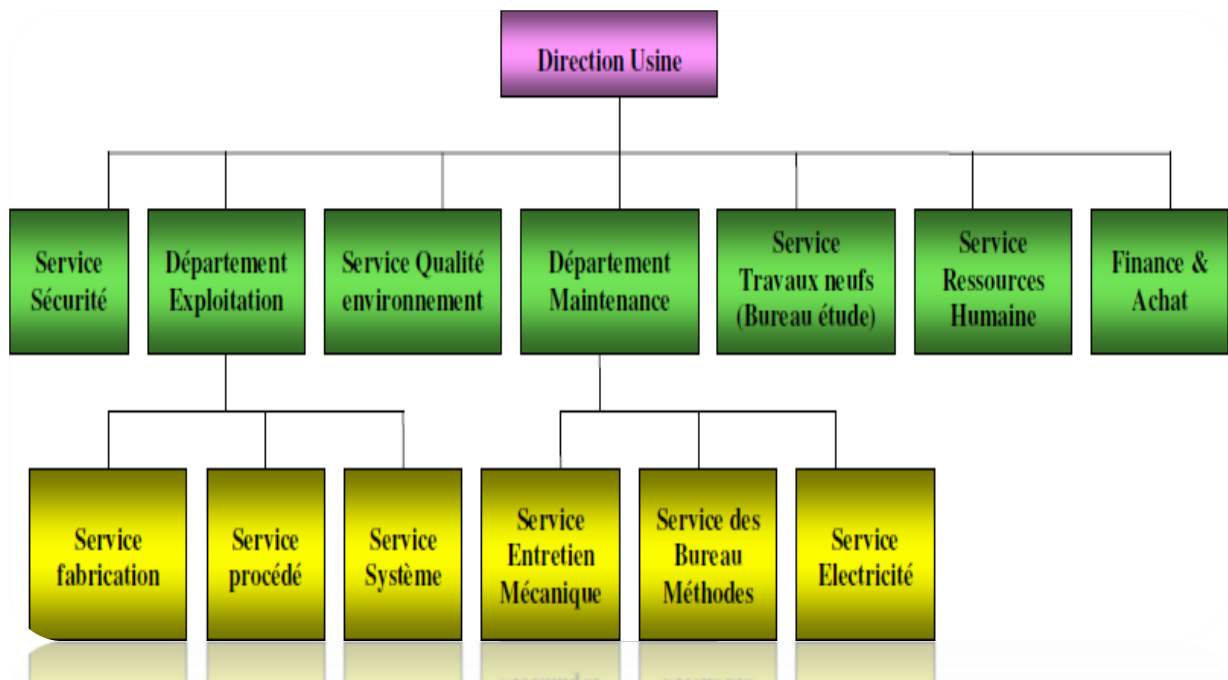
**Tableau 1: pourcentage des ajouts de clinker**

Les composants de ciment	CPJ35	CPJ45	CPA55
Calcaire	35.60%	24%	0%
Cendres volantes	3.21%	6.52%	0%
Gypse	2.8%	3.14%	5.64%
Clinker	58.39%	66.34%	94.36%

## 2.6 Organigramme de LAFARGEHOLCIM Meknès :

Pour schématiser les liens fonctionnels, organisationnels et hiérarchiques, on se sert d'un organigramme simplifiant cette représentation.

### a. Organigramme :



**Figure 4: Organigramme**



➤ **Les services :**

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

- ✓ Service carrière ;
- ✓ Service fabrication et procédé ;
- ✓ Service bureau méthodes ;
- ✓ Service maintenance mécanique ;
- ✓ Service maintenance électrique ;
- ✓ Service contrôle qualité ;
- ✓ Service Sécurité ;
- ✓ Service Finance - Gestion ;
- ✓ Service Ressources Humaines ;
- ✓ Service Formation ;

## Chapitre 2 :

# 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 de la qualité, le ciment fait partie de la vie quotidienne, difficile d’imaginer le développement des territoires sans ciment.

### 3 Ciment :

#### 3.1 Qu’est-ce que le ciment ?

Le ciment étant le constituant de base des bétons et mortiers, est une poudre minérale finement broyée, non métallique et inorganique, d’aspect grisâtre, formant avec l’eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d’agglomérer, en durcissant des substances variées, même à l’abri de l’air. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l’eau, c’est un liant hydraulique principalement dû à la formation d’hydrates de silicates de calcium sous l’effet de la réaction entre l’eau du mélange.



Figure 5: la constitution du ciment

### 4 Procédés et techniques de fabrication du ciment :

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

#### 4.1 Les étapes de fabrication du ciment :

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

- ♣ Extraction des matières premières (à grande majorité locales et extraites en propre);
- ♣ 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.

#### 4.1.1 Extraction de la matière première :

Le ciment est fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer. Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, de marnes, d'argiles, de schistes, de minerai de fer et de sable. La préparation des matières premières est une opération très importante qui intervient avant la cuisson du cru dans le four car elle garantit que sa composition chimique est constante et elle permet d'obtenir une poudre de la finesse requise.

Ils sont exploités dans des carrières relativement éloignées de l'usine ou livrés par des fournisseurs.



**Figure 6: La carrière de matière première**

La carrière se situe à 6 Km de l'usine. L'extraction de la matière première se fait sur des fronts de taille 8 à 15 mètres de hauteur par abattage. Pour assurer son approvisionnement en calcaire et en argile, LAFARGE-HOLCIM dispose d'une carrière en cours d'exploitation qui est située à 5 km de l'usine d'une superficie de 100 hectares possédant comme réserves 13 500 000 tonnes de calcaire et un tonnage pratiquement illimité d'argiles.

#### 4.1.2 Le concassage :

Les blocs de calcaire extraits peuvent atteindre  $1\text{m}^3$  de volume, ils sont concassés et ramenés 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. L'usine dispose de deux concasseurs à marteaux d'un débit de 800 T/h et 400 T/h de fourniture HAZMAG et FCB.



**Figure 7: Concassage de matière première**

#### 4.1.3 Pré-homogénéisation :

Pour obtenir un produit homogène (mélange très intime des constituants : calcaire, argile, sable, minéral de fer), l'usine est équipée de deux installations de pré-homogénéisation polaires, la capacité totale de chacune est de deux tas de 18000 tonnes.

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



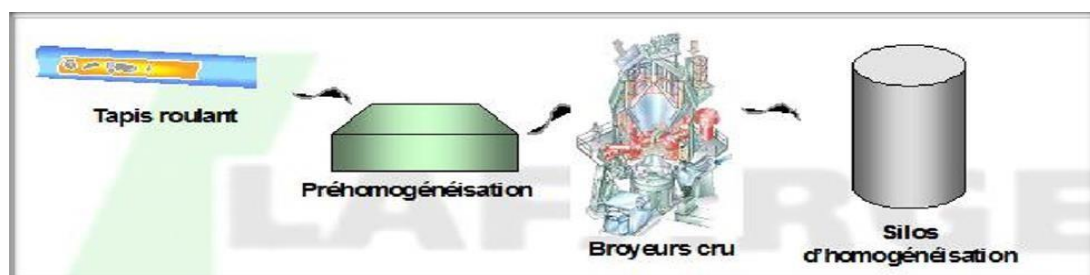
**Figure 8: Hall de pré-homogénéisation (Silos de stockage)**

#### 4.1.4 Broyage :

Les matières premières doivent être finement broyées pour fragmenter la matière afin d'obtenir la granulométrie adéquate (30 mm vers  $100\mu\text{m}$ ) pour être chimiquement plus réactives au cours de cuisson dans le four. Les broyeurs utilisés sont des broyeurs à galets.

En général, la matière crue est constituée de 70% à 75% de calcaire, 20% à 25% d'argile, de marne et de schistes et 1% à 5% de matières de corrections. Ce mélange est broyé et séché dans un broyeur vertical à galets. Cette opération de broyage permet de réduire la granulométrie du mélange. Le séchage de la matière crue à l'intérieur du broyeur est assuré par les gaz chauds du four. Ces gaz sont ensuite dépoussiérés dans un filtre à manches puis évacués via la cheminée dans l'atmosphère.

Le séchage permet de réduire l'humidité de la farine à moins de 1%.



**Figure 9: situation du broyeur cru dans le processus de fabrication**

#### 4.1.5 Homogénéisation :

A la sortie du broyeur cru, le mélange des matières broyées, appelé farine crue est stocké dans un ou plusieurs silos de stockage et d'homogénéisation.

Dans ces silos, la farine crue est homogénéisée par soufflage d'air sur-pressé. Cette opération permet d'améliorer la régularité des caractéristiques de la farine crue afin d'obtenir ensuite un clinker de qualité régulière.



**Figure 10: Tour d'homogénéisation**

#### 4.1.6 Cuisson de la farine :

La cuisson recouvre toutes les étapes de transformation chimique de la farine crue, jusqu'à la formation du clinker.

Cette opération est fondamentale de la préparation du ciment. Elle est effectuée dans un seul

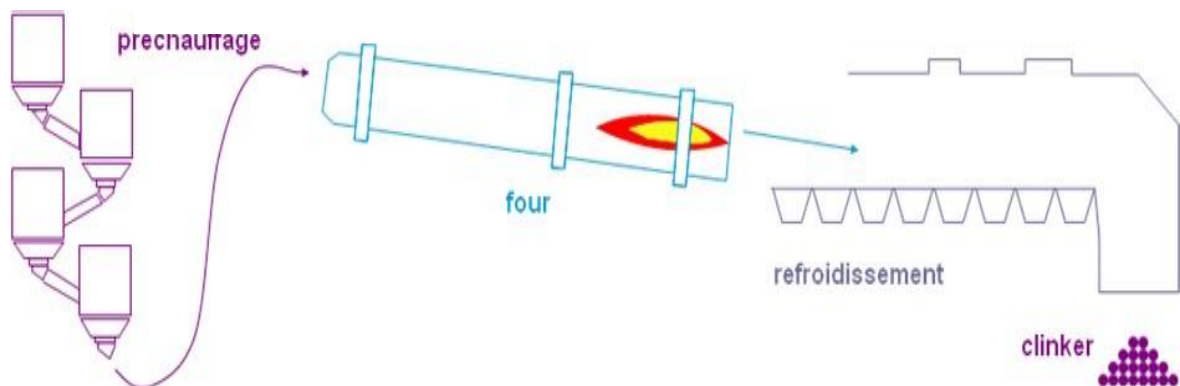
four rotatif (inclinés de 3%) munis d'un pré-chauffeur à 6 étages de cyclones et d'une pré-calcination. Le four fonctionnait en voie humide, converti en voie sèche depuis 1985.

\*combustible solide : coke de pétrole + les pneus déchiquetés + farines animales.

\*combustible liquide : fuel, huiles usagées.



**Figure 11: Four rotatif**



**Figure 12: schéma de l'opération de cuisson**

La farine crue est introduite, après préchauffage et pré-calcination, dans le four où elle avance vers l'aval, sous l'effet combiné de la rotation et la pente du four. Au fur et à mesure de son cheminement, la matière s'échauffe jusqu'à clinkérisation vers les 1450 °C.

#### 4.1.7 Broyage clinker :

Le clinker est additionné d'une faible quantité de gypse (3 à 5 %), indispensable pour réguler la prise du ciment plus autre produit d'addition comme la pouzzolane et l'adjuvant, et le mélange est broyé très finement pour obtenir un « ciment pur ». Utilisés dans des proportions variables. Ces ajouts, d'origine naturelle ou industrielle, confèrent au ciment des propriétés particulières telles que : une perméabilité réduite, une meilleure résistance aux sulfates et aux milieux naturels agressifs, une excellente ouvrabilité, une qualité de finition supérieure.

#### 4.1.8 Ensachage et expédition :

Après broyage, le ciment est expédié par pompes pneumatiques de marque FULLER, ensuite le ciment produit est envoyé vers des silos de stockage du produit fini. Lafarge-holcim dispose de 6 silos d'une capacité de stockage totale de 18 000 tonnes de ciment, et produit trois types : CPJ 35, CPJ 45 et CPJ 55. C'est la variation des dosages des éléments d'addition et la finesse du broyage qui permet de définir les différents types du ciment. La livraison du ciment est vendue en vrac, soit en sacs, par camion ou voie ferrée. Pour la mise en sac, Lafarge-Holcim dispose de 7 ensacheuses : Trois rotatives (Haver), et quatre ensacheuses statiques (Bates), ainsi que deux stations de chargement du vrac.

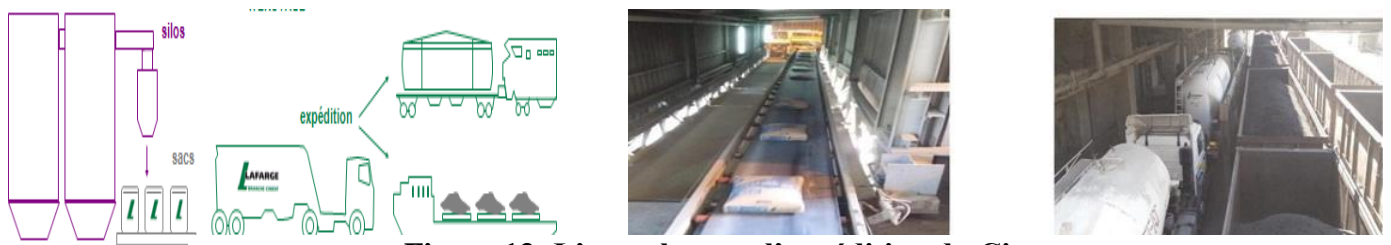


Figure 13: L'ensachage et l'expédition du Ciment

## 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.



**Chapitre 3 :**  
**impact finesse cru sur la**  
**consommation énergétique**

L'industrie du ciment est l'une des industries les plus consommatrices d'énergie, sa consommation énergétique est évaluée à « 30-40% » du coût de production. L'intérêt du présent rapport est d'analyser les paramètres effectuant la consommation d'énergie dans un four rotatif cimentier et d'un broyeur vertical, ce qui marque fort ce chapitre une étude complète des facteurs qui influence sur cette consommation « cru, la qualité de combustion et les airs faux ... » et les actions proposés afin d'optimiser la consommation énergétique de l'usine de LAFARGEHOLCIM Meknès.

## 6 Contexte et description du projet :

### 6.1 Description de la mission :

L'objectif de la mission est d'identifier et étudier les causes majeures induisant une surconsommation d'énergie « électrique / calorifique », tout au long du processus de production du ciment.

## 7 Définition de la problématique:

Pour définir la problématique il faut d'abord donner une idée générale sur la ligne de cuisson et le broyeur cru, où la surconsommation d'énergie s'effectue sur ces deux paramètres.

### 7.1 Description du broyeur cru :

L'usine de Meknès dispose de deux broyeurs crus verticaux à trois galets. La capacité nominale de broyage est de  $2 * 120$  t/h. au cours du broyage, le cru est séché par les gaz chauds en provenance de la tour de préchauffage.

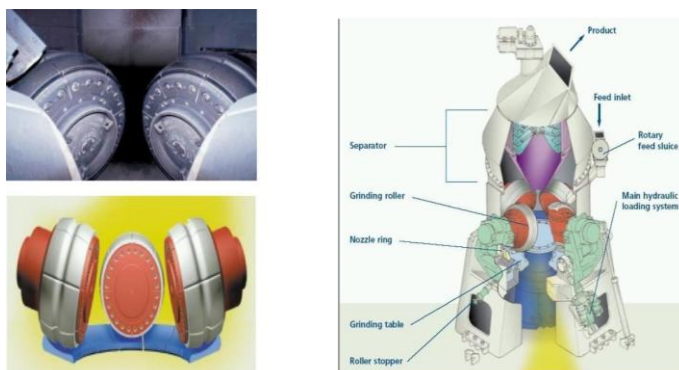


Figure 14: Broyeur cru à trois galets

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

## 7.2 Description de la ligne de cuisson :

Dans le chapitre précédant il paraît évident qu'un bon clinker nécessite une bonne cuisson. On concentre dans un premier temps la préparation de la matière dans la tour à la suite une bonne cuisson dans le four et en fin un refroidissement brusque du clinker.

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide.

- ❑ Dans la voie sèche, les matières premières broyées et séchées forment le cru, ou farine, qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four ou, plus rarement, dans un four tubulaire long en voie sèche.
- ❑ Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- ❑ Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- ❑ Dans la voie humide, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four ou peut passer auparavant dans un sécheur.

Le choix du procédé dépend dans une large mesure de l'état des matières premières (sèches ou humides).

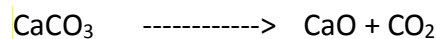


### 7.2.1 Tour à cyclones :

La tour à cyclones est un échangeur de chaleur à voie sèche constituée de six étages. 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). Les gaz parcourent l'édifice de bas en haut alors que la matière le parcourt en sens inverse.

**Évaporation de l'eau :** aussi dite déshydratation (c'est-à-dire le départ de l'eau libre et l'eau combinée). Les granules du cru humide passent dans une grille mobile qui les fait progresser jusqu'au four. Elle est divisée en deux chambres : la première pour le séchage et la 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, accompagnée d'un important dégagement gazeux de CO<sub>2</sub>.

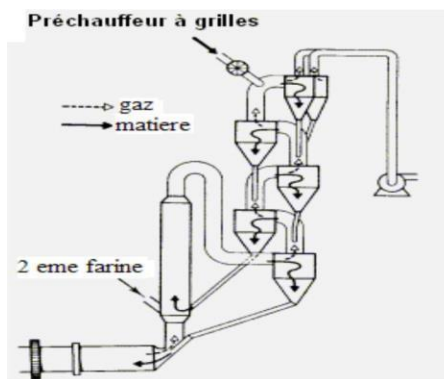


Figure 15: Tour à cyclones

### 7.2.2 Four rotatif :

L'usine dispose de deux fours rotatifs légèrement inclinés dont les caractéristiques sont les suivantes : « la cuisson est effectuée dans un seul four à l'usine de Meknès »

**Tableau 2: Les caractéristiques des deux fours**

	Longueur(m)	Diamètre(m)	Pente(°)	Capacité(t/j)
Four 1	96	3.75	3	1800
Four 2	64	4	3	1200

Le four rotatif constitue la pièce maîtresse d'une cimenterie. C'est un cylindre en acier reposant sur des stations de roulement, garni intérieurement par des produits réfractaires et animé d'un mouvement de rotation. L'avancement de la matière à l'intérieur du four est assuré par la rotation et la pente du four. L'énergie thermique nécessaire pour assurer la cuisson de la farine crue dans le four, est produite par la combustion du petcoke qui est introduit dans le four par :

- ♣ Une tuyère spéciale située en aval du four (dans le cas d'un four sans précalcinateur).
- ♣ Par la tuyère et un précalcinateur situé à un niveau bas de la tour de préchauffage (dans le cas d'un four avec précalcination) en plus du petcoke, des combustibles alternatifs peuvent être utilisés (huiles usagées, pneus déchiquetés, grignons d'olive etc.)

Ainsi au fur et à mesure de l'avancement de la matière dans le four, elle passe par plusieurs stades de transformation :

Elle subit d'abord un séchage, puis un réchauffage entre 400 et 500°C ; elle entre vers dans une zone de décarbonatation et de calcination pour aboutir vers 1450°C à la clinkérisation (transformation de C2S en C3S en présence d'alumine et d'oxyde de fer qui subissent une fusion).

La matière sortante du four est le clinker, elle se présente sous forme de grains gris foncé, arrondis, à surface irrégulière et dont le diamètre peut aller jusqu'à 3 cm.

### 7.2.3 Refroidisseur :

Il est situé à l'aval du four, c'est un refroidisseur à grilles horizontales au nombre de deux à commande hydraulique. Le refroidissement est assuré par onze ventilateurs. L'air produit par ces ventilateurs est insufflé sous les grilles par des chambres de soufflage.

Le refroidisseur a un triple rôle :

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

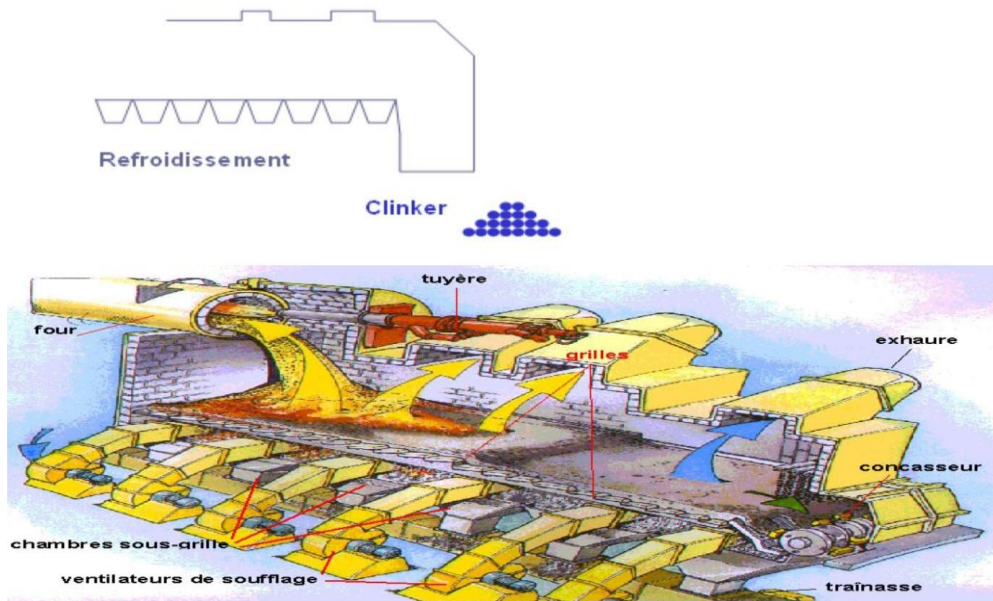


Figure 16: Refroidisseur

### Clinker :

Le clinker est le composé constitué par les nouvelles espèces formées au cours des réactions chimiques, qui se produisent lors de la cuisson de cru dans un four à haute température.

Le clinker est essentiellement composé de quatre phases cristallines :

**Silicates- bi et tricalciques- l'aluminate tricalcique - l'alumino- ferrite de calcium.**



Figure 17: aspect du clinker

## 8 Les causes à analyser pour la consommation énergétique :

Plusieurs facteurs appuient la nécessité de réaliser des diagnostics énergétiques dans

l'industrie cimentière pour identifier les économies d'énergie potentielles et mettre en œuvre des mesures d'économies d'énergie.

**Les principaux axes à traiter sont :**

- A. la qualité de combustion.
- B. L'air faux.
- C. Rendement du four.
- D. Granulométrie de matière.

### 8.1 La qualité de combustion :

**La qualité de la combustion** : finesse crue non maîtrisée nous donne des granulats de grande taille ce qui diminue la surface de contact entre l'oxygène et le combustible alors une combustion incomplète.

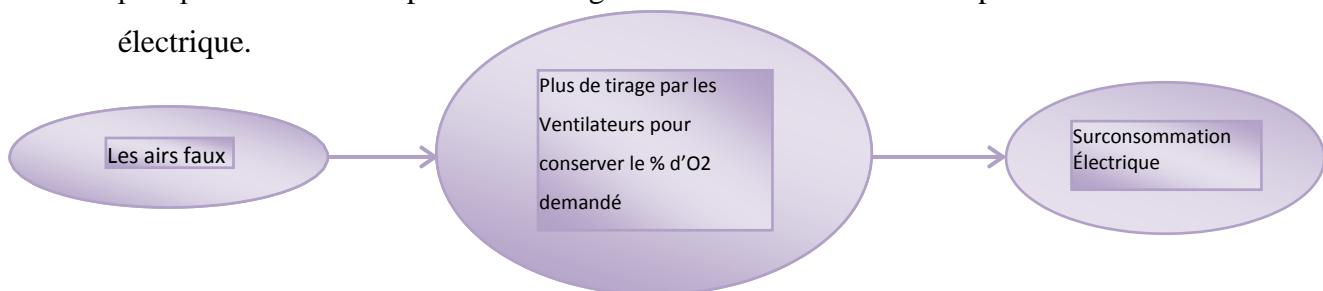
**La qualité de clinker** : une combustion incomplète ne favorise pas la formation de C3S, alors toute la chaux ne peut être saturée et reste sous la forme de chaux non combinée ou chaux libre qui est un paramètre essentiel pour juger la qualité et le degré de cuisson du clinker.

### 8.2 L'air faux :

Les mesures aérauliques permettent de dresser un bilan d'entrée et de sortie des flux d'air à différents points.

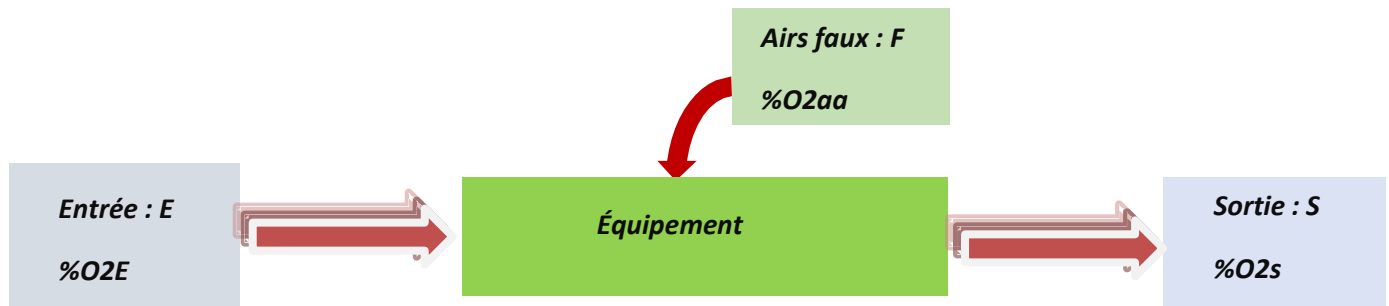
De ce bilan, nous déduisons la quantité d'air frais inutile ajoutée dans le système via des ouvertures qu'il faut boucher.

Cette quantité qui s'appelle –l'air faux-, a un impact négatif sur le processus de broyage, puisqu'il limite la capacité de tirage des ventilateurs et donc pénalise la consommation électrique.



### 8.2.1 Calcul des airs faux en amont du four :

Le calcul de débit d'air faux se fait à l'aide d'un analyseur des gaz, qui permet la mesure du pourcentage d'O<sub>2</sub>, puis le calcul se fait selon la démarche suivante :



Avec :

- ✓ %O<sub>2e</sub> : est le pourcentage d'O<sub>2</sub> dans l'air entré dans l'équipement.
- ✓ %O<sub>2s</sub> : est le pourcentage d'O<sub>2</sub> dans l'air sort de l'équipement.
- ✓ %O<sub>2aa</sub> : est le pourcentage d'O<sub>2</sub> dans l'air ambiant.

Bilan Matière nous donne :

$$E + F = S$$

$$\%O_{2e} \times E + \%O_{2aa} \times F = \%O_{2s} \times S$$

Donc :

$$\%O_{2e} \times E + \%O_{2aa} \times F = \%O_{2s} \times (E + F)$$

$$\Rightarrow (\%O_{2aa} - \%O_{2s}) \times F = (\%O_{2s} - \%O_{2e}) \times E$$

$$\frac{F}{E} = \frac{\%O_{2s} - \%O_{2e}}{\%O_{2aa} - \%O_{2s}}$$

Ainsi on a :

$$\%Airs\ faux = 100 \times \frac{F}{E}$$

Et : %O<sub>2aa</sub> = 21%

Donc Finalement :

$$\%AirsFaux = 100 \times \frac{\%O_{2s} - \%O_{2e}}{21 - \%O_{2e}}$$

### 8.3 Rendement du four :

L'une des techniques qu'il faut adapter pour baisser la consommation calorifique c'est l'amélioration du rendement du four.

$$\text{Rendement du four} = \frac{\text{Debit Clinker}}{\text{Debit farine}} = 0,56$$

Dans notre cas il faut essentiellement limiter les dépôts de la matière dans les parois du four qui constituent la principale cause de la diminution du rendement et diminuer le taux de poussières qui partent avec les gaz sortants de la tour EVS.

#### 8.3.1 Formation des anneaux :

Dans le procédé de fabrication du ciment, il arrive qu'ils se forment dans le four des anneaux par agglomération de fine sur les parois. La formation de ces anneaux influence sur le fonctionnement du four (baisser le rendement), ainsi qu'ils peuvent le boucher.

Les anneaux présentent les problèmes les plus difficiles, et sont due essentiellement a la matière première et aux facteurs d'exploitation et peuvent se résumer comme suit :

- ✓ Composition chimique et minéralogique de la matière première.
- ✓ Composition granulométrique de la matière première.
- ✓ Marche du four à une atmosphère réductrice.
- ✓ Capacité du four.
- ✓ Revêtement réfractaire.

↪ *La composition chimique de la matière première* ne varie pas fortement. Seulement quelque oxyde, comme l'oxyde de fer et l'oxyde alcalin peuvent diminuer la température de l'eutectique s'ils sont présents en quantités essentielles. Plus importante semble être la composition minéralogique de la matière première du fait que les minéraux auxquels sont liés les oxydes ont des propriétés différentes de calcination. La suite des réactions formant le clinker est influencé par ce fait.

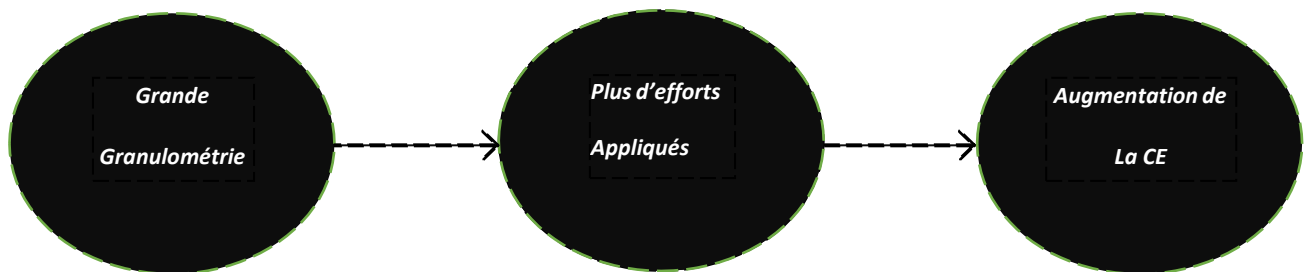
↪ *La composition granulométrique de la matière première* peut avoir une influence essentielle sur la formation d'anneaux ceci est possible dans la mesure où le déroulement normal des réactions entre les composantes solides peut être modifié si les composantes de la matière première sont sous forme de gros grains.

- ↪ On cite souvent *l'atmosphère réductrice* comme cause de la formation d'anneaux. Une théorie d'après laquelle le FeO, formé par réduction de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se lie plus facilement avec SiO<sub>2</sub> qu'avec Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et le CaO, par quoi il se forme une combinaison très facilement fusible qui favorise la formation d'anneaux.
- ↪ La formation d'anneaux dépend de la qualité du combustible, pouvoir calorifique et d'autre part de *la capacité du four*.
- ↪ Le choix d'un *matériau réfractaire* non-approprié peut également forcer la formation d'anneaux, si la composition chimique du matériau réfractaire réagit avec les composants du clinker.

#### 8.4 Granulométrie de la matière :

Le groupe LafargeHolcim exige que les granulats du mélange soient d'une taille de 90 microns et que le refus soit entre 12,5% et 13,5% (selon les mesures effectuées par le laboratoire).

La finesse du produit fini diffère selon la qualité du produit (clinker), chaque qualité exige une finesse bien déterminée. Quand la taille des particules est plus grande, elles nécessitent plus d'efforts pour le broyage et le four donc on doit fournir des KWH et G<sub>j</sub> de plus.



Une mauvaise qualité du clinker est due à certains facteurs:

- ↪ **Composition chimique** de clinker est un facteur important, car un taux faible de C3S favorise le pourcentage de C2S dans le clinker ce qui donne une mauvaise aptitude au broyage ciment et une aptitude moindre à l'obtention de résistance mécanique. Par conséquent une nécessité de broyage plus fin et des dépenses d'énergie plus grande.
- ↪ **Mauvais cuisson et refroidissement long**. Il faut que le refroidissement soit rapide avec une zone de cuisson courte, chose qui donne des petits cristaux favorable à la broyabilité.

## 9 Objectif de l'entreprise :

### 9.1 Pour la consommation électrique d'un broyeur:

#### 9.1.1 La variation de CE en fonction du temps :

Le diagramme présente la consommation électrique (CE) en fonction du temps pendant 4 ans.

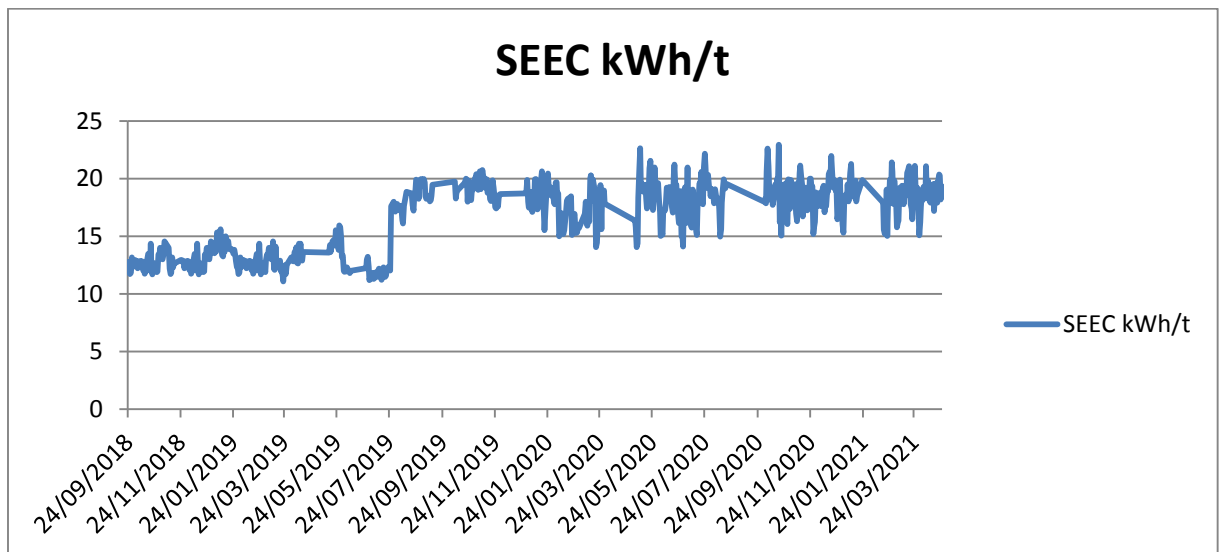


Figure 18: le diagramme présentant la variation du C.E en fct du temps

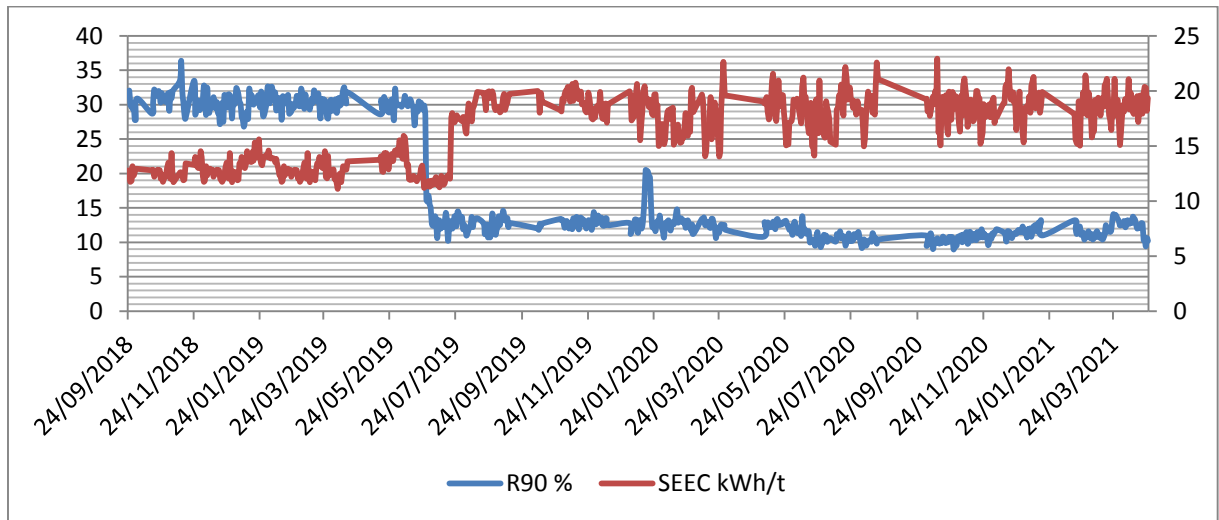
#### ➤ *Interprétation :*

En remarquant de la courbe ci-dessus que la consommation électrique a subi une variation tout au long de ces quatre années, ce changement peut être expliqué par plusieurs facteurs « L'air faux, granulométrie de la matière ».

#### 9.1.2 La variation de CE et la finesse en fonction du temps :

Le diagramme ci dessous nous montre la consommation de l'énergie électrique pour le broyeur cru dans l'usine de Meknès :





**Figure 19: Diagramme la consommation électrique en fonction de la finesse cru**

➤ **Interprétation :**

Ce diagramme nous montre l’influence de la taille de la matière première sur la consommation de l’énergie électrique.

**Tableau 3: comparaison de la consommation électrique dans les deux cas de la finesse crue**

	Cas N° :1 [24/09/2018-01/07/2019]	Cas N° :2 [24/07/2019-24/03/2021]
C.E (KWh/t)	12,5	18
Rejets (%)	30	10

On constate que la consommation électrique (12,5 Kwh/t) est faible pour la période entre 24 Septembre 2018 à 24 juillet 2019 lorsque la moyenne du rejet est grand à peu près 30%. Par contre, pour la période 24 juillet 2019 à 24 Mars 2021 on observe une surconsommation électrique avec la diminution du rejet d’une moyenne 10%.

Cette figure montre que la consommation électrique augmente avec l’augmentation de la finesse crue.

On peut dire que la relation entre les deux paramètres est proportionnelle, ainsi on peut conclure que la finesse du cru à un grand impact sur la consommation électrique.

## 9.2 Pour la consommation calorifique d'un four :

### 9.2.1 La variation de la finesse de cru en fonction du temps :

Cette figure montre la variation de la finesse de cru en fonction du temps d'une période de 3ans.

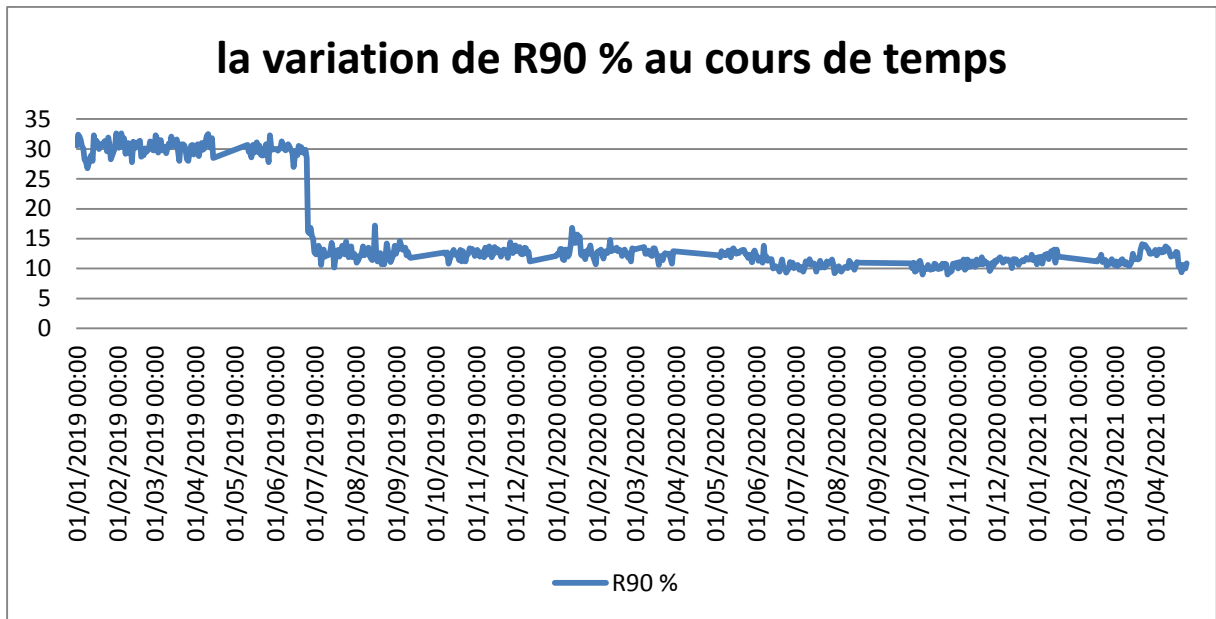


Figure 20: Graphe montrant la variation de R90% au cours du temps

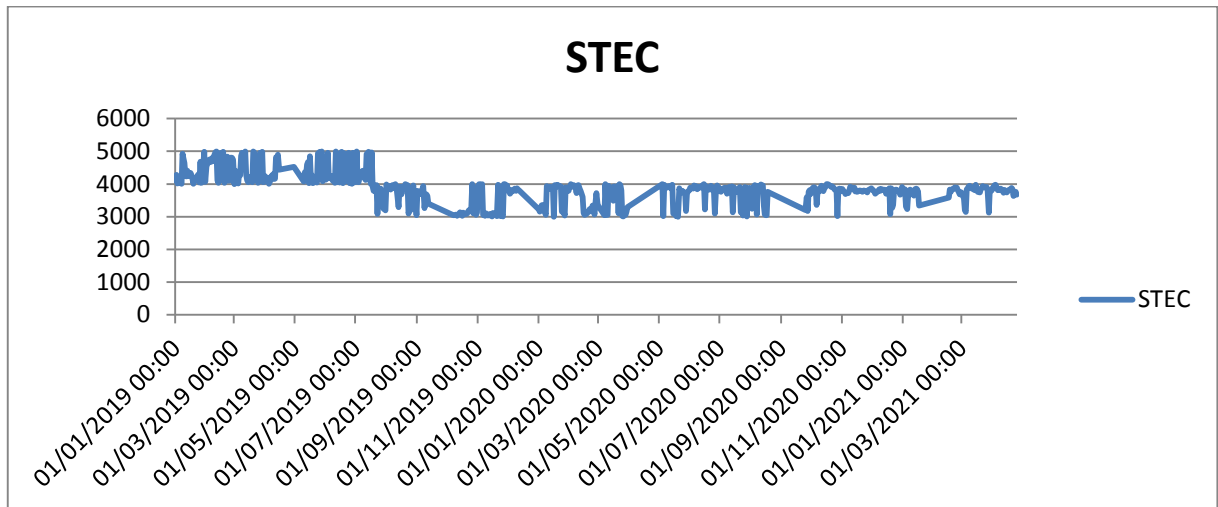
#### ➤ *Interprétation :*

D'après cette courbe, on constate une diminution brutale des rejets au cours de ces trois années [01/07/2019-01/04/2021] avec une moyenne de 10% , elle a connu une stabilité à partir du premier mai de 2020 au premier avril 2021, d'autre part on peut remarquer que la moyenne du rejet d'une période de 6 mois pendant le premier janvier 2019 au premier juillet du même année est de 30% .

Alors on peut conclure que l'usine LAFARGEHOLCIM Meknès a essayé de minimiser les rejets afin d'obtenir une farine crue de granulométrie plus fine.

### 9.2.2 La variation de consommation calorifique en fonction du temps :

Sur la figure suivante figure 22, on présente la consommation calorifique fonction du temps.



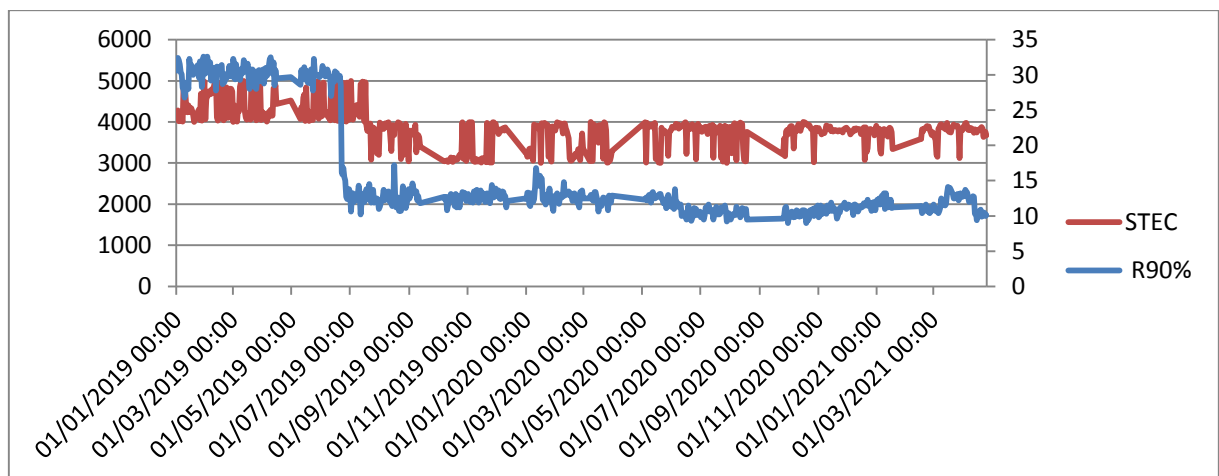
**Figure 21: Graphe présentant la variation de la consommation calorifique en fonction du temps**

➤ **Interprétation :**

En remarquant de la courbe ci-dessus que la consommation calorifique a subi une variation tout au long de ces trois années, une augmentation de la STEC entre le premier janvier 2019 au premier juillet de même année, avec leur diminution de 01/09/2019 à 01/03/2021, ce changement peut être expliqué par plusieurs facteurs qui sont déjà cité dans le paragraphe précédent « la qualité de combustion, rendement du four ».

**9.2.3 Variation du CC et de la finesse de cru en fonction du temps :**

Sur la figure suivante figure 23, on présente le pourcentage de la finesse cru et la consommation calorifique du four en fonction du temps.



**Figure 22: Diagramme la consommation calorifique et de la finesse cru en fonction du temps**

### ➤ *Interprétation :*

D'après ce diagramme on constate qu'il y a une relation entre le pourcentage de la finesse crue et la consommation calorifique en fonction du temps, on observe que la STEC est proportionnelle au pourcentage des rejets « la surconsommation calorifique varie avec la diminution de la finesse crue, et vice versa ».

Alors on peut conclure que la taille de crue a un grand impact sur la consommation calorifique.

## **10 Conclusion :**

Les sources de surconsommation étudiées engendrent d'importantes pertes énergétiques qui se traduisent par des dépenses considérables d'argent. Il paraît que la cause majeure de cette élévation de la consommation énergétique est la finesse crue, pour cela il est indispensable de chercher les moyens les plus efficaces afin de remédier cette problématique et d'assurer la réduction des coûts de production.

## **11 Recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique :**

### **11.1 Partie économique :**

Dans cette partie économique, on va comparer les coûts de consommation calorifique et la consommation électrique afin de savoir laquelle d'entre eux on doit améliorer pour diminuer ce coût, et aussi de répondre à la question de comment il faut agir pour que ces consommations énergétiques soient optimales, et au même temps de respecter la qualité de la matière fabriquée (ciment).

Donc, pour traiter cette problématique on va considérer deux cas la première lorsque le rejet égale à 30% et la deuxième quand il égale 10% ces résultats vont être présentés dans le tableau ci-dessous :

#### **Tableau 4: les coûts de SEEC et STEC en fonction des tailles de la crue**

<u>Les cas des rejets</u>	<u>Cas 1 : rejets à 30%</u>	<u>Cas 2 : rejets à 10%</u>
<u>STEC(MJ)</u>	4500=4,5Gj	3500=3,5Gj
<u>SEEC(KWh/t)</u>	12,5	18
<u>Coûts(Dh)</u>		
<u>STEC :</u>	4,5*30=135Dh	3,5*30=105Dh
<u>SEEC :</u>	12,5*0,7=8,75Dh	18*0,7=12,6Dh

J'ai rempli ce tableau en utilisant les figures 20 et 23

### Et sachant que :

⊗ Consommation électrique : 1 KWh vaut 0.7 Dh

⊗ Consommation calorifique : 1GJ vaut 30 Dh

### ➤ *Interprétations et remarques :*

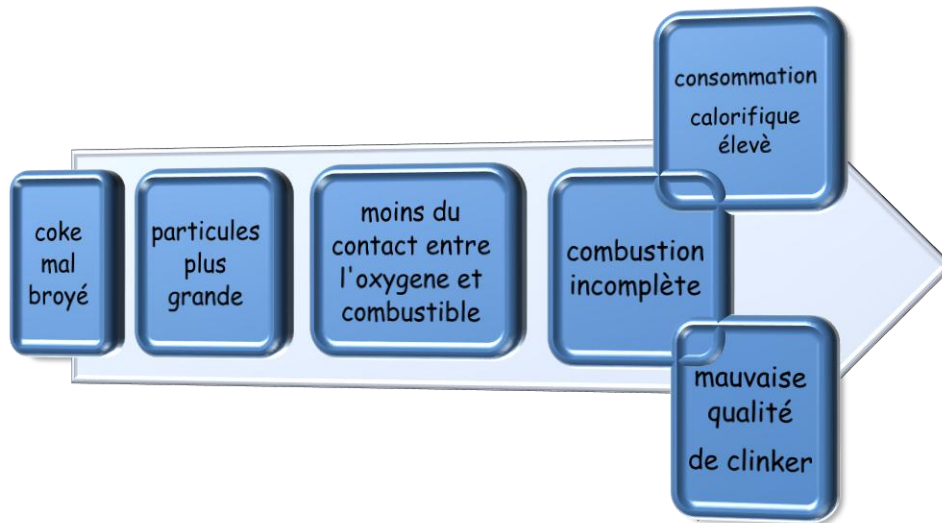
En faisant la comparaison entre les coûts « STEC/SEEC » on peut dire que la relation entre la finesse crue et CC est liée au coût. Cela signifie que la diminution du rejet et CC est proportionnelle à la diminution du coût, par contre quand on diminue le rejet, le coût augmente automatiquement avec la CE.

Si on essaye de réduire le coût de la consommation calorifique et le coût de la consommation électrique augmente, alors il faut savoir comment optimiser les deux en même temps sans élévation du coût et c'est l'objectif qu'on doit atteindre.

## 11.2 Solutions :

### 11.2.1 Qualité de combustion :

Il est nécessaire de vérifier les paramètres du broyeur du coke pour détecter la source du problème de finesse.



### 11.2.2 L'air faux :

Comme nous avons déjà vu, cette prise d'air peut être expliquée par un problème d'étanchéité ou l'apparition des trous en amont du four. 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 points les plus sensibles et la fréquence de progression des airs faux.

### 11.2.3 Rendement du four :

Pour améliorer le rendement du four, il faut respecter les consignes suivantes :

1. Bien adapter la composition chimique, minéralogique et granulométrique de la matière première.
2. Utiliser des combustibles de faible teneur en soufre, et un bon pouvoir calorifique.
3. Adapter le débit farine avec la capacité du four.
4. Utilisation d'un réfractaire de bonne inertie chimique.

### 11.2.4 Granulométrie de la matière :

#### ➡ *L'ajout des agents de mouture :*

Les agents de mouture agissent sur la surface créée lors de la fracturation des particules, ces surfaces sont chargées électriquement, ce qui engendre l'attraction mutuelle des petites particules et donc leur ré-agglomération en formant des amas. Ces agents sont introduits soit à



l'entrée du broyeur soit directement à l'intérieur. Ils sont constitués de substances polarisables, fixées par adsorption à la surface des particules. Ceci atténue l'effet des charges de surface en réduisant leur ré-agglomération.

Les agents de mouture augmentent ainsi l'efficacité du broyage et de la séparation, ce qui permet un gain de productivité, ils permettent donc aux cimentiers d'obtenir la finesse et la qualité de ciment recherchées

Avantages obtenus:

- ✓ Augmentation de débit de production.
- ✓ Réduction de consommation électrique spécifique.
- ✓ Amélioration de la qualité de ciment par une distribution granulométrique plus favorable.



## Conclusion Générale

Ce stage a été très enrichissant où les employés m'ont offert un encadrement de bonne qualité. J'ai appris au cours de ce stage de nouvelles façons de travailler tout en mettant en application ce qui m'a été enseigné à l'université tout au niveau de pratique que théorique.

Au terme de mon sujet « l'impact finesse cru sur la consommation énergétique », j'ai acquis suffisamment de connaissances, et en particulier en ce qui concerne la description du broyeur cru, ainsi la ligne de cuisson du ciment: le fonctionnement du four rotatif, la tour à cyclones et du refroidisseur.

En un premier temps, j'ai voulu montrer l'influence de certains paramètres sur la consommation énergétique. Pour atteindre cet objectif, j'ai effectué une étude sur la qualité de combustion, le rendement du four, la granulométrie de matière, et les airs faux en se basant sur le bilan de matière.

Dans un deuxième temps, j'ai montré le grand effet de la taille du crue sur la consommation énergétique, au cours de ces 3 années [2019-2021] dans le four et 4ans dans le broyeur de [2018-2021].

Enfin, j'ai traité des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique pour optimiser la consommation énergétique et aussi de respecter la qualité du produit fabriqué (ciment).





## Références :

- *Documents internes de l'entreprise.*
- *Anciens rapports de stage.*
- [www.febelcem.be](http://www.febelcem.be)
- [www.lafarge-na.com](http://www.lafarge-na.com)
- [www.medias24.co](http://www.medias24.co)
- [www.lafarge.ma](http://www.lafarge.ma)
- <https://scholar.google.com/>