



Projet De Fin D'études

Réalisé au sein de : LafargeHolcim de Meknès

Préparé par

Mr OUMMOUCH Said

Pour l'obtention de la licence professionnelle

Spécialité : Génie Chimique

Intitulé :

**Optimisation de la consommation spécifique du four
de la ligne de cuisson**

Tuteur société :

Mr. EL MANSOURI Hamid

Tuteur Pédagogique :

Mr. CHAOUQI Mohammed

Soutenu le 08 Juillet 2021 devant les jurys :

- **Pr. CHAOUQI Mohammed**
- **Pr. FARAH Abdellah**
- **Pr. SKALLI Mohamed Khalid**

Année Universitaire : 2020/ 2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avec toute mon affection aux êtres qui me sont très chers au monde mes parents Mustapha et Fatima et ma tante Zineb.

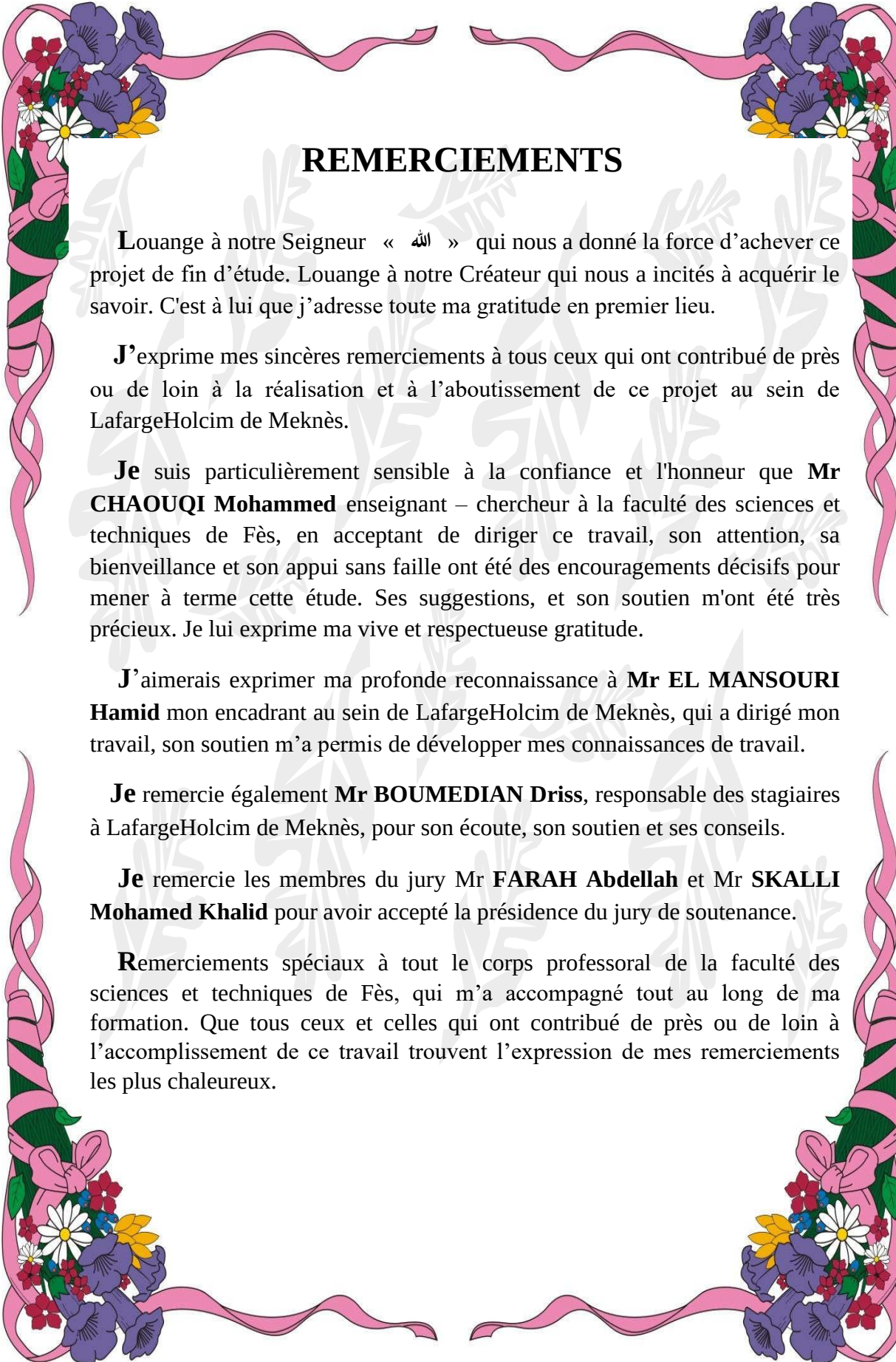
A mon cher frère et à mes deux sœurs : Aziz, Fatima, Kaoutar et toute la famille OUMMOUCH.

A mon petit neveu et ma belle-sœur : Moustapha et Kawtar.

A mes amis surtout : Btissam, Anass, Anir, Oussama, Younes, Noureddine, Zakaria, et toute la promotion 2021 du génie chimique à la FSTF

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, je leur exprime toute ma gratitude et mon profond respect pour les efforts qu'ils ont déployé afin de me soutenir.





REMERCIEMENTS

Louange à notre Seigneur « الله » qui nous a donné la force d'achever ce projet de fin d'étude. Louange à notre Créateur qui nous a incités à acquérir le savoir. C'est à lui que j'adresse toute ma gratitude en premier lieu.

J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation et à l'aboutissement de ce projet au sein de LafargeHolcim de Meknès.

Je suis particulièrement sensible à la confiance et l'honneur que **Mr CHAOUQI Mohammed** enseignant – chercheur à la faculté des sciences et techniques de Fès, en acceptant de diriger ce travail, son attention, sa bienveillance et son appui sans faille ont été des encouragements décisifs pour mener à terme cette étude. Ses suggestions, et son soutien m'ont été très précieux. Je lui exprime ma vive et respectueuse gratitude.

J'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr EL MANSOURI Hamid** mon encadrant au sein de LafargeHolcim de Meknès, qui a dirigé mon travail, son soutien m'a permis de développer mes connaissances de travail.

Je remercie également **Mr BOUMEDIAN Driss**, responsable des stagiaires à LafargeHolcim de Meknès, pour son écoute, son soutien et ses conseils.

Je remercie les membres du jury **Mr FARAH Abdellah** et **Mr SKALLI Mohamed Khalid** pour avoir accepté la présidence du jury de soutenance.

Remerciements spéciaux à tout le corps professoral de la faculté des sciences et techniques de Fès, qui m'a accompagné tout au long de ma formation. Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

Résumé

Le but de chaque cimenterie est d'optimiser sa consommation en énergie calorifique.

Un bilan thermique nous permet de savoir les gains ou les pertes de chaleur de l'atelier de cuisson pendant une période donnée, ce bilan nous permet de détecter plusieurs paramètres influençant la consommation de l'énergie spécifique du four rotatif. Pour ce projet, nous avons travaillé sur quatre paramètres ayant une incidence directe sur l'augmentation de la consommation de l'énergie thermique au niveau de ce four, il s'agit de la finesse du combustible, de la finesse du cru, de la volatilisation du soufre et des pertes au niveau des parois du four.

Après l'examen de chacun des paramètres précédents, on trouve que l'utilisation du coke de pétrole à basse teneur en soufre diminue remarquablement la consommation spécifique. Le broyage non maîtrisé du combustible et/ou du cru augmente cette consommation. L'emplacement d'un isolant thermique « laine de verre » entre l'acier du four et les briques réfractaires diminue les pertes de chaleur au niveau des parois du four.

Mots clés : consommation spécifique, bilan énergétique, chaleur sensible, chaleur latente, ligne de cuisson, four rotatif, diagramme d'Ishikawa, clinker, laine de verre, cru, coke de pétrole, volatilisation du soufre.

Abstract

The aim of each cement plant is to optimize its calorific energy consumption.

A thermal balance allows us to know the heat gains or losses of the cooking workshop during a given period, this balance sheet allows us to detect several parameters influencing the consumption of calorific energy. For this project, we worked on three parameters that have a direct impact on increasing thermal energy consumption, it is the fineness of the fuel, the fineness of the raw material, the volatilization of the sulphur and the reduction of losses at the furnace walls.

After examination of each of the preceding parameters, it is found that the use of low sulphur petroleum coke considerably reduces calorific consumption. Uncontrolled crushing of fuel increases this consumption. The placement of “glass wool” thermal insulation between the furnace steel and the refractory bricks can reduce heat loss at the furnace walls.

Liste des Figures

Figures	Pages
Figure 1 : Localisation de l'usine et des zones en exploitation	2
Figure 2 : Organigramme de LafargeHolcim Meknès	3
Figure 3 : Transfert de chaleur d'un cylindre creux multicouche	10
Figure 4 : Construction du diagramme d'Ishikawa	11
Figure 5 : Entrées et sorties de l'atelier de cuisson	15
Figure 6 : Bilan massique de la ligne de cuisson	17
Figure 7 : Les causes de la consommation spécifique par la méthode du diagramme d'Ishikawa	27
Figure 8 : Résultat d'un coke de pétrole mal broyé	28
Figure 9 : Evolution de la finesse du coke de pétrole	28
Figure 10 : Evolution de la finesse du cru	29

Liste des tableaux

Tableaux	Pages
Tableau 1 : Statut juridique de LafargeHolcim Meknès	3
Tableau 2 : Les caractéristiques du four rotatif	13
Tableau 3 : Composition du clinker	21
Tableau 4 : Résultats du bilan thermique de l'atelier de cuisson	23

Liste des abréviations

FC : Farine crue

CK : Clinker

F : fumées

P : poussière

ASo : Air soufflé

AS : Air secondaire

AF : Air faux

GE : Gaz exhaure

CP : Combustible pour précalcinateur

CF : Combustible pour four

AP1 : Air primaire pour précalcinateur

AP2 : Air primaire pour four

NE : Nord-Est

LH : LafargeHolcim

Table de matière

Introduction générale.....	1
Partie 1 : Présentation de l'organisme d'accueil	
I. Présentation de LafargeHolcim Maroc	2
II. Présentation générale de LafargeHolcim de Meknès.....	2
III. Situation géographique de l'usine	2
IV. Statut juridique	3
V. Organigramme de LafargeHolcim Meknès	3
Partie 2 : Processus de fabrication du ciment	
I. Généralités sur le ciment	4
I.1. C'est quoi le ciment	4
I.2. Le ciment dans l'histoire	4
I.3. Composition chimique du ciment	4
II. Etapes de fabrication du ciment.....	5
II.1. Voix sèche.....	5
II.2. Etapes de fabrication du ciment.....	5
a.Carrière	5
b.Concassage.....	5
c.Pré-homogénéisation	5
d.Broyage et homogénéisation de la farine crue	5
e.Production et stockage du clinker	6
f.Broyage du ciment.....	6
g.Ensachage et expédition du ciment	6
Partie 3 : Etude bibliographique	
I. Notions théoriques pour établir le bilan thermique	8
I.1. C'est quoi le bilan thermique.....	8
I.2. Définitions de la chaleur sensible et de la chaleur latente	8

I.3. Définition de la Combustion.....	8
I.4. Définition du combustible.....	8
I.5. Pouvoir calorifique des combustibles.....	8
I.6. Équations chimiques de base de la combustion	9
I.7. Consommation spécifique.....	9
I.8. Pertes thermiques	9
II. Notions théoriques sur le diagramme d’Ishikawa.....	11
II.1. Définition du diagramme d’Ishikawa.....	11
II.2. Construction du diagramme d’Ishikawa	11
II.3. Etapes de construction du diagramme d’Ishikawa	12
Partie 4 : Ligne de cuisson : Bilan matière, bilan thermique et points d’améliorations	
I. Présentation de l’unité de cuisson	13
I.1. Tour de préchauffage	13
I.2. Four rotatif	13
I.3. Refroidisseur	14
II. Bilan de matière et bilan thermique de la ligne de cuisson.....	15
II.1. Bilan de matière de la ligne de cuisson.....	16
II.2. Bilan thermique de l’atelier	17
III. Problématique	25
III.1. Consommation spécifique	25
III.2. Pourcentage des pertes au niveau du four rotatif.....	26
IV. Points d’améliorations.....	27
IV.1. Finesse du combustible	27
IV.2. Finesse du cru	29
IV.3. La volatilisation du soufre	29
IV.4. Pertes thermiques	30
Conclusion générale	32

Introduction générale :

La demande en ciment devient de plus en plus forte d'où la demande en énergie calorifique. Les cimenteries doivent faire des efforts pour optimiser cette consommation spécifique.

La fabrication du ciment est un procédé complexe et gourmand en énergie. L'étape la plus importante est la transformation des minerais de calcaire, du schiste, du sable et du fer en clinker dans le four de cuisson. Une cimenterie type récupère les gaz brûlés du four pour préchauffer la matière première avant de l'enfourner. Au fur et à mesure de la montée en température de la zone de cuisson, les minerais fondent partiellement et réagissent pour former le clinker, qui deviendra ensuite du ciment en additionnant des ajouts correctifs.

Notre travail au sein de l'entreprise LafargeHolcim de Meknès s'inscrit dans le cadre d'amélioration de la consommation spécifique de l'usine en localisant les sources des pertes au niveau du four rotatif et les paramètres influençant cette énergie.

De ce fait le présent rapport sera structuré comme suit :

D'abord, Dans la première partie, nous allons présenter la société LafargeHolcim de Meknès, puis dans la deuxième partie, nous allons dévoiler l'ensemble des étapes conduisant à la fabrication du ciment, et dans la troisième partie nous allons donner les différentes notions de bases et finalement la quatrième partie sera consacré sur le bilan de matière, le bilan thermique et aux points d'améliorations.

Partie 1 :

Présentation de l'organisme d'accueil



Nous allons consacrer cette partie pour présenter LafargeHolcim de Meknès, en précisant son statut juridique et son organigramme.

I. Présentation de LafargeHolcim Maroc

LafargeHolcim Maroc est né de la fusion en 2016 de Lafarge Ciments et Holcim Maroc, donnant naissance au leader national des matériaux de construction.

La stratégie de l'entreprise repose sur les principes fondamentaux d'une croissance durable, à l'écoute de l'évolution de la société, et respectueuse de l'environnement et de toutes les parties prenantes.

II. Présentation générale de LafargeHolcim de Meknès

LafargeHolcim de Meknès s'engage à être l'entreprise la plus performante, la plus engagée pour assurer la sécurité des personnes.

En termes de maîtrise technique de la qualité des produits du 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.

III. Situation géographique de l'usine

La cimenterie de LafargeHolcim de Meknès est située au NE de la ville de Meknès, à proximité de Hay Ouislane et la route nationale de Meknès et Fès.

La figure 1 représente les lieux de situation de la cimenterie et des carrières de LafargeHolcim de Meknès.



Figure 1 : Localisation de l'usine et des zones en exploitation

IV. Statut juridique

Le tableau 1 montre le statut juridique de LafargeHolcim de Meknès.

Nom	LafargeHolcim de Meknès
Siège social	Km 8, route de Fès – Meknès BP 33 et 233
Nature juridique	Société Anonyme
Capital social	702 937 200,00 dirhams
Capacité de production	1 250 000 tonnes/an
Produits fabriqués	• CPJ45 • CPJ35 • CPJ55

Tableau 1 : Statut juridique de LafargeHolcim Meknès

V. Organigramme de LafargeHolcim Meknès

Le schéma de la figure 2 révèle l'organigramme de LafargeHolcim de Meknès.

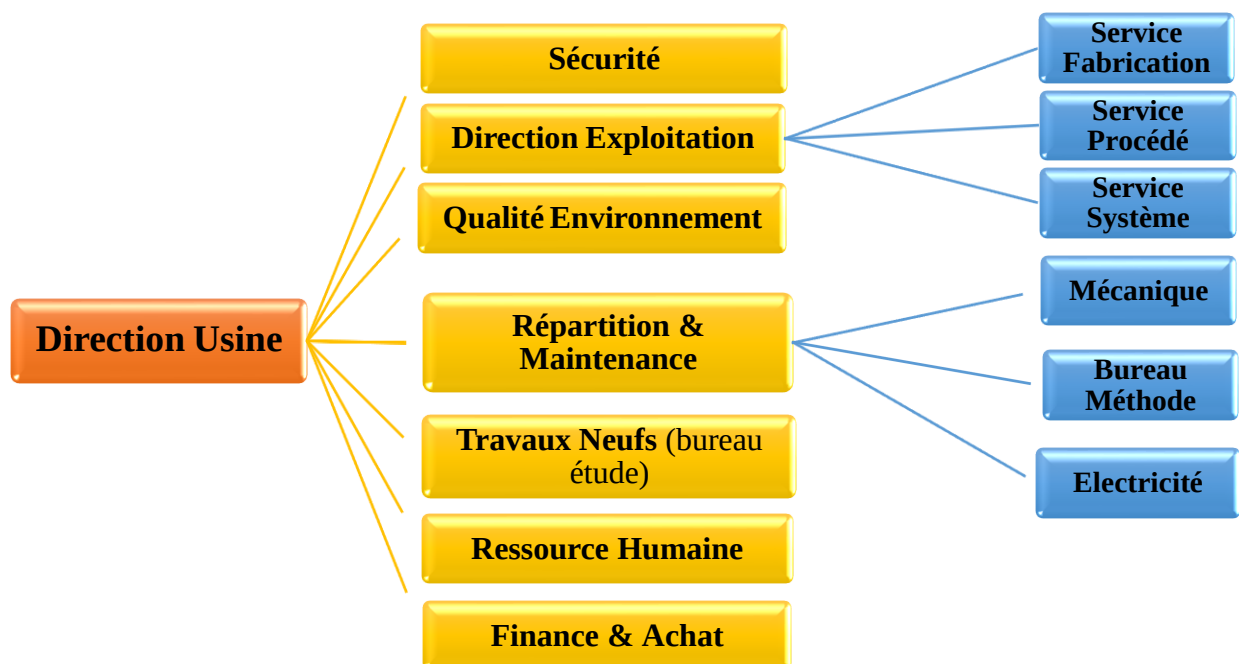
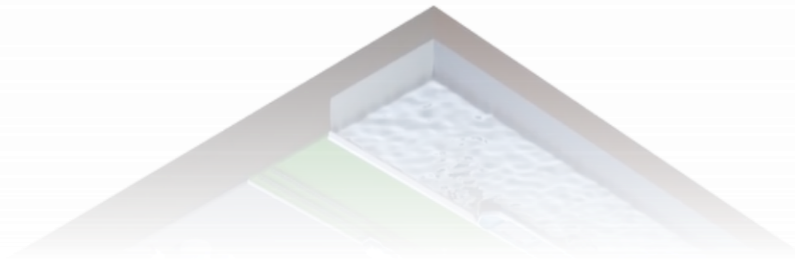
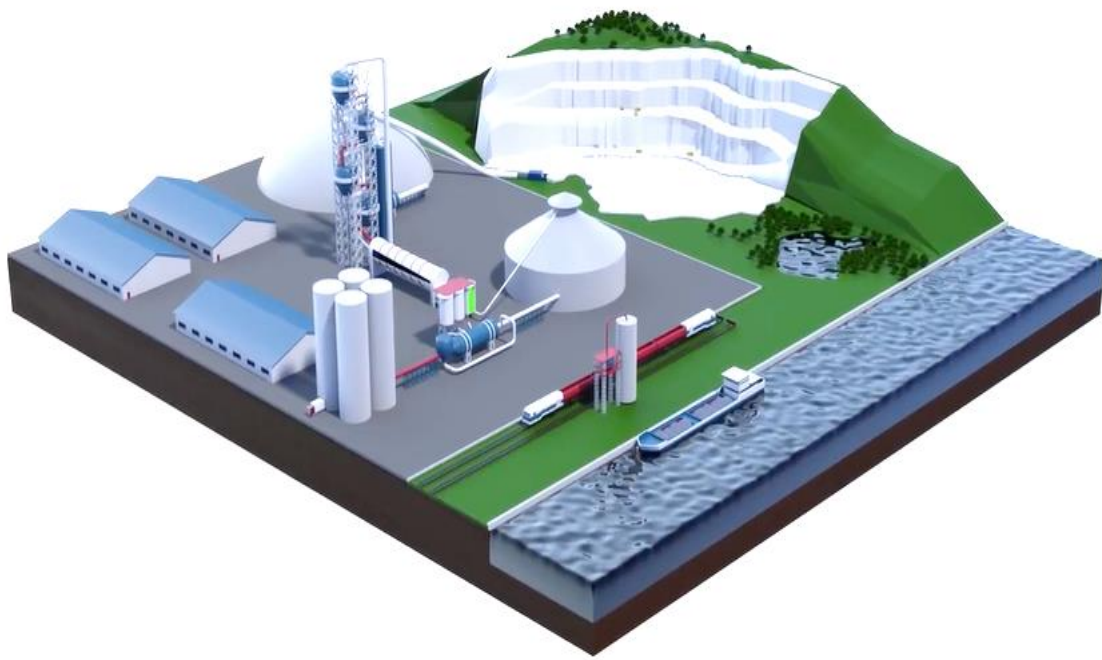


Figure 2 : Organigramme de LafargeHolcim Meknès

Partie 2 :

Processus de fabrication du ciment



Nous allons voir dans cette partie le processus de fabrication du ciment.

I. Généralités sur le ciment

I.1. C'est quoi le ciment

Le ciment est une poudre minérale très fine qui s'hydrate grâce à l'eau et forme une pâte qui durcit progressivement à la suite. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau mais elle est vulnérable.

I.2. Le ciment dans l'histoire

Si on revient dans l'histoire, on va dire que les égyptiens sont eux qui ont découvert la chaux grasse à cause de la cuisson des roches de calcaires dans des température arrivant à 1000°C , suivie d'une extinction avec de l'eau, c'est-à-dire après avoir cuit ces roches le mélange obtenu est trempé à l'eau et après ils obtiennent la chaux grasse.

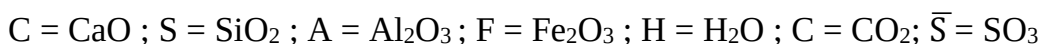
En 1824, le ciment porte le nom de PORTLAND parce que la couleur du ciment obtenue est proche aux roches qui se trouvent dans la région PORTLOND.

I.3. Composition chimique du ciment

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment proviennent d'une carrière proche à la cimenterie afin de diminuer les coûts de transport. Ces matières sont essentiellement composées du calcaire et d'argile.

Le composé de base des ciments est le clinker, ce dernier est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches de calcaires. L'alumine, le silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles.

Les éléments majeurs entrant dans la composition du ciment sont :



Les oxydes **C**, **S** et **F** sont présents dans les matières premières et vont former les silicates et les aluminates de calcium du clinker :

- Silicate tricalcique (alite) : C_3S
- Aluminate tricalcique (célite) : C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique : C_4AF
- Silicate bicalcique (bélite) : C_2S

Pour finaliser le ciment, on ajoute au clinker :

- Le gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} : \bar{\text{C}}\bar{\text{S}}\bar{\text{H}}_2$

II. Processus de fabrication du ciment

LafargeHolcim de Meknès utilise la voie sèche pour la fabrication du ciment, donc nous allons détailler cette voie en présentant toutes les étapes conduisant la formation du ciment.

II.1. Voie sèche

La matière première concassée, broyée et homogénéisée est acheminée vers le four sous forme de farine crue pour réaliser sa cuisson. Cette voie est la moins coûteuse en termes de consommation spécifique par rapport aux autres voies tel que la voie humide, la voie semi-humide et la voie semi-sèche.

II.2. Etapes de fabrication du ciment

Une cimenterie se dispose de trois lignes de fabrications,

- Ligne de fabrication du cru ;
- Ligne de la cuisson ;
- Ligne de fabrication du ciment.

a. Carrière

La synthèse du clinker exige des matières premières qui apportent les oxydes nécessaires, et ces matières premières sont extraites de la carrière qui peut-être à ciel ouvert ou sous terrain.

b. Concassage

Pour faciliter le stockage et le transport des matières premières, les blocs extraits au niveau de la carrière sont introduits dans un concasseur pour réduire leurs dimensions.

c. Pré-homogénéisation

La pré-homogénéisation permet l'extraction des impuretés et permet aussi d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment (90% de calcaire et 10% d'argile).

d. Broyage et homogénéisation de la farine crue

• Dosage cru

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

• Broyage cru

Le broyage se fait à des broyeurs à barres consistant à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique.

- **Dépoussiérage**

Après le broyage de la matière, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela on dispose d'un électrofiltre qui libèrent la matière des gaz.

- **Homogénéisation**

L'homogénéisation de la farine produite se fait dans un silo de stockage.

e. Production et stockage du clinker

Le clinker est un produit artificiel obtenu par la cuisson de la farine, cette production se fait en quatre étapes : séchage et préchauffage de la farine crue, décarbonatation de la farine crue, clinkérisation et refroidissement du clinker.

La ligne de cuisson comprend trois éléments :

- **Tour de préchauffage**

Les gaz chauds formés dans le four sont tirés par un ventilateur et circulant à grande vitesse dans les cyclones de la tour échangeur. La farine entre à la partie supérieure de la tour et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer ensuite dans un précalcinateur qui contient les gaz de combustion du coke de pétrole. Un grand pourcentage de la matière se décarbonate dans cette étape.

- **Four rotatif**

La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée, poursuit son parcours dans un four rotatif incliné. Le chauffage est assuré par une flamme installée en aval du four. La farine crue entre au four, est chauffée jusqu'à la température de frittage ou clinkérisation de 1450 °C. Dès lors les minéraux qu'elle contient, réagissent pour donner des nouvelles combinaisons minéralogiques principalement des silicates et des aluminates de calcium : le clinker.

- **Refroidisseur à clinker**

Le clinker sortant du four passe sur le refroidisseur où il est trempé rapidement par l'air froid soufflé. Ce processus permet la récupération de la chaleur du clinker.

f. Broyage du ciment

Le clinker formé se présente sous forme de grains, ce dernier et les ajouts (gypse et pouzzolane) sont introduits au niveau d'un broyeur horizontal à boulets pour produire le ciment.

g. Ensachage et expédition du ciment

Le ciment produit est envoyé à des silos afin d'alimenter les ateliers d'ensachage ou les diapositives de chargement. Donc la livraison du ciment se fait soit en sacs ou en vrac.

- **Ensachage**

L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de supprimeurs au niveau des silos de stockage.

- **Expédition**

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

Partie 3 :

Etude bibliographique

I. Notions théoriques pour établir le bilan thermique

I.1. C'est quoi le bilan thermique

Le bilan thermique nous permet d'avoir une idée sur la bonne marche d'un procédé en caractérisant toutes les entrées et les sorties pour détecter les différentes pertes au niveau du processus.

I.2. Définitions de la chaleur sensible et de la chaleur latente

- **Chaleur sensible**

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

- **Chaleur latente**

La chaleur latente est la quantité de chaleur qu'il faut fournir ou enlever à un corps pour modifier son état physique sans changer sa température.

I.3. Définition de la Combustion

Une combustion est une réaction chimique entre le combustible et le comburant dont l'intérêt principal est d'être fortement exothermique. Dans la réalité, il ne s'agit pas d'une seule réaction chimique mais de plusieurs réactions élémentaires conduisant à une cinétique chimique complexe.

I.4. Définition du combustible

Le combustible est une substance (solide, liquide ou gaz) possédant dans un petit volume une forte quantité de chaleur qui l'est susceptible de céder à l'extérieur. Cette quantité de chaleur ne pourra être révélée qu'en mettant le combustible en contact avec O_2 de l'air.

I.5. Pouvoir calorifique des combustibles

C'est la chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse (1Kg) ou de volume ($1m^3$) de combustible. On distingue deux types de pouvoir calorifique, le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)**

C'est l'énergie résultant de la combustion à laquelle on ajoute l'énergie que la vapeur d'eau restitue à son environnement en se condensant.

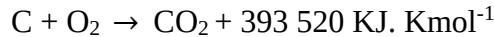
- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)**

C'est l'énergie résultant de la combustion sans tenir compte de l'énergie consacrée à la vaporisation de l'eau. En technologie cimentière, c'est le pouvoir calorifique inférieur qui est à considérer car la cheminée évacue toujours les fumées à plus de 100°C.

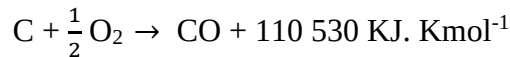
I.6. Équations chimiques de base de la combustion

- **Combustion du carbone**

Elle peut être complète :

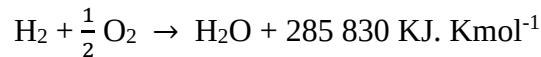


Elle peut être incomplète si le comburant se trouve en quantité insuffisante :

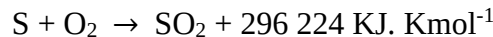


- **Combustion de l'hydrogène**

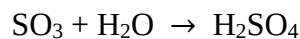
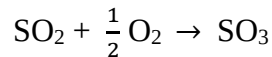
Cette combustion est toujours complète car il n'y a pas de formation de produit incombustible intermédiaire.



- **Combustion du soufre**



L'anhydride sulfureux est un gaz toxique et polluant, en plus conduit à la formation de l'acide sulfurique selon les réactions :



I.7. Consommation spécifique

La consommation spécifique du four est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Consommation spécifique} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot PCI)}{\text{Production clinker}}$$

Avec :

m : Masse du combustible(en Kg) ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible (en KJ/Kg) ;

Production clinker : Quantité produite du clinker (en Kg).

I.8. Pertes thermiques

Les pertes de chaleur dans un système donné par les différents modes de transfert (conduction, convection et rayonnement) constituent une dégradation de la performance

thermique d'un processus. Ce qui augmente la consommation en énergie d'où la nécessité d'isoler le système afin de diminuer le flux de chaleur traversant les parois vers l'extérieur.

- **Cylindre creux multicouches**

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

La figure 3 représente le transfert de chaleur, cas d'un cylindres creux multicouches

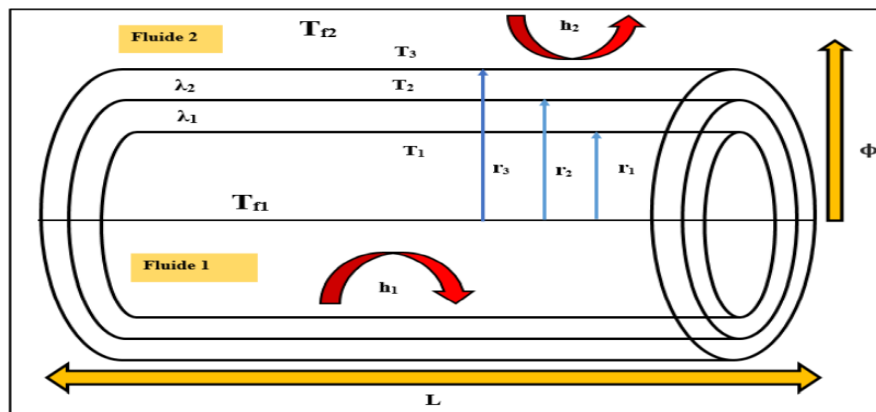


Figure 3 : transfert de chaleur d'un cylindre creux multicouche

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

- **Pertes par conduction et par convection**

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

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

D'où :

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

- **Pertes par rayonnement**

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

Pour une surface réelle :

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

Où :

$\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$: la constante de Stefan ;

ε : le coefficient d'émission du corps.

II. Notions théoriques sur le diagramme d'Ishikawa

II.1. Définition du diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa est une démarche qui permet d'identifier les causes possibles d'un problème ou d'un défaut.

II.2. Construction du diagramme d'Ishikawa

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

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

- M1- Matières : matières premières, pièces, ensembles, fournitures, identification, stockage, qualité, manutention.
- M2 – Matériel : recense des causes probables ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés. Machines, outils, équipements, capacité, maintenance.
- M3 – Main d'œuvre : directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence, d'organisation, de management.
- M4 – Milieu : environnement physique, éclairage, bruit, aménagement, relations, température, climat, marché, législation.
- M5 – Méthodes : instructions, manuels, procédures, modes opératoires.

La figure 4 présente un exemple de construction du diagramme d'Ishikawa.

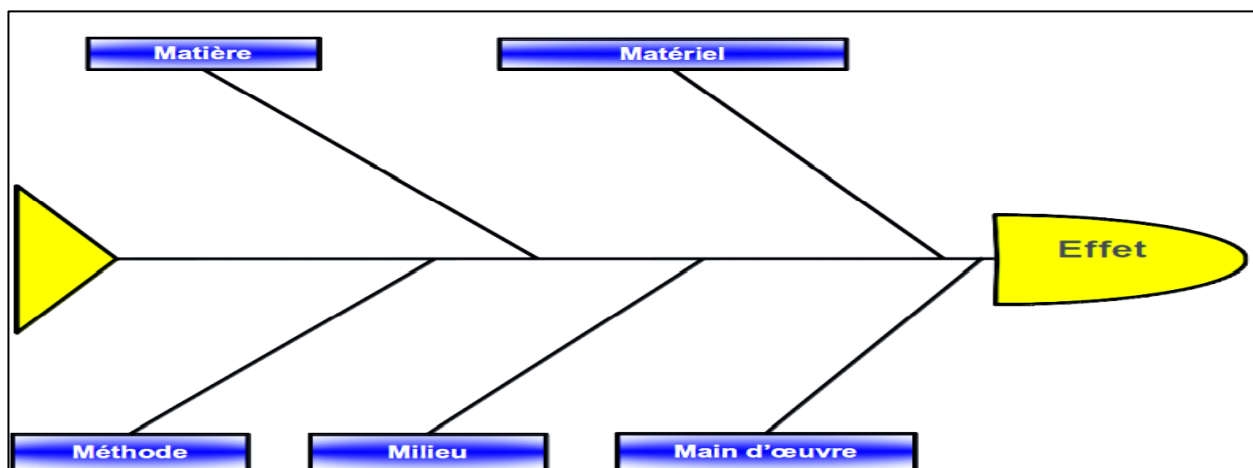


Figure 4 : Construction du diagramme d'Ishikawa

II.3. Etapes de construction du diagramme d'Ishikawa

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

Partie 4 :
Ligne de cuisson :
Bilan matière et bilan thermique
Points d'améliorations

Une brève description de la ligne de cuisson nous aide à déterminer les entrées et les sorties de matières afin d'établir le bilan thermique de cette ligne.

I. Présentation de l'unité de cuisson

La ligne de cuisson est constituée d'une tour de préchauffage, un four rotatif et un refroidisseur.

I.1. Tour de préchauffage

La tour est un échangeur thermique à base de cyclones qui permet de valoriser l'énergie des gaz sortant du four, cette énergie permet de sécher la farine et de commencer le processus de décarbonatation.

- **Réactions à l'intérieur de la tour :**

Les réactions principales qui s'effectuent dans la tour de préchauffage sont :

- 100 – 450°C : Evaporation de l'H₂O existant dans les matières premières.
- 450 – 650°C : Décarbonatation du MgCO₃ → MgO + CO₂
- 800 – 950°C : Décarbonatation du CaCO₃ → CaO + CO₂

I.2. Four rotatif

C'est le lieu où se passent principalement le processus de la clinkérisation et il est le cœur du procédé, il assure le transport de la matière et le transfert de chaleur entre les gaz et la matière.

- **Réactions à l'intérieur du four rotatif :**

Les réactions qui s'effectuent dans le four rotatif sont :

- Formation du bélite C₂S (T = 850 °C) : 2CaO + SiO₂ → 2C₂S
- 900 – 950°C : Finalisation de la décarbonatation du CaCO₃
- 950 – 1200 °C : Formation de la phase liquide C₃A, C₄AF par réaction entre le fer, l'alumine et la chaux CaO.
- 1200 – 1450° : Formation des silicates calciques : C₃S, C₂S par réaction entre le silicate et la chaux et entre le silicate bicalcique et la chaux.

Donc les réactions de clinkérisation qui ont lieu dans le four rotatif sont :

- Formation de la phase liquide par la fusion des composants métalliques C₄AF et C₃A

La réaction entre le C₂S et la chaux CaO donne l'alite C₃S qui constitue la majorité du clinker : $\text{CaO} + \text{C}_2\text{S} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$

Les caractéristiques du four rotatif sont présentées dans le tableau 2 :

Four n°	Longueur	Vitesse de rotation (tour/min)	Rayon intérieur (m)	Rayon extérieur (m)	Pente (°)
1	96m	3.8m	1.7	1.94	3

Tableau 2 : Caractéristiques du four rotatif

I.3. Refroidisseur

Le refroidisseur permet de tremper le clinker chaud qui sort de la zone de cuisson. Le refroidisseur assure trois taches simultanément :

- Tremper le clinker de façon à minimiser toute croissance cristalline et lutter contre la réversibilité de la réaction ($\text{CaO} + \text{C}_2\text{S} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$) afin d'avoir un clinker de meilleure qualité.
- Récupérer le maximum de calories emportées par le clinker à la sortie du four de façon à obtenir un air secondaire et un air tertiaire les plus chauds possibles.

Le refroidissement du clinker de 1450 °C à 140°C donne un air chaud que l'usine valorise :

- **Air secondaire** : air récupéré dans la première partie du refroidisseur qui aide dans le chauffage du four.
- **Air tertiaire** : air chaud transféré au précalcinateur pour assurer la combustion.

Cependant une quantité d'air excédentaire (air exhaure) n'est pas valorisé.

II. Bilan de matière et bilan thermique de la ligne de cuisson

La Figure 4 révèle toutes les entrées et les sorties de l'atelier de cuisson.

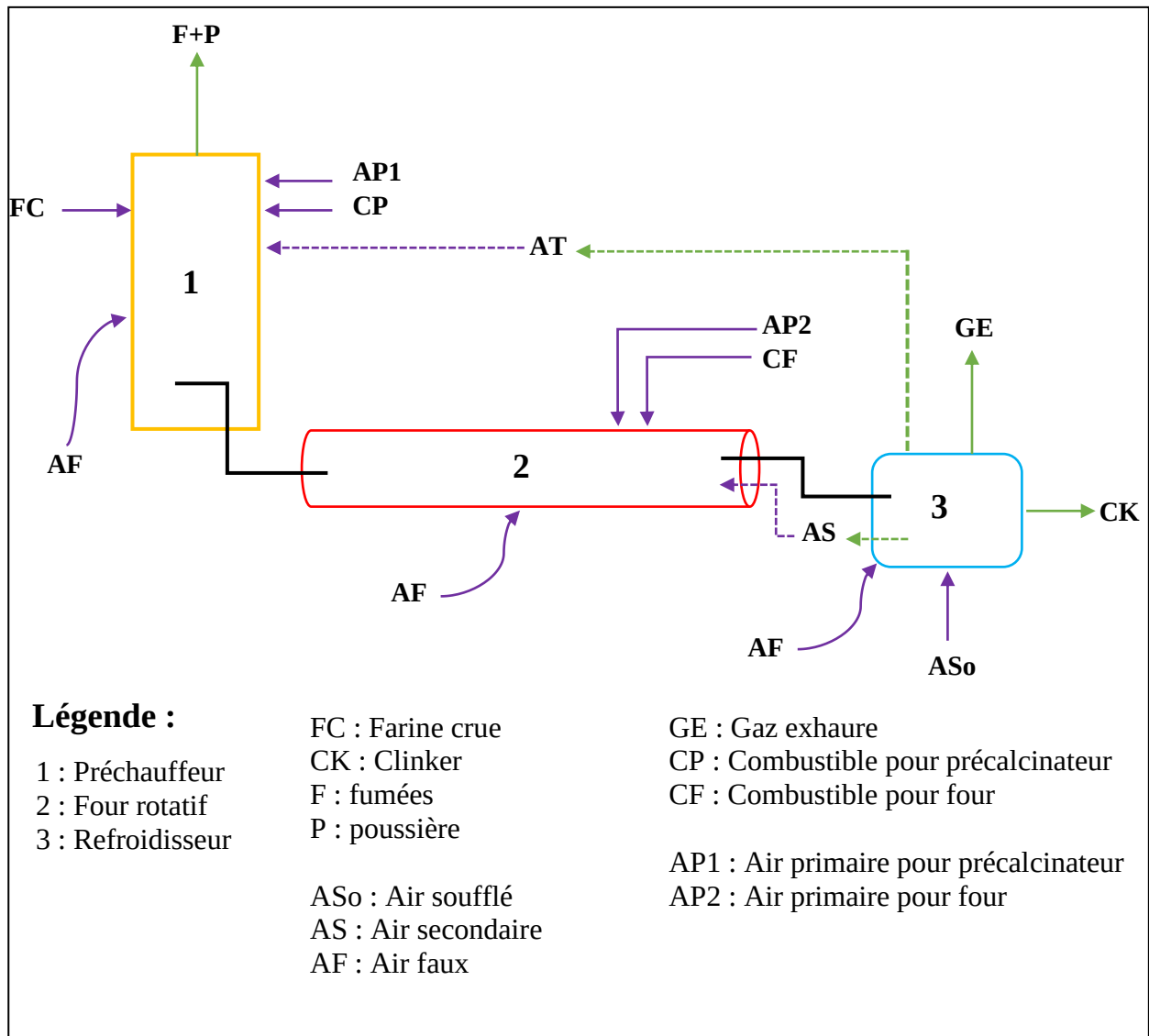


Figure 4 : Entrées et sorties de l'atelier de cuisson

Remarque :

Les flèches pointillées seront simplifiées au niveau de notre bilan.

➤ Les entrées de l'unité de cuisson :

- **Farine crue :** Matières provenant des silos d'homogénéisation.
- **Combustible :** Le coke de combustion dans le four et le précalcinateur.
- **Air primaire :** Air soufflé dans le four et le précalcinateur par deux ventilateurs séparés : il assure la combustion du coke et la stabilité de la flamme, il est divisé en trois parties dans les tuyères : axial, radial et central.

- **Air de refroidissement : (ou air soufflé)** Des ventilateurs qui soufflent l'air dans le refroidisseur pour refroidir le clinker.
- **Air faux** : Air non désiré qui entre par les ouvertures et les joints non étanches.

➤ Les sorties de l'atelier de cuisson :

- **Clinker** : Clinker sortant du refroidisseur.
- **Poussière** : La poussière sortant avec la fumée à la sortie de la tour.
- **Fumée sortie tour** : Gaz sortant de la tour vers la cheminée.
- **Gaz exhaure** : Gaz non récupéré dépoussiéré et refroidi avant de sortir depuis la cheminée.

II.1. Bilan de matière de la ligne de cuisson

- **A l'entrée du préchauffeur on a :**

$D_{fc} = 137.35$ t/h pour LafargeHolcim de Meknès ;

Avec :

D_{fc} : Débit de la farine crue (en t/h).

- **Après, déshydratation d'eau :**

1% du point brut pour LafargeHolcim de Meknès

$$D_{fc} \cdot \frac{1}{100} = 137.35 \times 0.01 = 1.37 \text{ t/h}$$

Donc, $137.35 - 1.37 = 135.98$ t/h de matière sèche

- **Quantité de poussière :**

Pour LafargeHolcim de Meknès la quantité de poussière est 22.24 t/h (Donnée fournie en pesant la poussière).

$$D_{fc} - D_p = 135.98 - 22.24 = 113.74 \text{ t/h après l'arrachement de la poussière.}$$

Avec :

D_{fc} : Débit farine crue (en t/h) ;

D_p : Débit poussière (en t/h).

- **Quantité de de CO_2 dégagée :**

Il y a 81.98% de CaCO_3 et MgCO_3 dans ce qui reste de matière sèche, soit

$$113.74 \times 0.8198 = 93.24 \text{ t/h de } \text{CaCO}_3 \text{ et de } \text{MgCO}_3$$

Or



100 56 44



84 40 44

Donc la quantité de CO₂ dégagée est de : 93.24 x 0.44 = 41 t/h de CO₂ dégagée.

Le schéma de la figure 5 désigne l'entrée de la farine et la sortie du clinker, du CO₂, de H₂O déshydratée et de la poussière au niveau de l'atelier de cuisson.

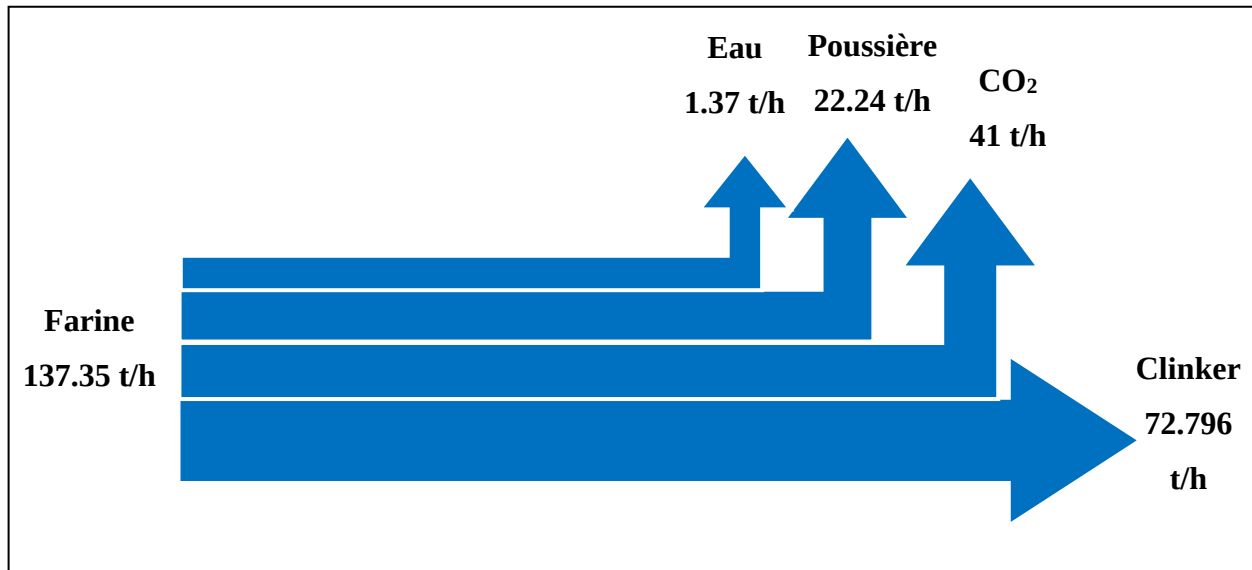


Figure 5 : Bilan massique de la ligne de cuisson

La farine clinkerisable théorique et la farine pesée présente une différence de **47 %** qui est énorme, elle correspond aux pertes poussières, au CO₂ dégagée et à la déshydratation de H₂O.

$$\frac{(\text{Farine pesée} - \text{Farine clinkerisable})}{(\text{Farine pesée})} \times 100 = \frac{(D_{Fc} - (D_{Fc} - D_p))}{D_{Fc}} \times 100$$

$$= \frac{(137.35 - (137.35 - 22.24))}{137.35} \times 100$$

$$= \mathbf{16.2\% \text{ de poussière dégagée}}$$

De même, on : 29.8% de CO₂ dégagée, 1% d'eau déshydratée, 53% de clinker produit.

Avec :

D_{Fc} : débit farine pesée (en t/h) ;

D_p : débit poussière (en t/h).

II.2. Bilan thermique de l'atelier [ANNEXE 1]

Il est nécessaire d'établir les équations qui nous permettent de calculer les différents types de chaleur au niveau de la ligne de cuisson.

On a : $D_{Fc} = 137.35 \text{ t/h}$ et $D_{ck} = 72.796 \text{ t/h} = 72796 \text{ Kg/h}$

Avec :

D_{Fc} : Débit farine crue (en t/h) ;

D_{ck} : Débit clinker (en t/h ou en Kg/h).

➤ **Equations des flux à l'entrée de l'atelier :**

• **Chaleur sensible de l'alimentation farine :**

$$Q = m. C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{D_{Fc}}{D_{ck}} \cdot C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{137.35}{72.796} \times 0.8151 \times 60 = \mathbf{92.27 \text{ kJ/Kg ck}}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible de l'alimentation farine (en kJ/kg ck) ;

m : Masse de la farine rapportée à la masse du clinker (en kg de farine / kg de clinker) (solide) ;

C_p : Capacité calorifique de la farine (en kJ/kg °C) ;

T : Température de la farine (en °C).

• **Chaleur latente du combustible (four) :**

La combustion se déroule dans le four (par le coke de pétrole).

$$Q = m. \text{PCI} = \frac{D_{cf}}{D_{ck}} \cdot \text{PCI} = \frac{3.2}{72.796} \times 31324.92 = \mathbf{1377 \text{ kJ/Kg ck}}$$

Avec :

Q : Chaleur latente du combustible (four) (en kJ/kg ck) ;

m : Masse du combustible four rapportée à la masse du clinker(en kg / kg ck) (solide) ;

D_{cf} : Débit combustible (four) (en t/h) ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible (Coke) (en kJ/Kg Clinker) ;

PCI = ((80,8 * %C) + (22,45 * %S) + (287*(%H - ((%O) /8)))) *100

• **Chaleur latente du combustible (précalcinateur) :**

La combustion se déroule dans le précalcinateur (par le coke de pétrole et les pneus).

$$Q = m. \text{PCI} = \frac{D_{cp}}{D_{ck}} \cdot \text{PCI} = \frac{D_1}{D_{ck}} \times 31324.92 + \frac{D_2}{D_{ck}} \times 27065.5 = \frac{3.9}{72.796} \times 31324.92 + \frac{2.08}{72.796} \times 27065.5$$

$$Q = \mathbf{2451.56 \text{ kJ/Kg ck}}$$

Avec :

Q : Chaleur latente du combustible (précalcinateur) (en kJ/kg ck) ;

m : Masse du combustible précalcinateur rapportée à la masse du clinker(kg / kg ck) (solide) ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible (Coke) (en kJ/Kg Clinker) ;

PCI = ((80,8 * %C) + (22,45 * %S) + (287*(%H - ((%O) /8)))) *100

D_{cp} : Débit combustible (précalcinateur) (en t/h) ;

D₁ : Débit combustible (coke) (en t/h) ;

D₂ : Débit combustible (pneus) (en t/h).

• **Chaleur sensible du combustible :**

$$Q = m. Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{D_c^t}{D_{ck}} \cdot Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{9.18}{72.796} \times 0.80674 \times 31 = 3.15 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible du combustible (en kJ/kg ck) ;

m : Masse du combustible rapportée à la masse du clinker (kg de farine / kg de clinker) (solide) ;

Cp : Capacité calorifique du combustible (en kJ/kg°C) ;

T : Température du combustible (en °C) ;

D_c^t : Débit combustible total (four+ précalcinateur) (en t/h).

• **Chaleur sensible d'air soufflé :**

L'air est soufflé par des ventilateurs, cet air sert à refroidir le clinker sortant du four.

$$Q = V. Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{D_{as}}{D_{ck}} \cdot Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{118\,010}{72\,796} \times 1.3 \times 20 = 42.15 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible d'air soufflé (en kJ/kg ck) ;

V : Volume de l'air soufflé par les ventilateurs du refroidisseur rapporté à la masse du clinker (en m³N/kg Clinker) ;

Cp : Capacité calorifique de l'air soufflé (en kJ/m³N °C) ;

T : Température de l'air soufflé par les ventilateurs du refroidisseur (en °C) ;

D_{as} : Débit d'air soufflé (en m³N/h).

• **Chaleur sensible d'air primaire (four + précalcinateur) :**

La chaleur sensible de l'air primaire (four) est donnée par la formule suivante :

$$Q = V. Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{D_{ap}^{four}}{D_{ck}} \cdot Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{4662}{72796} \times 1.3 \times 75 = 6.24 \text{ kJ/Kg ck}$$

La chaleur sensible de l'air primaire (précalcinateur) est donnée par la formule suivante :

$$Q = V. Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{D_{ap}^{préca}}{D_{ck}} \cdot Cp. (T - 20^{\circ}C) = \frac{3082}{72796} \times 1.3 \times 44 = 2.42 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible d'air primaire (four ou précalcinateur) (en kJ/kg ck) ;

V : Volume d'air primaire rapporté à la masse du clinker (en m³N /kg ck) ;

Cp : Capacité calorifique de l'air primaire (en kJ/m³N°C) ;

T : Température de l'air primaire (en °C) ;

D_{ap}^{four} : Débit de l'air primaire du four (en m³N/h) ;

$D_{ap}^{préca}$: Débit de l'air primaire du précalcinateur (en m³N/h).

- **Chaleur sensible d'air entrant nosering aval :**

$$Q = V \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{D_{na}}{D_{ck}} \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{6000}{72796} \times 1.3 \times 25 = 2.68 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible d'air entrant nosering aval (en kJ/kg ck) ;

V : Volume d'air entrant nosering aval rapporté à la masse du clinker (en m³N/kg ck) ;

C_p : Capacité calorifique de l'air entrant nosering aval (kJ/m³N °C). ;

T : Température de l'air entrant nosering aval (°C) ;

D_{na} : Débit de l'air nosering aval (en m³N/h).

- **Chaleur sensible des airs faux :**

$$Q = V \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{D_{af}}{D_{ck}} \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{33268}{72796} \times 1.3 \times 20 = 11.88 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible des airs faux (en kJ/kg ck) ;

V : Volume des airs faux rapportés à la masse du clinker (en m³N/kg ck) ;

C_p : Capacité calorifique des airs faux (en kJ/m³N °C) ;

T : Température des airs faux (en °C) ;

D_{af} : Débit des airs faux (en m³N/h).

- **Chaleur latente de la farine crue :**

$$Q = m \cdot \text{PCI} = \frac{D_{Fc} \cdot \%TOC}{D_{ck}} \times \text{PCI} = \frac{137.35 \times 0.0017}{72.796} \times 32604 = 104.58 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur latente de la farine crue (en kJ/kg ck) ;

m : Masse de la farine rapportée à la masse du clinker (en kg / kg ck) (solide) ;

PCI : Le pouvoir calorifique inférieur du carbone (en kJ/Kg Clinker) ;

%TOC : Titre du carbone organique dans le cru.

➤ Equations des flux à la sortie de l'atelier :

- **La chaleur sensible des fumées sortie préchauffeur :**

$$Q = V \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{D_{fs}}{D_{ck}} \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{107665}{72796} \times 1.51 \times 364 = 812.37 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible des fumées (en kJ/kg ck) ;

V : Volume des fumées sortie préchauffeur rapporté à la masse du clinker (en m³N /kg ck) ;

C_p : Capacité calorifique des fumées sortie préchauffeur (en kJ/m³N °C). ;

T : Température des fumée sortie préchauffeur (en °C) ;

D_{fs} : Débit des fumée sortie préchauffeur (en m³N/h).

• **Chaleur sensible de la poussière :**

$$Q = m. C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{D_p}{D_{ck}} \cdot C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{22.24}{72.796} \times 0.94 \times 364 = 104.12 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible de la poussière (en kJ/kg ck) ;

m : Masse des poussières rapportée à la masse du clinker (en Kg/ Kg Clinker) ;

C_p : Capacité calorifique des poussières (en kJ/kg °C) ;

T : Température des poussières (en °C) ;

D_p : Débit des poussières (en m³N/h).

• **Chaleur sensible de l'air exhaure refroidisseur :**

C'est l'air sortant du refroidisseur et qui participe dans le séchage du Coke dans l'atelier de charbon.

$$Q = V. C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{D_{ae}}{D_{ck}} \cdot C_p. (T - 20^{\circ}\text{C}) = \frac{86409}{72796} \times 1.34 \times 471 = 750.16 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible de l'air exhaure refroidisseur (en kJ/kg ck) ;

V : Volume de l'air exhaure à la masse du clinker (en m³N /kg Clinker) ;

C_p : Capacité calorifique de l'air exhaure (kJ/m³N °C) ;

T : Température de l'air exhaure (°C) ;

D_{ae} : Débit d'air exhaure (en m³N/h).

• **Chaleur latente de la poussière :**

$$Q = m. \text{PCI} = \frac{D_p \cdot \% \text{TOC}}{D_{ck}} \times \text{PCI} = \frac{22.24 \times 0.0017}{72.796} \times 32604 = 16.93 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur latente de la poussière (en kJ/kg ck) ;

m : Masse de la poussière rapportée à la masse du clinker(en kg / kg ck) (solide) ;

PCI : pouvoir calorifique inférieur du carbone (en kJ/Kg Clinker) ;

%TOC : Titre du carbone organique dans le cru.

• **Chaleur de vaporisation :**

$$Q = m \cdot E \cdot L_{vap} = \frac{137.35 \cdot \frac{1}{100}}{72.796} \times 2491.28 = 47 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur de vaporisation (en kJ/kg ck) ;

L_{vap} : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à pression atmosphérique ;

E : Humidité de la farine crue (en %) ;

m : Masse de la farine crue rapportée à la masse du clinker (en Kg de farine / Kg ck).

• **Chaleur de CO :**

$$Q = \frac{3000}{10^6} \cdot \frac{D_{fs}}{D_{ck}} \cdot \text{PCI} = \frac{3000}{10^6} \times \frac{107665}{72796} \times 12624 = 56.01 \text{ kJ/Kg ck}$$

Avec :

Q : Chaleur latente de CO (en kJ/kg ck) ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du monoxyde carbone (kJ/Kg Clinker) ;

3000ppm : Quantité de CO sortante du préchauffeur.

• **Chaleur de formation :**

La chaleur de formation englobe toutes les réactions principales pour transformer le Clinker, Pratiquement on utilise la formule de H. zurStrassen pour calculer la chaleur de formation.

$$\Delta h = 3200 \cdot X_{CaO} + 2710 \cdot X_{MgO} - 2140 \cdot X_{SiO_2} - 250 \cdot X_{Fe_2O_3} + 1720 \cdot X_{Al_2O_3}$$

Le tableau 3 présente la quantité des composants dans le clinker en %, et leur enthalpie libre en kJ/% :

	CaO	MgO	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	Reste
Quantité en %	66.07	1.27	20.83	3.46	5.18	3.19
Enthalpie libre [kcal / %]	7.554	6.484	5.116	0.59	4.11	0

Tableau 3 : Composition du clinker

Donc, d'après ce tableau :

$$\begin{aligned} \Delta h &= 7.554 \times 66.07 + 6.484 \times 1.27 - 5.116 \times 20.83 - 0.59 \times 3.46 + 4.11 \times 5.18 \\ &= 420 \text{ Kcal/Kg ck} \\ &= 1755.6 \text{ kJ/ Kg ck} \end{aligned}$$

- **Chaleur sensible du clinker :**

$$Q = m. C_p. (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{D_{na}}{D_{ck}} \cdot C_p. (T - 20^\circ\text{C}) = \frac{72796}{72796} \times 0.807 \times 140 = \mathbf{112.94 \text{ kJ/Kg ck}}$$

Avec :

Q : Chaleur sensible du clinker (en kJ/kg ck) ;

m : Masse du clinker rapportée à la masse du clinker (en kg de clinker / kg de clinker) (solide) ;

C_p : Capacité calorifique du clinker (en kJ/Nm³ °C) ;

T : Température des airs faux (en °C).

- **Pertes thermiques du four :**

(Regardez la partie théorique pour plus de détails).

Les pertes par convection et par conduction sont exprimées par la relation suivante :

$$\Phi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi \lambda_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi \lambda_2 L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_2 L}} = \frac{910 - 20}{\frac{1}{18 \times 2\pi \times 1.7 \times 96} + \frac{\ln(\frac{1.9}{1.7})}{2\pi \times 4 \times 96} + \frac{\ln(\frac{1.94}{1.9})}{2\pi \times 52 \times 96} + \frac{1}{10 \times 2\pi \times 1.94 \times 96}}$$

Donc, $\Phi = 4.91 \cdot 10^6 \text{ Watts} = 243 \text{ KJ/Kg ck}$

Les pertes par radiation sont obtenues d'après la loi de Stefan-Boltzmann :

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

Avec :

$\epsilon = 0.25$ pour l'acier constituant la virole du four, $\sigma = 0.25 \times 5.68 \times 10^{-8}$

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

$$S_{\text{cylindre}} = 2\pi \times r_3 \times L = 2\pi \times 1.94 \times 96 = 1170\text{m}^2$$

Donc, $\Phi' = \ddot{Q} \cdot S_{\text{cylindre}} = 0.25 \times 5.68 \times 10^{-8} \times 303.24^4 \times 1170 = \mathbf{143.48 \cdot 10^3 \text{ watts}}$

Ou, $\Phi' = 7.10 \text{ kJ/Kg ck}$

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

$$\Phi_{\text{pertes}} = \Phi + \Phi' = 243 + 7.1 = \mathbf{250.1 \text{ kJ/Kg ck}}$$

- **Pertes thermiques du préchauffeur :**

$$Q = 121.22 \text{ kJ/Kg ck}$$

- **Pertes thermiques du refroidisseur :**

$$Q = 33.44 \text{ kJ/Kg ck}$$

L'ensemble des résultats sont mentionné dans le tableau 4.

Bilan thermique de l'atelier de cuisson	
Entrée	Chaleur en (kJ/Kg ck)
Chaleur sensible de l'alimentation farine	92.27
Chaleur du combustible (four)	1377
Chaleur du combustible (précalcinateur)	2451.56
Chaleur sensible du combustible	3.15
Chaleur sensible d'air soufflé	42.15
Chaleur sensible d'air primaire (four)	6.24
Chaleur sensible d'air primaire (précalcinateur)	2.42
Chaleur sensible d'air entrant nosering aval	2.68
Chaleur sensible des airs faux	11.88
Chaleur latente de la farine crue	104.58
Total des entrées	4094
Sorties	Chaleur en (kJ/Kg ck)
La chaleur sensible des fumées sortie préchauffeur	812.37
Chaleur sensible de la poussière	104.12
Chaleur sensible de l'air exhaure refroidisseur	750.16
Chaleur latente de la poussière	16.93
Chaleur de vaporisation	47
Chaleur de CO	56.01
Chaleur de formation	1755.6
Chaleur sensible du clinker	112.94
Pertes thermiques du four	250.1
Pertes thermiques du préchauffeur	121.22
Pertes thermiques du refroidisseur	33.44
Total des sorties	4060
Différence (entrée – sortie)	34

Tableau 4 : Résultats bilan thermique de l'atelier de cuisson

Interprétation

La valeur de 34 kJ/kg ck de chaleur indéterminée constitue 0.83% de la chaleur totale entrante dans l'atelier, la source la plus probable de cette chaleur est les erreurs de mesures, cependant, la valeur est faible et montre que nous avons pris en compte les entrées et les sorties.

III. Problématique

La réaction de clinkérisation nécessite une température très élevée, ce qui conduit à une énorme dépense énergétique au cours du processus de la cuisson du clinker.

Un bon démarrage du four conduit à une bonne cuisson de la matière mais il est nécessaire d'avoir de bonnes sources énergivores (combustibles).

Durant mon stage, il m'a été demandé d'optimiser l'énergie spécifique du four rotatif.

III.1. Consommation spécifique

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

$$\begin{aligned}\text{Consommation spécifique} &= \frac{\text{Energie calorifique}}{\text{production}} \\ &= \frac{\sum_1^n m_i * PCI}{\text{production clinker}} \\ &= \frac{D_{cf} * PCI + D_1 * PCI + D_2 * PCI}{D_{ck}} * 36\% \\ &= \frac{(3200 \times 7494 + 3900 \times 7494 + 2080 \times 6475) \cdot 4.18}{72796} * 36\% \\ &= 1378 \text{ KJ/Kg ck}\end{aligned}$$

Avec :

m_i : Masse du combustible (en Kg) ;

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible (en kJ/Kg) ;

Production clinker : Quantité produite du clinker (en Kg) ;

D_{cf} : Débit combustible (four) (en t/h) ;

D_1 : Débit combustible (coke) (en t/h) ;

D_2 : Débit combustible (pneus) (en t/h).

$$36\% = \frac{D_{four}}{D_{four} + D_{précalcinateur}} \times 100$$

III.2. Pourcentage des pertes au niveau du four rotatif

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

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

Avec :

$\phi_{\text{Combustion}}$: Chaleur fournie par le combustible (en KJ) ;

ϕ_{Utile} : Chaleur utilisée par le système (en KJ) ;

ϕ_{Pertes} : Chaleur perdue dans l'air en (KJ).

- **Flux de combustion :**

$$\begin{aligned}\phi_{\text{Combustion}} &= \sum_1^n m_i * \text{PCI} = D_{\text{cf}} * \text{PCI} + D_1 * \text{PCI} + D_2 * \text{PCI} \\ &= (3200 \times 7494 + 3900 \times 7494 + 2020 \times 6475) \cdot 4.18 \\ &= 278.7 \cdot 10^6 \text{ KJ / h}\end{aligned}$$

- **Pertes thermiques :**

(Regardez partie calcul pertes thermiques du four)

Les pertes thermiques sont déjà calculées lors de l'établissement du bilan thermique.

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

$$\phi_{\text{pertes}} = \phi + \phi' = (243 + 7.11) * 72796 = 18.21 \cdot 10^6 \text{ KJ/h}$$

- **Ensemble des pertes du four :**

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

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\phi_{\text{pertes}}}{36\% \cdot \phi_{\text{combustion}}} \times 100 \\ &= \frac{18.21 \cdot 10^6}{\frac{36}{100} \times 278.7 \cdot 10^6} \times 100 \\ &= 18.15\%\end{aligned}$$

Avec :

$$36\% = \frac{D_{\text{four}}}{D_{\text{four}} + D_{\text{précalcinateur}}} \times 100$$

IV. Points d'améliorations

Il y a plusieurs paramètres qui influent la consommation spécifique.

La figure 6 révèle tous les paramètres augmentant l'énergie calorifique présentées dans le diagramme d'Ishikawa. [Document internes de l'entreprise]

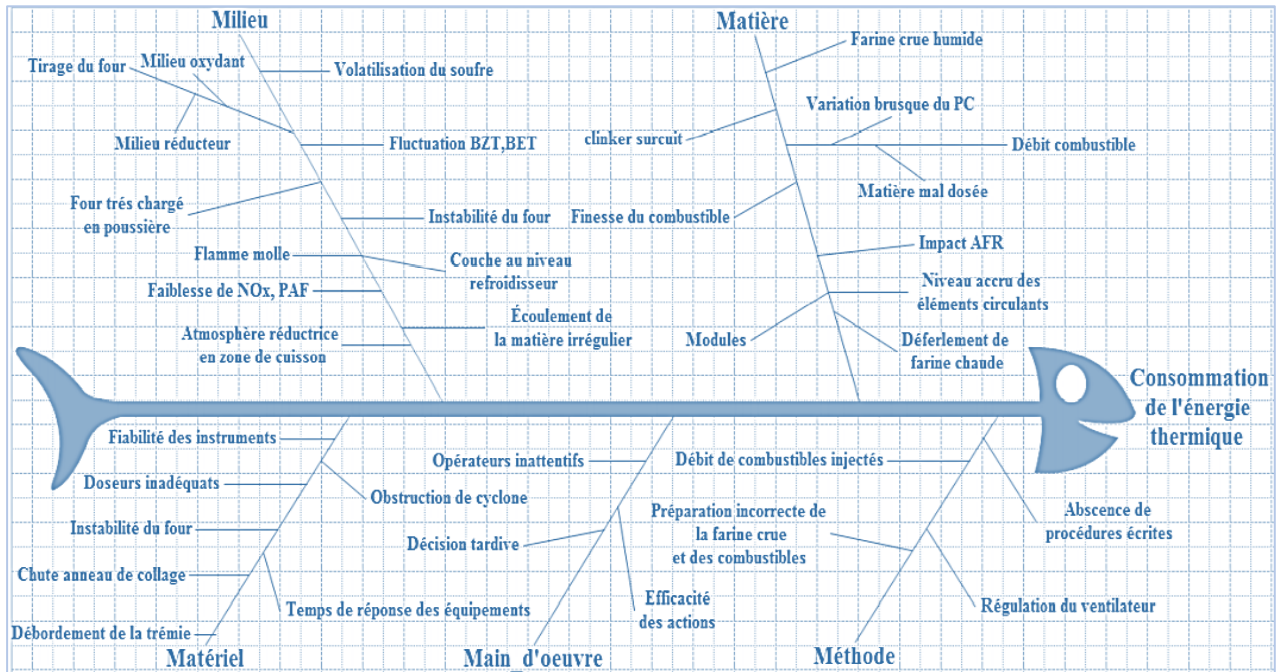


Figure 6 : Les causes de la consommation spécifique par la méthode du diagramme d'Ishikawa

Il paraît à partir du diagramme de la figure 6 qu'il y a plusieurs paramètres pouvant influencer la consommation de l'énergie thermique. Pour ce projet, nous avons travaillé sur quatre paramètres ayant une incidence directe sur l'augmentation de la consommation de l'énergie thermique, il s'agit de la finesse du combustible, de la finesse du cru, de la volatilisation du soufre et des pertes au niveau de la paroi du four.

IV.1. Finesse du combustible

La maîtrise du broyage du combustible est indispensable pour avoir des grains de petites tailles, s'ils sont de grandes tailles, on aura une diminution de la surface de contact entre l'oxygène et le combustible alors une combustion incomplète, et ça va causer une consommation de l'énergie calorifique élevée.

Le schéma de la figure 7 montre le résultat d'un coke de pétrole mal broyé.

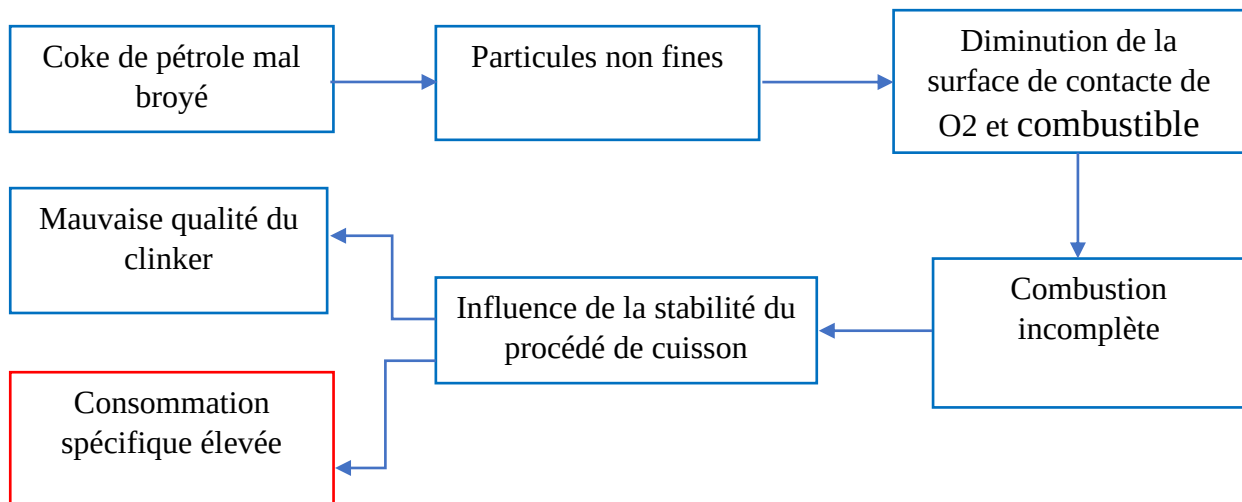


Figure 7 : résultat d'un coke de pétrole mal broyé

La figure 8 représente l'évolution de la finesse du combustible : [ANNEXE 2]

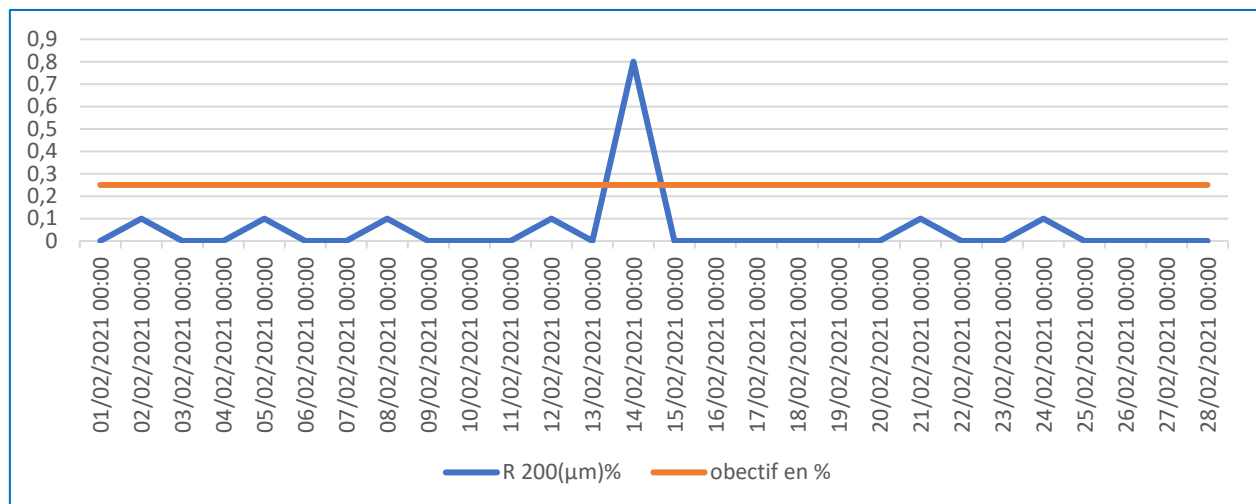


Figure 8 : Evolution de la finesse du coke de pétrole

Interprétation

On remarque d'après la figure 8, qu'on a dépassé la norme le 14/02/2021 (la finesse du combustible doit être entre 0 et 0.25%). Cela influe : La qualité de la combustion car la finesse est non contrôlée, les granulats sont de grandes tailles ce qui diminue la surface de contact entre l'oxygène et le combustible donc une combustion incomplète. Cela conduit à une augmentation des besoins calorifiques en combustible pour la cuisson du clinker.

Solution

Il faut s'assurer d'un bon broyage de combustibles.

Il faut s'assurer d'un bon séchage du combustible pour faciliter sa combustion.

IV.2. Finesse du cru

La finesse des matières premières conduit à une augmentation de la surface d'échange entre les particules, et ça nous permet d'avoir une bonne clinkérisation et donc la température de cuisson va diminuer ce qui diminue la consommation spécifique.

La figure 9 présente l'évolution de la finesse du cru. : [ANNEXE 3]

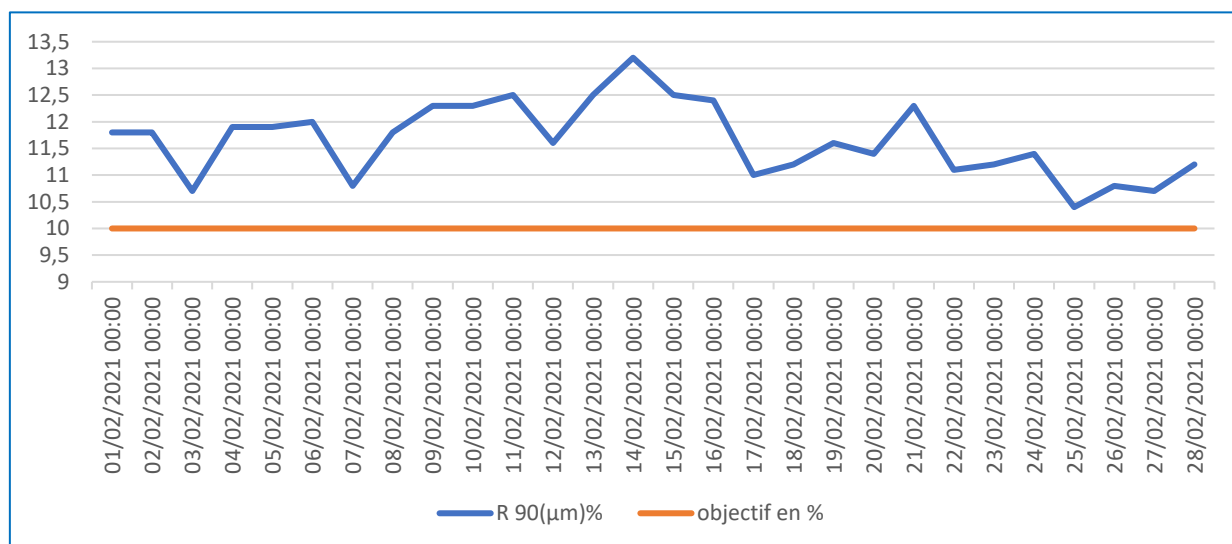


Figure 9 : Evolution de la finesse du cru

Interprétation

On remarque d'après le graphe qu'il n'y a pas de fluctuation de la finesse du cru sauf entre le 14/02/2021 si non on peut dire que ce paramètre est respecté et que le broyage du cru est adéquat et donc il y a moins d'impact sur la consommation spécifique (une finesse entre 10 et 12.5% est acceptable).

IV.3. La volatilisation du soufre

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

➤ Changement du type du coke de pétrole :

Auparavant, le coke de pétrole utilisé dans le four de LafargeHolcim de Meknès était de type haute teneur en soufre (HTS), la chose qui a augmenté la volatilité durant la combustion et par conséquent a agrandi la consommation spécifique. L'amélioration de cet inconvénient a été

au niveau du type du combustible utilisé. Il fallait donc le changer par un autre type de coke de pétrole ayant une teneur inférieure en soufre (MTS).

Donc on peut dire que la consommation spécifique a une tendance parallèle avec la variation du tonnage du coke de pétrole.

IV.4. Pertes thermiques

Les briques réfractaires protègent les fours rotatifs de la chaleur interne.

Ces briques peuvent perdre leurs valeurs et leur qualité donc, il est nécessaire de les suivre par des entretiens afin de ne pas avoir des corrosions.

Si les briques réfractaires sont dégradées, la température s'élève dans certaines parties du four et le débit farine diminue ce qui nécessite une vérification de son état d'épaisseur.

- **Isolant thermique :**

Il existe des pertes par conduction ou par convection au niveau du four on se propose de trouver un matériau qui résiste à la température et qui peut refléter une grande quantité de la chaleur vers l'intérieur du four. Ce matériau est la **laine de verre**.

« **Laine de verre** » ; c'est un matériau isolant thermique permet de lutter contre les incidents puisqu'elle est incombustible. Son coefficient de conduction est : $\lambda_{LV} = 0.04 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$. L'épaisseur de l'isolant thermique joue un rôle important dans la diminution des pertes thermiques, lorsque on augmente l'épaisseur on diminuera automatiquement plus des pertes. La laine de verre peut supporter des températures allant jusqu'à 600°C d'environ. On propose de mettre cet isolant thermique entre l'acier et les briques réfractaires.

Interprétation finale

Si le broyage du combustible et celui du cru est maîtrisé et en utilisant un coke de pétrole à basse teneur en soufre et en mettant un isolant thermique « laine de verre » entre l'acier du four et les briques réfractaires, on trouve que la consommation spécifique du four diminue, mais comme remarque, il y a d'autres paramètres mentionnés dans le diagramme d'Ishikawa influençant cette consommation spécifique. Si tous les paramètres sont bien traités, la valeur de la consommation spécifique du four diminue de **1378 KJ/Kg ck**, et s'approche à la valeur idéale qui est de **1296 KJ/Kg ck**.

Synthèse :

	OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DU PROCESSUS
Action	Optimisation de la ligne de cuisson (four rotatif).
Etape du processus	Cuisson du clinker au niveau du four rotatif.
Problématique	Consommation de l'énergie spécifique.
Bénéfices	Economie réalisée sur la consommation spécifique.
Description	D'après le bilan thermique de la ligne de cuisson on a constaté qu'il y a des paramètres qui influent la consommation spécifique. Ces paramètres sont traités suivant la procédure ci-dessous.
Procédure	Assurer une bonne combustion : - Une granulométrie très fine est essentielle pour que l'air brûle rapidement les particules de combustible. Préparation du cru : -Une préparation du cru nécessite une composition chimique bien déterminées, un broyage fin et un bon préchauffage dans la tour de préchauffage. Changer le type du coke de pétrole : -Il faut changer le coke de pétrole de haute teneur en soufre par un coke de pétrole de basse teneur en soufre. Diminuer les pertes au niveau du four : - ‘‘laine de verre’’ : isolant thermique permettant de diminuer les pertes au niveau de la paroi du four rotatif. -Suivre les briques par des entretiens afin de ne pas avoir des corrosions.

Conclusion générale :

Notre travail, qui a pour objectif l'optimisation de la consommation spécifique du four de la cimenterie LafargeHolcim de Meknès, a commencé par l'établissement d'un bilan thermique afin de détecter les différentes pertes qui perturbent la consommation spécifique.

Le diagramme d'Ishikawa s'est avéré d'une grande utilité, puisqu'il a détecté les causes possibles ayant un impact sur la consommation d'énergie thermique. Afin d'optimiser la consommation spécifique du four, nous sommes basés sur l'amélioration du broyage du combustible et du cru, nous avons aussi changé le coke de pétrole de haute teneur en soufre par un coke de pétrole de basse teneur en soufre et finalement nous avons utilisé la laine de verre comme isolant thermique entre l'acier du four et les briques réfractaires.

La tuyère permet de préparer et de contrôler la combustion du mélange air/combustible dans le four. Un bon fonctionnement de la tuyère est important pour assurer une bonne flamme en respectant les meilleures valeurs d'impulsion et de swirl. L'optimisation du réglage de la tuyère nécessite une recherche profonde, chose que j'aimerais prospecter et découvrir prochainement.

BIBLIOGRAPHIE

Documents internes de l'entreprise

WEBOGRAPHIE

https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/clm_bref_0510_VF_1.pdf

<https://www.infociments.fr/>

<https://www.lafargeholcim.ma/fr>

<https://www.techniques-ingenieur.fr/>

<https://www.chimix.com/>

http://leeanmanufacturing.com/wp-content/uploads/2014/06/Ishikawa_ppt.pdf

<https://chemicalengineeringworld.com/pid-vs-isometric-drawing/>

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-chimie-15837/>

ANNEXES :

[ANNEXE 1]

Burning line heat balance											
Material In	Nm3/kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpy	Material Out	Nm3/kgkk	Kg/kgkk	T°C	Cp	Enthalpy
Fuels						Exit preheater					
Fuels downstream		0,04			329,4	Waste gases	1,479	1,91	364	0,361	194,3
Fuels upstream		0,08			586,5	Sensible heat of dust		0,31	364	0,224	24,9
Sensible heat of fuels		0,13	31	0,193	0,8	Latent heat of dust		0,00			4,1
						H2O vapour raw meal		0,02			11,2
Raw Meal						H2O vapour water nodules		0,00			0,0
Raw meal		1,89	60	0,195	22,1	H2O vapour Fuel		0,00			0,1
Latent heat of raw meal		0,0032	62		25,0	CO	0,0044				13,4
Water nodules		0,00	60	1,002	0,0	Preaheater wall loses					29,0
						KILN wall loses					60,0
						Theoric Heat					420,0
Air						Cooler					
Air blown	1,389		20	0,311	8,6	Exhaust 1	1,187		471	0,321	179,3
Primary air kiln	0,064		75	0,311	1,5	Exhaust 2	0,000		0	0,000	0,0
Primary air precalciner	0,042		44	0,311	0,6	Exhaust 3	0,000		0	0,000	0,0
Pneumatic air	0,000		0	0,000	0,0	Cooler wall loses					8,0
Air entering nosering	0,082		25	0,311	0,6	Clink. Cooler exit		1,00	140	0,193	27,0
Air inleakage upstream	0,457		20	0,311	2,8						

Kiln Primary Air					
	PA cold	PA hot	Other	Fuel Transp.	Total
Flow (Nm3/h)	1493		913	2256	4662
Flow (Nm3/s)	0,41	0,00	0,25	0,63	1,30
Flow (Nm3/KgKK)	0,021	0,000	0,013	0,031	0,064
Temperature	135,5	41,5	36,0	50,0	75

	Nose inf.	Nose sup.	Total		Pyro.	Others	Cam/Win.	Total
Flow (Nm3/h)	6000	0	6000		1	0	0	1
Flow (Nm3/s)	1,67	0,00	1,67		0,00	0,00	0,00	0
Flow (Nm3/KgKK)	0,082	0,000	0,082		0,000	0,000	0,000	0
Temperature	25	0	25		10	10	10	10

	Exhaust 1	Exhaust 2	Exhaust 3	Total		Tertiary Air
Flow (Nm3/h)	86406	0	0	86406		8000
Flow (Nm3/s)	24,00	0,00	0,00	24,00		2,22
Flow (Nm3/KgKK)	1,187	0,000	0,000	1,187		0,110
Temperature	471	0	0	471		840

Precalciner Primary Air			
PA Cold	PA Hot	Tr comb	Total
1449	0	1633	3082
0,40	0,00	0,45	1
0,020	0,000	0,022	0,042
30,0	0,0	57,0	44

Average analysis	Si	Al	Fe	CaO	MgO
Average analysis of raw meal	12,42	3,41	1,78	42,65	0,69
Average analysis of clinker	20,83	5,18	3,46	66,07	1,27

[ANNEXE 2]

Date	R 200 (µm)%	Objectif en %
01/02/2021 00 :00	0	0,25
02/02/2021 00 :00	0,1	0,25
03/02/2021 00 :00	0	0,25
04/02/2021 00 :00	0	0,25
05/02/2021 00 :00	0,1	0,25
06/02/2021 00 :00	0	0,25
07/02/2021 00 :00	0	0,25
08/02/2021 00:00	0,1	0,25
09/02/2021 00 :00	0	0,25
10/02/2021 00 :00	0	0,25
11/02/2021 00 :00	0	0,25
12/02/2021 00 :00	0,1	0,25
13/02/2021 00 :00	0	0,25
14/02/2021 00:00	0,8	0,25
15/02/2021 00 :00	0	0,25
16/02/2021 00 :00	0	0,25
17/02/2021 00 :00	0	0,25
18/02/2021 00 :00	0	0,25
19/02/2021 00 :00	0	0,25
20/02/2021 00 :00	0	0,25
21/02/2021 00 :00	0,1	0,25
22/02/2021 00 :00	0	0,25
23/02/2021 00 :00	0	0,25
24/02/2021 00 :00	0,1	0,25
25/02/2021 00 :00	0	0,25
26/02/2021 00 :00	0	0,25
27/02/2021 00 :00	0	0,25
28/02/2021 00 :00	0	0,25

[ANNEXE 3]

Date	R 90(µm)%	Objectif en %
01/02/2021 00 :00	11,8	10
02/02/2021 00 :00	11,8	10
03/02/2021 00 :00	10,7	10
04/02/2021 00 :00	11,9	10
05/02/2021 00 :00	11,9	10
06/02/2021 00 :00	12	10
07/02/2021 00 :00	10,8	10
08/02/2021 00 :00	11,8	10
09/02/2021 00 :00	12,3	10
10/02/2021 00 :00	12,3	10
11/02/2021 00 :00	12,5	10
12/02/2021 00 :00	11,6	10
13/02/2021 00 :00	12,5	10
14/02/2021 00 :00	13,2	10
15/02/2021 00 :00	12,5	10
16/02/2021 00 :00	12,4	10
17/02/2021 00 :00	11	10
18/02/2021 00 :00	11,2	10
19/02/2021 00 :00	11,6	10
20/02/2021 00 :00	11,4	10
21/02/2021 00 :00	12,3	10
22/02/2021 00 :00	11,1	10
23/02/2021 00 :00	11,2	10
24/02/2021 00 :00	11,4	10
25/02/2021 00 :00	10,4	10
26/02/2021 00 :00	10,8	10
27/02/2021 00 :00	10,7	10
28/02/2021 00 :00	11,2	10