

Faculté des Sciences et Techniques de Fès



Département de Génie Industriel



LST de Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes

Optimisation de la consommation de
l'énergie thermique au niveau de l'atelier de
cuisson de la cimenterie LafargeHolcim

Lieu : LafargeHolcim Fès

Référence : 16 /18GI

Préparée par :

- Nejjari Nada
- El arfaoui Oumaima

Soutenu le 07 Juin 2018 devant le jury composé de :

- Pr. Haouache Said (Encadrant FST)
- Pr. Rjeb Mohammed (Examineur FST)
- Pr. Rzine Bouchra (Examineur FST)
- Mr. Taouil Ismail (Encadrant Société)

Dédicaces

On dédie ce travail à :

- *Nos parents qui depuis notre naissance, n'ont cessé de nous bercer avec des bons conseils et sans doute ceux qui nous réconfortent et nous encouragent dans les moments difficiles de notre scolarité.*
- *Nos familles pour l'aide et le soutien qu'ils nous ont donnés tout le long de notre vie.*
- *Au grand père de nada qui nous a quitté au cours de ces 2 mois, que son âme repose en paix!*
- *Toute personne ayant un impact positif sur la rédaction de ce travail.*

Remerciements

Au terme de ce travail, nous avons le plaisir d'exprimer nos profonds remerciements et notre sincère gratitude à toutes les personnes qui ont pu nous aider à réaliser ce projet de fin d'étude.

Nous tenons tout autant à remercier tous ceux qui ont apporté leur contribution à la bonne marche de notre projet de fin d'étude, plus spécialement à Mr Taouil Ismail notre encadrant de la société et également à Mr Nawfal Lambaraa pour ses précieuses orientations.

Nos sincères remerciements sont destinés également à Mr Haouache said notre encadrant de la FSTF pour ses conseils et ses orientations précieuses ainsi que son accompagnement et sa collaboration afin d'assurer l'aboutissement de notre projet.

Enfin nous présentons nos profonds respects à l'ensemble du personnel des services production, procédés et laboratoire, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Table des matières

Introduction	1
---------------------------	---

Chapitre 1 : présentation de l'entreprise

1. Présentation générale de LafargeHolcim Fès	2
1.1. Fiche technique de l'entreprise :.....	2
1.2. Organigramme de la société :.....	3
1.3. Les différents services de LafargeHolcim FES :.....	4
2. Généralités sur le ciment	4
2.1. Définition du ciment :.....	4
2.2. Les matières premières du ciment:.....	4
2.3. Types du ciment fabriqués à LafargeHolcim :.....	5
.	
3. Procédés de fabrication du ciment	6
3.1. Principe de fabrication du ciment :.....	6
3.2. Bloc diagramme du procédé de fabrication du ciment:.....	7
3.3. Les étapes de fabrication du ciment :.....	8

Chapitre 2 : Description de l'atelier de cuisson Aperçu sur la chimie du ciment

I. Description détaillée de l'atelier de cuisson	12
1.1. Préparation de la matière première.....	12
1.2. Réaction de Clinkérisation.....	12
1.3. Tour de préchauffage :.....	13
1.4. Précalcinateur.....	14
1.5. Four rotatif.....	16
1.6. Refroidisseur.....	18

Chapitre 3 : Élaboration du bilan thermique de l'atelier de cuisson

Introduction :.....	19
1. Les entrées et les sorties de chaleur au niveau de l'atelier de cuisson	19
2. Notions de bases :.....	20
2.1. Combustibles.....	20
2.2. Consommation calorifique	22

2.3. Combustibles et Comburant.....	22
2.4. Distribution des airs	23
2.5. Energie calorifique et pouvoir calorifique	23
2.6 Efficacité et rendement énergétique	24
3. Les différents types de chaleur	24
3.1. Chaleur sensible	24
3.2. Chaleur latente.....	25
4. Les équations de chaleur du bilan thermique.....	25
4.1. Equations des flux à l'entrée de l'atelier	25
4.2. Equations des flux à la sortie de l'atelier.....	27
Chapitre 4 : Résultats et discussion	
I. Bilan de matière	30
1 .Les entrées et les sorties de l'atelier :.....	30
2. Bilan de matière de l'atelier de cuisson :.....	31
II. Résultats de calculs du bilan thermique :.....	32
• Interprétation du bilan thermique de l'atelier de cuisson.....	33
• Valeur importante :.....	33
III. Refroidisseur. :.....	34
1. Bilan thermique de refroidisseur	34
IV. Rendement, analyse des pertes et recommandation	35
1. Rendement énergétique au niveau du four	35
2. Rendement du refroidisseur.....	36
V. Sorties thermiques :.....	36
1. Répartition des pertes dans l'atelier :.....	36
2. Etudes des principales pertes :.....	37
VI. Recommandations :.....	39
Conclusion :.....	40

Liste des tableaux

- ❖ Tableau 1: Fiche technique de l'entreprise.....2
- ❖ Tableau 2 : Différents services de LafargeHolcim Ras El ma.....4
- ❖ Tableau 3 : Caractéristiques du béton isolant de la tour de préchauffage.....14
- ❖ Tableau 4: Conductivité thermique du béton isolant.....14
- ❖ Tableau 5: Caractéristiques du four de LafargeHolcim Fès.....16
- ❖ Tableau 6 : Pouvoir calorifique inférieur des combustibles.....21
- ❖ Tableau 7 : Composantes du clinker.....27
- ❖ Tableau 8: Bilan de matière de l'atelier de cuisson.....31
- ❖ Tableau 9: Bilan thermique de l'atelier de cuisson.....32
- ❖ Tableau 10: Répartition de la consommation calorifique.....33
- ❖ Tableau 11: Bilan thermique du refroidisseur.....34
- ❖ Tableau 12 : Recommandations.....39

Liste des figures

❖	Figure 1 : Organigramme de la société d'accueil	3
❖	Figure 2:Les composants du ciment.....	5
❖	Figure 3: Bloc diagramme du procédé de fabrication du ciment.....	7
❖	Figure 4: Tour de préchauffage de l'atelier de cuisson.....	13
❖	Figure 5 : Schéma d'un précalcinateur.....	15
❖	Figure 6: Four rotatif de la cimenterie de Fès.....	16
❖	Figure 7 : Schéma explicatif du refroidisseur.....	18
❖	Figure 8 : Entrées et Sorties de chaleur de l'atelier de cuisson.....	19
❖	Figure 9: Coke de pétrole.....	21
❖	Figure 10: Grignons d'olive.....	22
❖	Figure 11: Entrées Sorties de l'atelier de cuisson.....	30
❖	Figure 12: Répartition des pertes dans l'atelier de cuisson.....	36
❖	Figure 13 : Répartition des pertes par parois.....	38
❖	Figure 14: Répartition de l'air faux dans l'atelier.....	39

Liste des abréviations

- ❖ A.F.G.O : grignons d'olive combustible alternative.
- ❖ CCS : consommation calorifique spécifique.
- ❖ CPA: Ciment Portland Artificiel.
- ❖ CPJ : Ciment Portland composé avec Ajouts.
- ❖ Fluffs : déchets ménagers.
- ❖ kg clk: kilogramme de clinker.
- ❖ PC : Pouvoir Calorifique.
- ❖ PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.
- ❖ T clk : Tonne de Clinker

Introduction

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

En effet, l'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie sur le royaume. Elle réalise, en moyenne, 46 % de la production nationale et 50% de la valeur ajoutée du secteur « matériaux de construction » [1].

L'utilisation rationnelle de l'énergie constitue un souci majeur pour le secteur cimentier. Elle permet d'améliorer le coût de revient du ciment et diminuer l'impact de la fluctuation des prix des combustibles au niveau mondial. LafargeHolcim, un acteur actif de ce secteur, a jugé nécessaire d'améliorer les performances de l'usine pour optimiser les coûts d'exploitation de l'usine ainsi que la réduction des gaz à effet de serre.

Notre travail au sein de l'entreprise LafargeHolcim s'inscrit dans le cadre d'amélioration de la consommation calorifique de l'usine en localisant les sources des pertes au niveau de l'atelier de cuisson et proposant des actions d'optimisation et d'amélioration.

De ce fait le présent rapport sera structuré comme suit :

- Le chapitre 1 présentera la société LafargeHolcim Fès ainsi que le procédé de fabrication du ciment;
- Le chapitre 2 donnera une idée sur la particularité de la chimie du ciment et s'intéressera en détail au processus de cuisson;
- Le chapitre 3 les différentes notions de base pour réaliser un bilan thermique ;
- Le chapitre 4 sera consacré au bilan thermique et à l'interprétation des résultats, et aux recommandations ;



Chapitre 1

Présentation de l'entreprise :

1. Présentation générale de LafargeHolcim Fès

Située à 25 Km au sud de Fès, l'usine de Fès utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale avec une capacité annuelle de 2 millions de tonnes, il comporte des ateliers de : concassage, broyage, stockage de la farine, cuisson, stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment, ensachage et expédition du ciment. La cimenterie de Fès est certifiée ISO 9001 version 2008 et ISO 14001 version 2004.

Le site n'était pas choisi par hasard mais en tenant compte de plusieurs raisons :

- La disponibilité des matières premières en quantité et qualité.
- La possibilité d'alimentation en eau et en énergie électrique.

La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie.

1.1 .Fiche technique de l'entreprise

Le tableau suivant nous présentera une fiche technique détaillé de la société :

Raison sociale	LafargeHolcim Maroc
Forme juridique	Société anonyme de droit prive marocain
Date de création	1976
Activité principale	Production et commercialisation du ciment
Capital social	524 073 390 DH
Capacité de production	2 000 000 tonne/an
Effectif	3000 personnes et sous-traitants

Tableau 1: Fiche technique de l'entreprise

1.2 .Organigramme de la société

L'organisation opérationnelle de LafargeHolcim (Maroc) repose sur un comité de direction, présidé par Monsieur Dominique Drouet, dont le rôle est de coordonner l'action de l'ensemble des directions de la Société. Dans un souci d'efficience fonctionnelle l'ensemble des processus et des tâches à accomplir sont répartis en catégories associées chacune a un service.

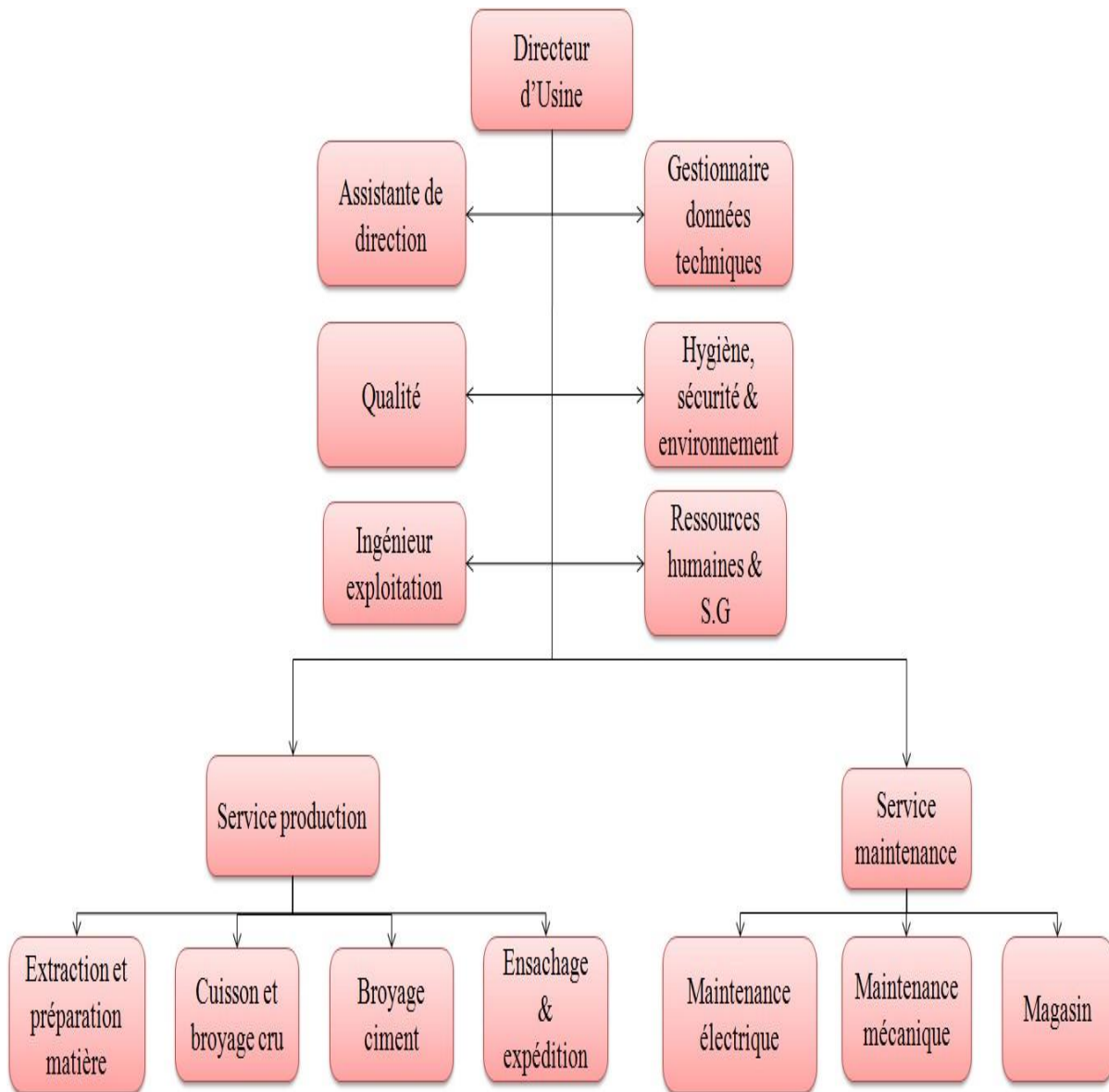


Figure 1 : organigramme de la société d'accueil

1.3. Les différents services de LafargeHolcim Fès

Nous avons rassemblé les différents services de l'organisme d'accueil et leurs activités dans le tableau suivant :

Service	Activité
Service contrôle et qualité	Organisation assurée par un laboratoire de qualité pour améliorer les produits et réduire les risques de mise en marche de produits défectueux.
Service sécurité et environnement	Chargée d'assurer une qualité des ciments, du béton et des granulats, répondant aux meilleurs standards internationaux.
Service exploitation	Mettre en œuvre la stratégie opérationnelle de la société y compris la gestion technique et commerciale (gestion des achats et gestion des stocks)
Service des ressources humaines	Recrutements assurance maladie, gestion des congés, paie de personnel, et la gestion de la formation.
Service production	Service d'accueil divisé en 3 secteurs : Secteur 1 et 2 : concassage, broyage et cuisson des MP pour préparer le clinker. Secteur 3 : chargé du broyage ciments et expédition.
Service maintenance	Assurer la disponibilité des machines, pour produire dans les meilleures conditions de qualité, sécurité et cout.

Tableau 2 : Les différents services de LafargeHolcim Fès

2. généralités sur le ciment

2.1. Définition du ciment [2]

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

2.2. Les matières premières du ciment

Les matières premières (Figure 2) qui rentrent dans la fabrication du ciment sont presque toutes des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport, et sont Essentiellement composées de calcaire et d'argile ou de toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), de l'oxyde ferrique (Fe₂O₃), la pouzzolane (matière volcanique) et

les matières de correction (le sable et les minerais de fer).

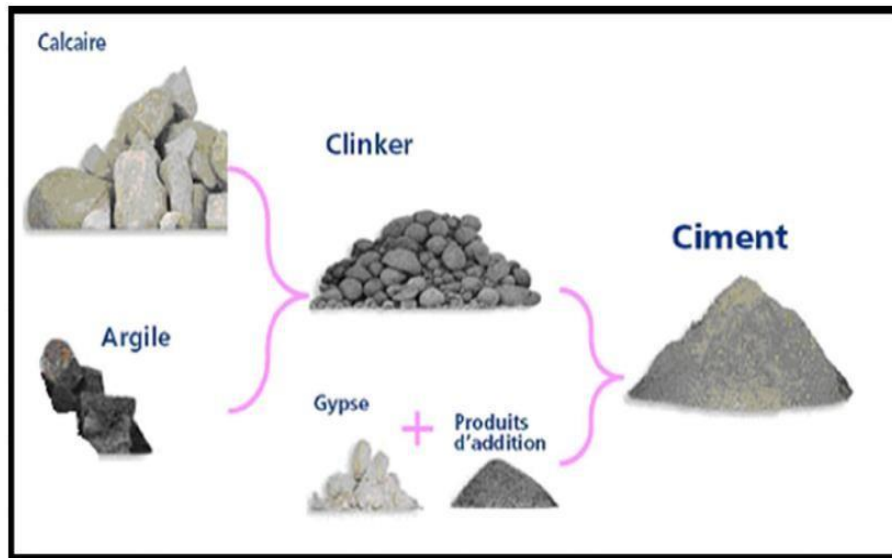


Figure 2 : Les composants du ciment

2.3. Types du ciment fabriqués à LafargeHolcim :

Pour répondre aux besoins spécifiques des clients, usine de Ras El Ma met à leur disposition une large gamme de ciment gris : **CPJ 35, CPJ 45 et CPJ 55.**

➤ **CPJ 35**

Le CPJ 35 est un ciment Portland avec ajouts, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 65%, le reste étant constitué d'ajouts (calcaire d'addition, gypse, pouzzolanes), sa résistance à la compression à 28 jours (Rc28) doit être supérieure à 22.5 MPa.

Le CPJ 35 développe des performances adaptées pour une utilisation dans la confection des bétons faiblement sollicités, béton non armé et tous les types de mortiers.

➤ **CPJ 45 :**

Le CPJ 45 est un ciment Portland avec ajouts, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 72%, le reste étant constitué d'ajouts (calcaire d'addition, gypse, pouzzolanes), la Rc28 du CPJ 45 doit être

supérieure à 32.5 MPa.

Le CPJ 45 développe des performances qui lui permettent d'être utilisé pour les bétons armés courants et les bétons destinés aux travaux en grandes masses.



CPJ 55 :

Le CPJ 55 est un ciment Portland avec ajouts, composé principalement de clinker et de calcaire, il doit contenir un pourcentage minimum en clinker de 83%. Sa Rc28 doit être supérieure à 48 MPa.

Les niveaux de qualité garantie par la norme lui confèrent une bonne aptitude pour la confection des bétons armés destinés aux ouvrages bâtiment et travaux publics.

3. Procédés de fabrication du ciment

3.1 .Principe de fabrication du ciment

Quatre voies de la fabrication de ciment sont existantes :

La voix humide :

La matière première, après son concassage, est délayée dans l'eau puis broyée en humide. La pâte obtenue est soigneusement dosée et homogénéisée pour alimenter le four après.

La voix semi-humide :

La pâte obtenue, de la même manière que dans le procédé de la voix humide, est débarrassée d'une grande partie de son eau par filtration avant son introduction dans le four.

La voix semi-sèche :

La matière première, après son concassage, est broyée à sec, homogénéisée puis granulée par ajout d'eau à l'entrée du four.

La voix sèche :

Après son concassage, la matière première est broyée à sec et homogénéisée, puis acheminée directement à l'entrée du four sous forme de farine. Ce procédé est le moins onéreux par sa faible consommation calorifique.

Le procédé de fabrication du ciment utilisé à l'usine de Ras El Ma est la voie sèche.

3.2 Bloc diagramme du procédé de fabrication du ciment

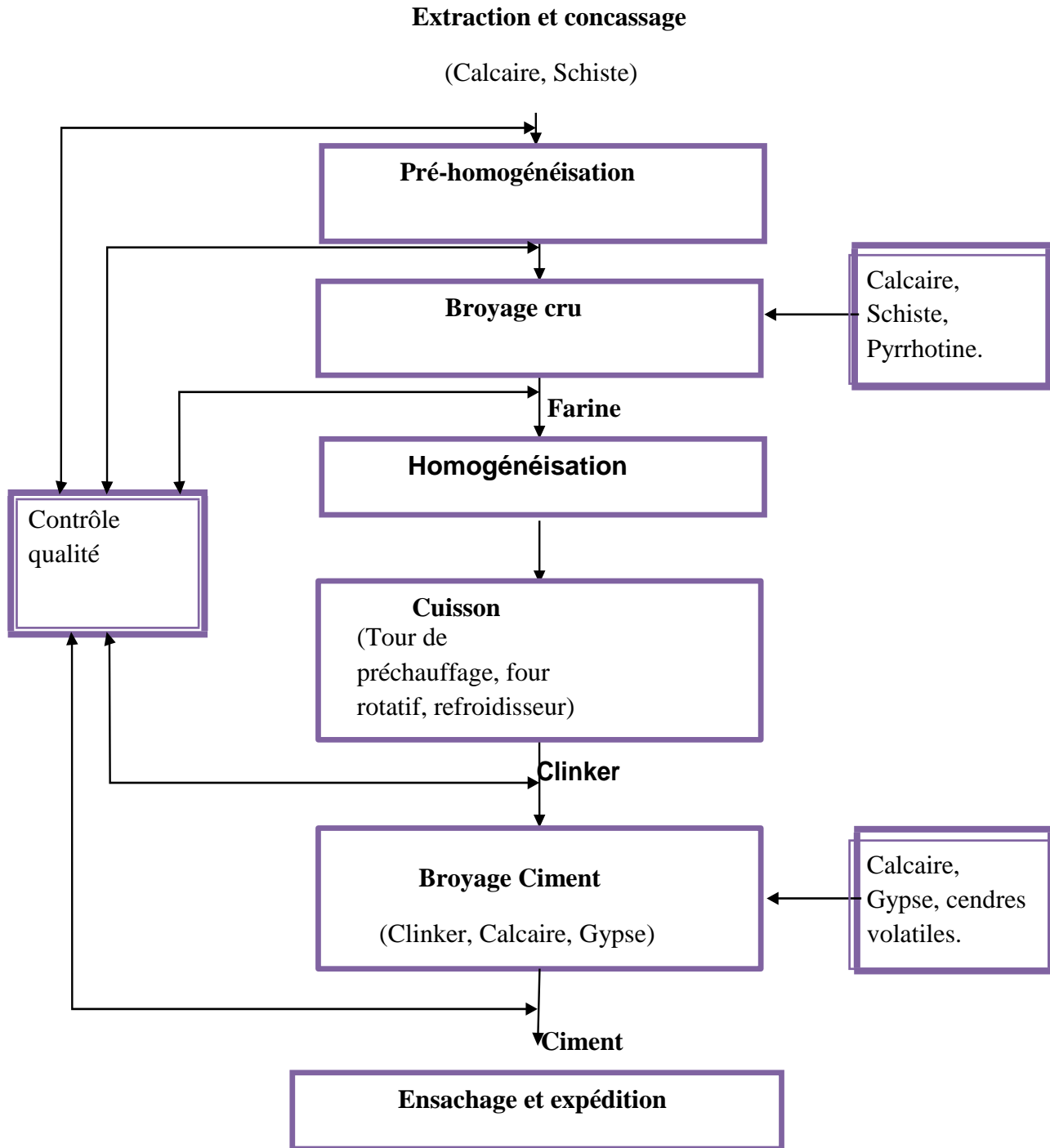


Figure 3 : Bloc diagramme du procédé de fabrication du ciment

3.3 Les étapes de fabrication du ciment

a. Carrière :

La matière première principale extraite d'une carrière proche de l'usine est le

calcaire. D'autres additifs viennent s'ajouter au calcaire, principalement argile, minerais de fer et le schiste en faible quantité.

b. Concassage :

En vue d'optimiser et faciliter le stockage et la manutention des matières premières, les blocs extraits au niveau de la carrière sont introduits dans un concasseur pour réduire leur dimensions (~ 5 - 10 cm). Pour réduire la taille des blocs, le concassage soumet les matières premières à des efforts d'impact, de cisaillement ou de compression. Le type du concasseur est choisi en fonction du procédé de concassage adopté par la cimenterie, la granulométrie dite positionnelle et l'état hydrique des matières premières.

c. Broyage cru :

Un broyeur à galets réduit la matière première pré-homogénéisée à l'état de farine. L'usine de Fès dispose de deux broyeurs, la capacité de chaque broyeur est de 120 t/h et la puissance installée est 1 200 KW.

Le broyeur à galets est constitué de :

- Un moteur électrique.
- Un plateau de broyage qui est entouré par un canal circulaire de répartition des gaz. Alimenté en gaz.
- de séchage par des canalisations de gaz chaud.
- Une face supérieure du plateau de broyage sur laquelle s'écoule la matière à broyer.
- Un anneau dirige le flux de gaz de séchage dans le compartiment de broyage.

Des galets (de grande et petite taille), Ces meules exerçant des pressions élevées par un mouvement rotatif sur la matière à broyer, ils sont guidés de façon précise par des leviers et travaillent de manière indépendante.

La matière broyée est séchée par le gaz chaud provenant du four rotatif (Le transport des gaz se fait à l'aide d'un ventilateur) et transportée dans le séparateur placé au-dessus des galets, ensuite les particules de taille trop grande retombent à travers une trémie sur le plateau de broyage et sont mélangées avec la matière à broyer fraîche introduite dans le broyeur à travers un canal d'alimentation. L'opérateur du broyeur a des consignes du laboratoire sur la finesse de la farine, donc il règle la vitesse de

séparateur pour avoir une farine bien déterminée. Ensuite le mélange de gaz et de produit fini (la farine) entre dans le filtre à manches où le produit fini est séparé du gaz, après la séparation, le produit fini tombe sur une vis de récupération qui alimente un élévateur, ce dernier transporte la farine vers les silos d'homogénéisation.

Les gaz après la séparation sont rejetés dans l'atmosphère à travers la cheminée, et le transport des gaz se fait par un ventilateur final.

Alors, ce type de broyeur combine les fonctions suivantes : séchage, broyage et séparation.

d. Dépoussiérage :

Une fois la matière broyée, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela, on dispose de filtres à manches, qui libèrent la matière des gaz. Cette opération de Dépoussiérage s'effectue avec un rendement de 99.8%. En outre, cette opération est presque utilisée dans presque toutes les unités de production.

e. Homogénéisation :

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

f. Préchauffage :

La farine est introduite par un élévateur à godets en tête de la tour. Elle circule par gravité à contre-courant avec les gaz chaud ascendants du four le long de la tour. L'échange thermique s'accompagne de :

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

g. Cuisson :

Le four rotatif est un cylindre en acier reposant sur trois stations de roulements il est garni intérieurement par des produits réfractaires. La rotation du four est assurée par un pignon qui agit sur une couronne solidaire au four.

Durant la cuisson, le four est animé d'un mouvement de rotation, sa disposition en

penne permet le transport de la matière, introduite à l'autre extrémité par rapport aux flammes. A l'entrée du four la matière est à la température de 900°C, en avançant dans le four sa température s'élève jusqu'à atteindre la température de clinkérisation (1450°C).

h. Broyage du charbon

Le broyeur du charbon utilisé dans la cimenterie de Fès fait partie de la catégorie des broyeurs verticaux à galets. Il alimente le four par le charbon nécessaire à la production de l'énergie calorifique.

i. Refroidisseur

Le rôle du refroidisseur consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure Métallurgique et des dimensions des cristaux favorables. Il permet aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. Pour cela on pulse de l'air tiré de l'atmosphère à travers la grille du refroidisseur sur laquelle passe le clinker. Ce même air alimentera le four en oxygène.

j. Stockage et expédition du clinker

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté par un élévateur vers un silo de stockage. Le Clinker est ensuite transporté vers un broyeur, avec un ajout de calcaire, de gypse et d'adjuvant pour obtenir des qualités de ciment, selon le prorata de chacun des trois types, à savoir le CPJ35, le CPJ45 ou le CPA55.

k. Broyage ciment

Le broyeur à ciment fait partie de la famille des broyeurs verticaux à galets. Avant le broyage du clinker on ajoute du gypse et d'autres constituants secondaires qui donnent au ciment les propriétés spécifiques correspondant aux différentes qualités.

Les ajouts utilisés sont :

- ✓ ***Cendre volante*** : récupération des poussières des centrales thermiques au charbon.
- ✓ ***Les pouzzolanes***: roches d'origines volcaniques.

Les broyeurs utilisés sont :



Un broyeur vertical à galets : ce type de broyeur est constitué d'une piste rotative, deux galets masters et deux galets esclaves, il a un débit nominal de 120 tonnes par heure.



Un broyeur horizontal à boulets: ce broyeur a la forme d'un gros cylindre d'un diamètre de 2.8m. Ce type de broyeur peut broyer jusqu'à 25 tonnes par heure.

l. Ensachage et expédition :



Ensachage :

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



Expédition :

L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50 Kg et en vrac soit par route soit par voie ferrée .Le chargement des camions en sacs se fait manuellement. Le chargement des wagons en sac est assuré par des chargeurs de wagons.

L'expédition du ciment en vrac par camion ou wagons citernes se fait directement à partir des silos de stockage.

Chapitre 2

**Description de l'atelier de cuisson
Aperçu sur la chimie du ciment**

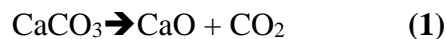
1. Description détaillé de l'atelier de cuisson

Avant d'entamer l'étude du bilan thermique de l'atelier de cuisson, une compréhension de cette ligne et de la chimie qu'elle contient s'avère nécessaire. En effet, cette dernière est constituée d'une tour de préchauffage, un four rotatif et un refroidisseur.

1.1. Préparation de la matière première

La matière première passe par plusieurs étapes avant d'entamer la réaction de Clinkérisation :

- **Séchage de la matière première** : Il se fait dans le broyeur, permet d'éviter la consommation de l'énergie calorifique dans le four à cause de la vaporisation de l'eau.
- **Le broyage** : permet d'augmenter la surface spécifique des réactifs et améliorer la cinétique des réactions.
- La décarbonatation : c'est la libération de CO_2 par CaCO_3 et selon la réaction:



Avec la libération de la chaux qui constitue un des réactifs principaux dans la réaction de Clinkérisation.

1.2. Réaction de Clinkérisation

Les réactions de Clinkérisation qui ont lieu dans le four sont :

- Formation du bélite C_2S ($T = 850^\circ\text{C}$):



- Formation de la phase liquide par la fusion des composants métalliques C_4AF et C_3A ($T=1200^\circ\text{C}$).
- La réaction entre le C_2S et la chaux CaO donne l'alite C_3S qui constitue la majorité du clinker ($T=1250^\circ\text{C}$):



1.3.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. La tour est composée de 10 cyclones organisés selon quatre étages.



Figure 4 : tour de préchauffage de l'atelier de cuisson

Réaction et fonctionnement 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 → CO₂ + MgO + 310 Kcal/Kg cru.
- 800 – 950°C : Décarbonatation du CaCO₃ selon la réaction (1) + 425 Kcal/Kg cru.

La tour fonctionne comme suit : La matière recueillie au pied du cyclone est ensuite acheminée (via une goulotte) vers la gaine du niveau inférieur où elle sera mélangée avec des gaz plus chauds ; les gaz seront eux envoyés dans la gaine de l'étage immédiatement supérieur où ils seront mélangés avec la matière plus fraîche.

Dans la tour de préchauffage :

- **Gaine:** Tuyauterie traversée par les gaz ou par le mélange gaz/matière.

- **Goulotte:** Tuyauterie conduisant la matière seule.

Remarque :

LafargeHolcim utilise pour la tour de préchauffage du béton isolant MCC

Les différents Caractéristiques de l'isolant thermique utilisé dans la tour :

Type de produit	Béton isolant MCC
Mode de placement	Projection voie sèche
Constituant principal	Argile expansée vermiculite
Nature de la liaison	Hydraulique
Température de classification	1100°C
Classe granulométrique	5 mm
Rendement volumique (hors rebonds)	0,85 t / m ³

Tableau 3 : caractéristiques du béton isolant de la tour de préchauffage

La conductivité thermique du béton isolant MCC selon la température :

Température (°C)	Conductivité thermique (W/m °C)
500°C	0,26
800°C	0,31
1000°C	0,38

Tableau 4: conductivité thermique du béton isolant

1.4.Précalcinateur

Le système de préchauffage est encore amélioré par l'ajout du précalcinateur, ce système a vu le jour au Japon en 1973 pour faire face à l'augmentation des besoins croissants en ciment sans faire des investissements onéreux, il permet d'achever la

réaction de calcination jusqu'à 90%.

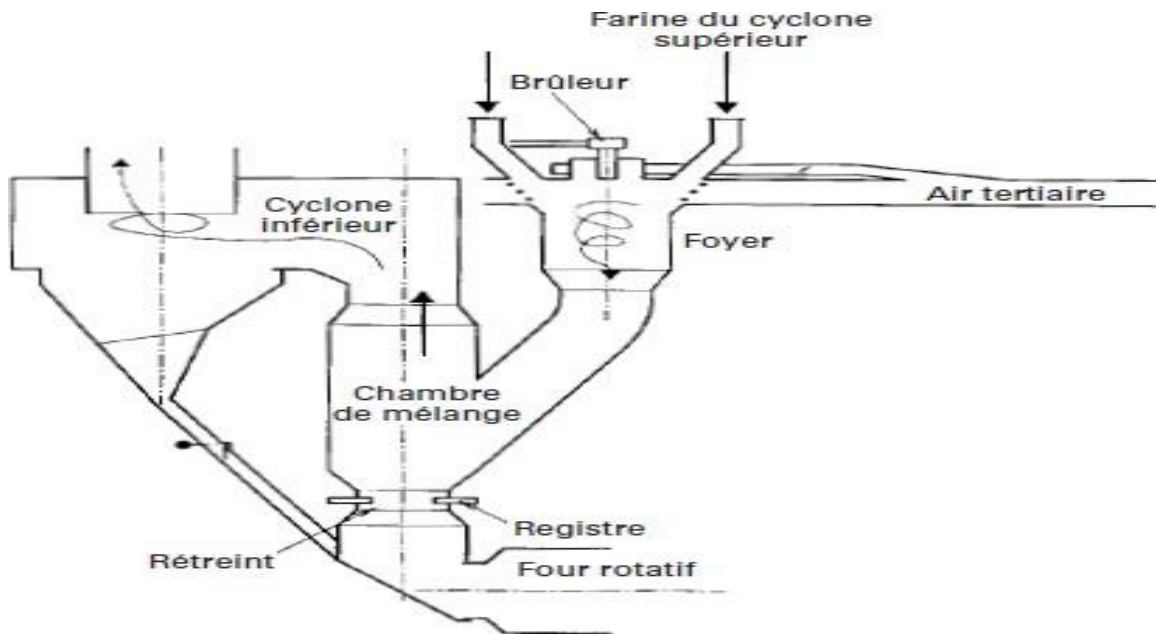


Figure 5 : Schéma d'un précalcinateur

Un précalcinateur se compose essentiellement :

- Un foyer installé au bas du préchauffeur : il reçoit l'air de combustion du refroidisseur du clinker (air tertiaire), en plus d'un air primaire soufflé par un ventilateur mise en place pour crole.
- Une conduite d'air tertiaire, longeant le four : l'air tertiaire est grossièrement dépoussiéré par un cyclone ou une chambre de décantation.
- Une chambre de mélange dont la fonction est de mélanger les gaz provenant du four et ceux provenant du foyer de pré-calcination.
- Un rétreint ou un registre dont le but est de permettre l'ajustement des proportions de gaz provenant des deux sources que l'on a déjà cité.
 - Le précalcinateur à un rôle important dans la dégradation des gaz NOx dangereux en créant une atmosphère réductrice qu'ils les décomposent.

1.5. Four rotatif

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



Figure 6 : Four rotatif de la cimenterie de Fès

Les différentes caractéristiques du four sont dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Valeur
La longueur	62 m
Le diamètre intérieur	3.40 m
Le diamètre extérieur	3.88 m
La vitesse de rotation	5.20 tr/min
L'inclinaison du four	3 %
Epaisseur d'acier	40 mm
Epaisseur du brique	200 mm

Tableau 5 : caractéristiques du four de LafargeHolcim Fès

Les réactions qui se passent dans le four :

Le four est un réacteur relativement long, par conséquent il y a un profil de température qui donne lieu à différentes réactions selon la position :

- 900 – 950°C : Finalisation de la décarbonatation du CaCO_3 après qu'elle a atteint 90% de son avancement dans la tour de préchauffage, selon la réaction (1).
- 950 – 1200 °C: formation de la phase liquide $\text{C}_3\text{A}, \text{C}_4\text{AF}$ par réaction entre le fer , l'alumine et la chaux CaO .
- 1200–1450° : Formation des silicates calciques: $\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}$ par réaction entre le silicate et la chaux réaction(2)et entre le silicate bi-calcique et la chaux respectivement réaction (3).

Description du four de LafargeHolcim Fès

C'est une virole métallique (cylindre creux), il est revêtu entièrement de briquetage réfractaire et isolant qui assure la protection de sa virole vis à vis de la haute température régnant à l'intérieur. La matière évolue dans le four grâce à la rotation et a la pente du four (3%) de l'amont vers l'aval.

Le four de LafargeHolcim Fès se repose sur trois appuis : la rotation du four est assurée par une commande principale constituée d'un moteur, réducteur, pignon et couronne dentée .Un galet à axe vertical s'oppose au mouvement naturel descendant du four, permettant de garder le four fixe.

Le four est revêtu de l'intérieur par des briques réfractaires. Ces derniers assurent une résistance au four aux températures élevées qu'il subit.

Les briques réfractaires sont des produits céramiques cuits pour provoquer leur vitrification. Le liant utilisé est principalement de l'argile qui favorise l'homogénéité du produit en phase de céramisation. On peut aussi faire appel à des liants chimiques, comme l'acide phosphorique et ses dérivés, pour fabriquer les produits crus.

LafargeHolcim utilise les briques réfractaires du REFRASTECHNIK ciment. Et pour chaque partie du four on utilise un type différent de briques.

Les différents types de briques utilisées ainsi que leurs caractéristiques selon la longueur du four (voir annexe 2).

1.7. Refroidisseur

Le refroidisseur intervient après le four rotatif ; sa mission principale est le

refroidissement du clinker très chaud qui sort de la zone de cuisson et son transport vers le stockage clinker. Le refroidisseur assure trois tâches simultanément :

- Tremper le clinker de façon à minimiser toute croissance cristalline et lutter contre la réversibilité de la réaction (3) 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.

Description du refroidisseur :

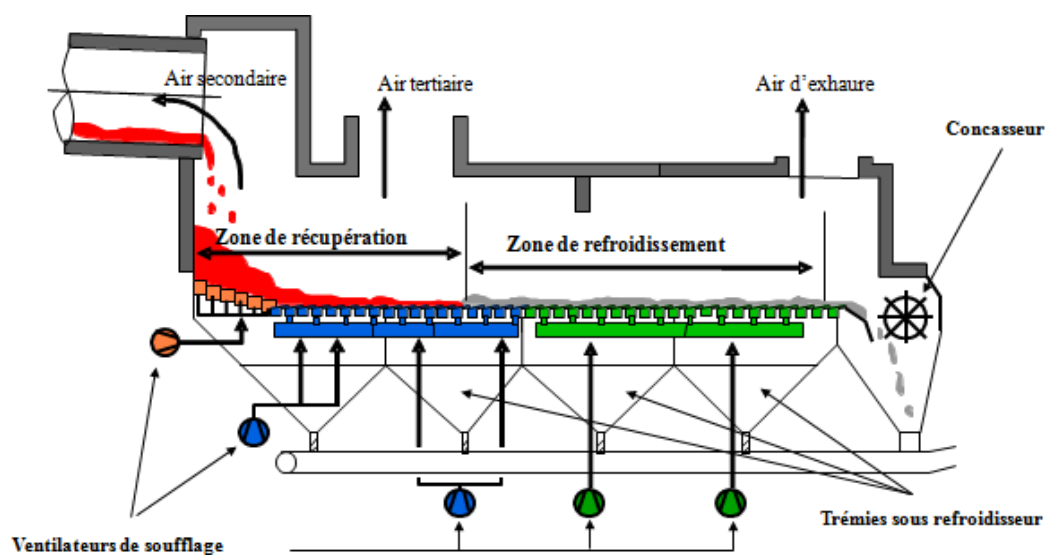


Figure 7: Schéma explicatif du refroidisseur

En plus de son rôle de tremper le clinker, le refroidisseur permet de récupérer des quantités énormes de calories. En effet, le refroidissement du clinker de 1300 °C à 100°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 et contribue à la combustion de coke.
- Air tertiaire : air chaud transféré au précalcinateur pour assurer la combustion
- Air de séchage de coke : air transféré au broyeur de coke pour assurer son séchage pendant le broyage.

Cependant une quantité d'air excédentaire (air exhaure) n'est pas valorisé, sa température relativement faible (350 °C) rend difficile sa valorisation.

Chapitre 3

Élaboration du bilan thermique de l'atelier de cuisson

Introduction

Le bilan thermique est un outil efficace pour mesurer l'état d'un système du point de vue énergétique ; Il permet une bonne évaluation de la consommation de chaleur et révèle les potentiels d'amélioration (concernant les Aspects thermiques).

Le principe d'un bilan thermique est assez simple : on sélectionne d'abord les limites du système qu'on veut étudier et on calcule ensuite tous les flux de chaleur échangés avec l'extérieur après avoir fait l'ensemble de Mesures nécessaires pour calculer ces différents flux de chaleur.

1. Les entrées et les sorties de chaleur au niveau de l'atelier de cuisson :

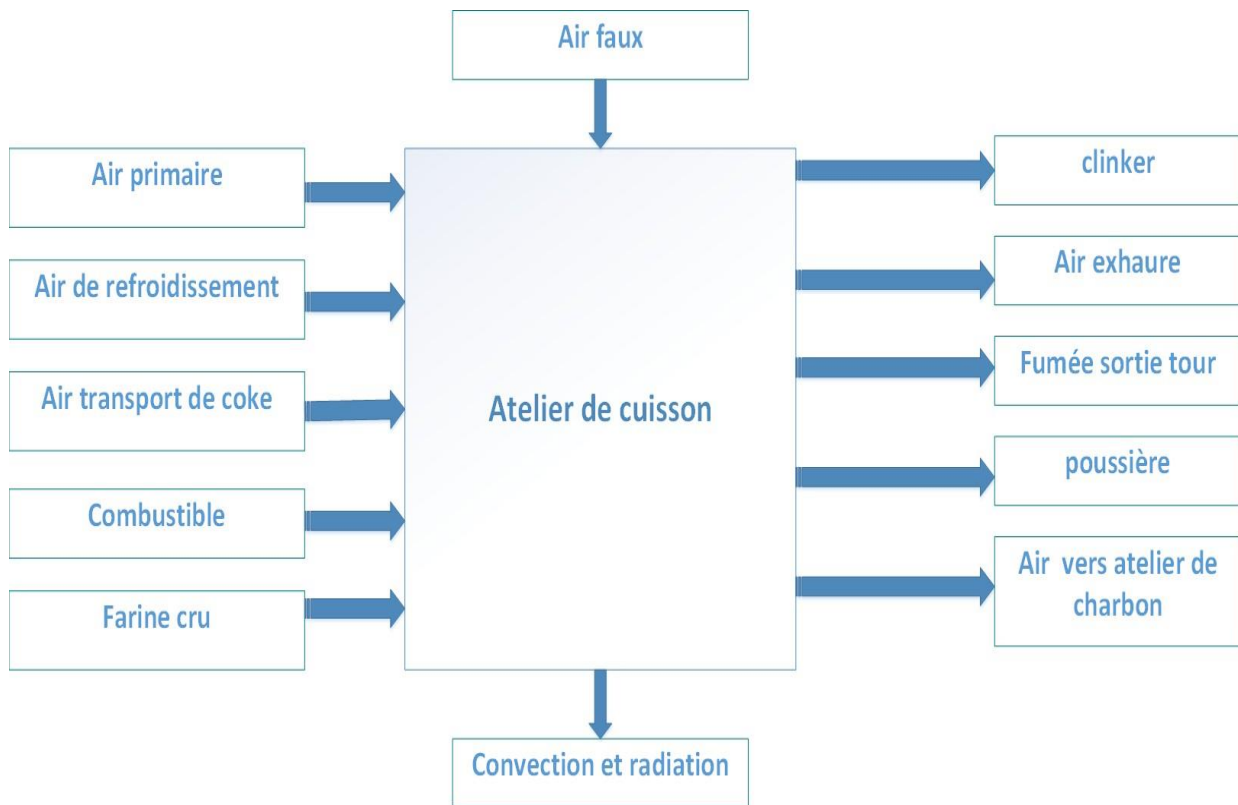


Figure 8 : Entrées et sorties de chaleur de l'atelier de cuisson

❖ Les entrées de chaleur de l'atelier :

- La chaleur de combustion du Coke dans le four (tuyère+précalcinateur).

- La chaleur sensible de Coke vers la tuyère et précalcinateur.
- La chaleur sensible de la farine crue à l'entrée de la tour de préchauffage.
- La chaleur sensible de l'air de refroidissement.
- La chaleur sensible de l'air primaire.
- La chaleur sensible de l'air faux.
- La chaleur sensible de l'air transport de Coke.
- La chaleur de combustion de matière organique.

❖ **Les sorties de chaleur de l'atelier :**

- La chaleur de réaction du clinker à l'intérieur du four.
- La chaleur sensible du clinker à la sortie du refroidisseur.
- La chaleur sensible de la poussière dans les fumées sortie tour et dans l'air exhaure vers cheminé.
- La chaleur d'évaporation de l'humidité de la farine crue.
- La chaleur sensible des gaz d'échappement (fumées, gaz exhaure vers cheminée, air vers atelier charbon).
- Les pertes par radiation et convection.

2. Notions de base

Pour réaliser le bilan thermique, nous rappelons les définitions de quelques paramètres:

2.1. Combustibles

Les combustibles constituent une famille particulière des matières premières utilisables pour assurer la cuisson, et qui sont injectés à la tuyère du four. Suivant leur origine, les combustibles apportent:

- Des calories nécessaires pour le chauffage et la Clinkérisation de la matière.
- Des composés chimiques, à base de silicium, d'aluminium et du fer, qui participent aux différentes réactions chimiques de formation du clinker.
- Des éléments, en faible concentration, généralement indésirables dans le clinker (vanadium apporté par le coke de pétrole ou les composés alcalins et

sulfatés présents dans la plupart des combustibles).

Les combustibles se composent en combustibles gazeux, liquides ou solides. Les combustibles solides sont particulièrement importants pour la cuisson du mélange cru ou de la composition du clinker. Ils apportent en plus des calories qui participent à la cuisson et à la formation du clinker et des cendres riches en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 qui réagissent dans le four avec les autres constituants. [3]

Combustible	Pneu	Petcoke	Charbon	Grignond'olives	Gasoil	Huile	Fluffs
Pouvoir calorifique inferieur (Kcal/Kg)	1435	1938	1435	718	2392	1435	718
État	Solide	Solide	Solide	Solide	Liquide	Liquide	Solide

Tableau 6 : le pouvoir calorifique inferieur des combustibles

Les combustibles utilisés dans la cimenterie de Fès :

Holcim Ras El Ma utilise notamment le petcoke comme combustible principal à un pourcentage de 82% et 18% de grignons d'olives.

Le coke de pétrole :

Ainsi nommé par analogie avec le coke produit à partir de charbon, est un coproduit des raffineries de pétrole, lourd et formé de boulettes de goudron et de soufre. Il est produit par un procédé d'amélioration des coupes très lourdes de pétrole, il se présente sous forme solide, noire et se compose majoritairement de carbone, avec très peu d'hydrogène et des quantités importantes de polluants (souffre, métaux lourds...).



Figure 9 : Coke de pétrole

Les grignons d'olive :

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



Figure 10 : Grignons d'olive

2.2. Consommation calorifique [4]

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

$$\text{Consommation calorifique} = \frac{\sum m_i * PCI}{\text{Production clinker}}$$

Avec :

m : la masse du combustible en Kg.

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

Production clinker : la quantité produite du clinker en Kg.

2.3. Combustibles et comburant

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments: un combustible, un comburant, une énergie d'activation en proportion suffisante. Les combustibles utilisés aux Ciments Du Sahel sont le fioul lourd et le charbon.

Le comburant est de l'air ambiant, et plus particulièrement de l'un de ses

composants principaux, l'oxygène. Ce comburant est divisé en trois airs dans les fours à ciment.

2.4. Distribution des airs

L'air de combustion se compose de :

- L'air primaire:

Dans le cas particulier d'un four moderne de cimenterie, l'air primaire représente 8 à 12% de l'air total. Il permet une combustion immédiate mais partielle du combustible et l'accrochage de la flamme. En faisant varier le débit et la pression d'injection on modifie la forme de la flamme.

- L'air secondaire:

Il provient du refroidisseur de clinker. Il pénètre dans le four par la zone du capot de chauffe. L'air secondaire est réglé par le registre de la conduite des gaz par le biais du tirage du four.

- L'air tertiaire:

L'air tertiaire vient aussi du refroidisseur et est acheminé vers le précalcinateur par une gaine.

2.5 Energie calorifique et pouvoir calorifique

La chaleur est une forme d'énergie. Cette forme d'énergie est appelée énergie calorifique.

Le pouvoir calorifique est l'énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion par l'oxygène On distingue :

Le 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.

Le 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.

2.6 Efficacité et rendement énergétique

L'efficacité énergétique est le rapport du montant total de l'énergie consommée (M) par la quantité totale de la production provenant de cette énergie :

$$\text{Efficacité} = \frac{\text{énergie consommée}}{\text{énergie fournie}}$$

L'augmentation de l'efficacité énergétique permet de réduire les consommations d'énergie à service rendu égal. Cela entraîne la diminution des coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation.

Par rendement énergétique, on distingue :

- le rendement énergétique brut qui est le changement au cours d'une période donnée de la quantité d'énergie utilisée pour fabriquer une quantité donnée de produits.
- le rendement énergétique net qui concerne les changements de la production énergétique suite à d'efforts conscients de la gestion de l'énergie.

3. Les différents types de chaleur [5]

3.1. Chaleur sensible

La chaleur sensible modifie la température d'une matière, c'est la quantité de chaleur qui est échangée, sans transition de phase physique, entre plusieurs corps formant un système isolé.

Mathématiquement, la chaleur sensible Q échangée par un corps qui passe d'une température T_1 à une température T_2 est donnée par la relation :

$$Q(J)=m \cdot c (T_2-T_1)$$

Où :

Q est la chaleur sensible (en J).

m est la masse du corps (en kg).

c est la chaleur massique de ce corps ou capacité thermique massique (en $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

T1 et T2 sont les températures initiales et finales du corps (en K ou °C).

3.2. Chaleur latente

La chaleur latente c'est l'énergie qui accompagne le changement d'état physique d'une matière. Par opposition à la chaleur sensible qui modifie la température d'une matière.

Elle est notée L. Lorsqu'elle est exprimée pour 1 Kg de matière, c'est la chaleur latente massique, lorsqu'elle est pour 1 mole, c'est la chaleur latente molaire.

$$Q = m \cdot L \text{ avec } L \text{ en } J/kg$$

$$Q = n \cdot L \text{ avec } L \text{ en } J/mol$$

Ce changement d'état s'effectue à une température constante pour une pression donnée.

Quelle que soit la matière, on parle de :

- Chaleur de liquéfaction : chaleur nécessaire pour passer de l'état solide à l'état liquide.
- Chaleur de vaporisation : chaleur nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état gazeux.

Les changements d'état absorbent des quantités de chaleur nettement plus élevées que les processus d'échauffement ou de refroidissement dans les plages de température usuelles en chauffage ou climatisation.

4. Les équations de chaleur du bilan thermique [4]:

A noter que dans cette partie, nous allons ramener tous les débits au kg de clinker produit et La température de référence prise égale à $T_r = 20^\circ\text{C}$.

4.1. Equations des flux à l'entrée de l'atelier [6]:

Chaleur de combustion de coke:

La combustion se déroule dans le four et le précalcinateur par le même combustible (coke). La chaleur de combustion du coke est donnée par la formule :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot \text{PCI}$$

Avec:

-m: kg / kg clk (solide)

: Nm³ / kg clk (gaz)

-PCI: Le pouvoir calorifique inférieur du combustible (Coke) (kJ/Kg Clinker).

Chaleur sensible de Coke

Le coke entre dans la tuyère et fournit une chaleur sensible avant que la combustion ne passe. Cette chaleur est donnée par la formule :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C})$$

m: la masse du Coke rapportée à la masse du clinker (Kg de Coke / Kg Clinker).

C_p: Capacité calorifique du combustible (Coke) (kJ / kg °C).

T : Température du combustible (Coke) à l'entrée (°C).

Chaleur sensible d'air primaire (four et précalcinateur):

L'air primaire sert essentiellement à fournir l'oxygène dans l'opération de combustion et de réglage de la flamme. La chaleur sensible de l'air primaire est donnée par la formule suivante :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = V \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C})$$

Avec:

V: Volume d'air primaire rapporté à la masse du clinker (Nm³/kg clk)

C_p: Capacité calorifique de l'air primaire (kJ/Nm³°C).

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

Chaleur sensible de l'alimentation farine :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C})$$

Avec :

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

C_p : Capacité calorifique de la farine kJ/kg°C.

T : Température de la farine (°C).

Chaleur sensible d'air de soufflage refroidisseur :

L'air est soufflé sous des grilles du refroidisseur par des ventilateurs, on à la formule suivante avec le flux total c'est la somme des flux des ventilateurs, cette air sert à refroidir le clinker sortant du four sa chaleur sensible est donnée par:

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = V \cdot C_p \cdot (T - 20^\circ\text{C})$$

V : volume de l'air soufflé par les ventilateurs du refroidisseur rapporté à la masse du clinker (Nm³/kg Clinker).

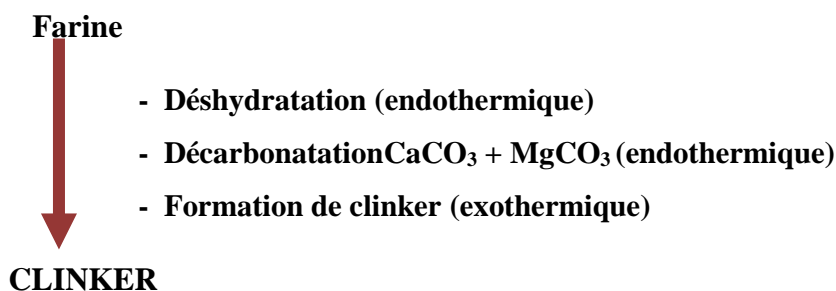
C_p : Capacité calorifique de l'air (kJ/Nm³°C).

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

4.2 Equations des flux à la sortie de l'atelier [4]

Chaleur de formation :

La chaleur de formation est constituée de la chaleur requise pour décomposer les carbonates, les silicates avec les alcalis et de l'eau chimiquement liée, de la chaleur libérée par la formation de silicates de calcium, les sulfates alcalins et éventuellement de la combustion composés de pyrites et organiques.



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 ;

$$\Delta h = 3200 \cdot \text{CaO} + 2710 \cdot \text{MgO} - 2140 \cdot \text{SiO}_2 - 250 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1720 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$$

Dans le tableau suivant on a la quantité des composants dans le clinker en %, plus leur enthalpie libre en kJ/%

	+ CaO	+ MgO	- SiO ₂	- Fe ₂ O ₃	+ Al ₂ O ₃	Reste
Quantité en [%]	66.70	0.95	20.83	3.09	5.25	1.09
Enthalpie libre [kJ / %]	3200	2710	2140	250	1720	0

Tableau 7 : composition du clinker

Chaleur de vaporisation :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot (E/100-E) \cdot L_{\text{vap}}$$

Avec:

L_{vap} : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à pression atmosphérique, elle est égale à :

$$L_{\text{vap}} \text{ (eau)} = 2450 \text{ (kJ/kg). H}_2\text{O}$$

E : Humidité de la farine crue en %.(0,6)

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

Gaz CO sortie préchauffeur (Combustion incomplète) :

C'est une perte thermique sous forme d'imbrûlés gazeux (CO). Elle a pour expression :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = V \cdot C \cdot \text{CO}$$

Avec:

V: volume de gaz sortie tour rapporté a la masse du clinker (Nm³ / kg cli)

C : Un coefficient égal à **12.64 10³**.

CO : Fraction du gaz CO en %

La chaleur sensible des fumées sortie préchauffeur s'exprime par :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = V \cdot C_p \cdot (T_a - 20^\circ\text{C})$$

Avec:

V: Volume des fumées rapporté à la masse du clinker (Nm³/kg Clinker).

C_p : Capacité calorifique des fumées (kJ/kg °C).

T_a : Température des fumées (°C).

Chaleur sensible de la poussière :

La chaleur sensible des poussières quittant la tour avec les fumées, est :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot C_p \cdot (T_P - 20^\circ\text{C})$$

Avec :

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

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

T_P: Température des poussières (°C).

La même formule est donnée pour les poussières quittant le refroidisseur avec l'air exhaure.

Chaleur sensible clinker à la sortie du refroidisseur :

Le Clinker a la sortie du refroidisseur fourni une chaleur sensible, la formule est la suivante :

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = m \cdot C_p \cdot (T_c - 20^\circ\text{C})$$

Avec :

m : Masse de Clinker rapporté à la masse de Clinker égale à 1.

C_p: Capacité calorifique du clinker (kJ/kg °C).

T_c: Température du clinker à la sortie (°C).

Air exhaure refroidisseur :

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

$$Q \text{ (kJ/kg clk)} = V \cdot C_p \cdot (T_a - 20^\circ\text{C})$$

V: Volume de l'air séchage rapporté à la masse du clinker (Nm³/kg Clinker).

C_p: Capacité calorifique de l'air séchage (kJ/Nm³°C).

T_a: Température de l'air séchage (°C)

Les pertes thermiques:

Pertes par convection et par radiation

Ces pertes sont exprimées par la formule suivante :

$$Q = (h_{\text{rad}} + h_{\text{conv}}) \cdot A \cdot (T - T_a)$$

h_{rad}: Coefficient de transfert par radiation (W/m²°K).

h_{conv}: Coefficient de transfert par convection (W/m²°K).

m (clinker) : débit horaire de clinker (kg/h).

T : Température de la paroi (°C).

T_a: Température ambiante (°C).

A : Surface de la paroi (m²).

Pour plus de détail voir (annexe 1)

Chapitre 4

Résultats et discussions

I. Bilan de matière

1. Les entrées et les sorties de l'atelier

Le bilan de matière consiste à déterminer les entrées et les sorties de matières ; le but principale étant de calculer l'air faux et aussi de mesurer et calculer les débits pour les utilisés dans le bilan thermique.

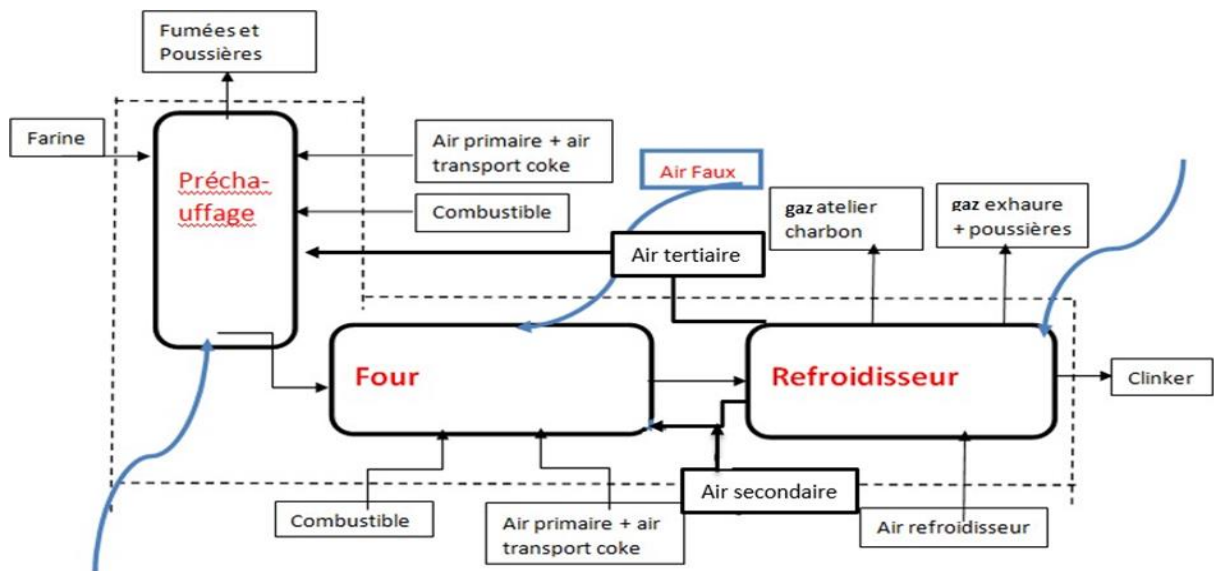


Figure 11: les entrées et les sorties de l'atelier de cuisson

✚ Les entrés de l'atelier de cuisson :

- 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 : 8 ventilateurs qui soufflent l'air dans le refroidisseur pour refroidir le clinker.
- Air transport de coke : air assurant le transfert de coke de l'atelier de charbon vers la tuyère du four et le bruleur du précalcinateur.
- Combustible : le coke de combustion dans le four et la précalcinateur.
- Farine crue : la matière en provenance des silos d'homogénéisation.
- 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.
- Gaz exhaure : gaz non récupéré dépoussiéré et refroidi avant de sortir depuis la cheminée.
- Fumée sortie tour : c'est le gaz sortant du première étage de la tour vers la cheminée et les broyeurs.
- Poussière : la poussière sortant avec la fumée sortie tour.
- Gaz vers l'atelier de charbon : gaz sortant du refroidisseur vers le broyeur charbon.

2. Bilan de matière de l'atelier de cuisson

	Unité	Valeur
Les flux entrants		
Combustible	t/h	18.833
- Four	t/h	6.2
- Précalcinateur	t/h	12.633
Farine cru	t/h	190
Air de refroidissement	Nm ³ /h	194536
Air primaire (four +précalcinateur)	Nm ³ /h	7691
Flux gazeux entrant	Nm ³ /h	202227
Les flux sortants		
Clinker	t/h	115.8
Air exhaure	Nm ³ /h	118606
Air exhaure median	Nm ³ /h	73440
Poussière (tour)	t/h	11.2
Flux gazeux sortant	Nm ³ /h	192046
Air faux	Nm ³ /h	17600
Air faux/flux gazeux entrant		8.70%

Tableau 8: bilan de matière de l'atelier de cuisson

Interprétation :

Le bilan de matière en particulier l'aéraulique permet de trouver la valeur de l'air faux entrant dans le circuit, la valeur trouvée est 17600 **Nm³/h** ce qui constitue 8 ,70% du flux aéraulique entrant dans l'atelier.

L'air faux sera étudié plus en détail par la suite, il est considéré comme une perte de l'atelier.

II. Résultats de calculs du Bilan thermique de l'atelier

Nous avons effectué les calculs selon les équations du bilan thermique voir (chapitre 3 équations du bilan thermique)

Bilan thermique de l'atelier de cuisson				
Flux	Debit	PCI		Chaleur spécifique
		Cp	temp	
Les entrées de chaleur	kg/kg clk.	Kj/kg °C	°C	kJ/kg clk.
	Nm3/kg clk.*			
Chaleur Sensible				
- alimentation four	1,64	0.87	80	85.6
- Combustible (four+ précalcinateur)				8,2
- Air primaire (four+ précalcinateur)	0.05	1.30	78	3.77
- Air de refroidissement	1.68	1.30	25	10.92
Combustion				
-Combustible (four+ précalcinateur)				3398.1
TOTAL des entrées				3506.59
	kg/kg clk.		°C	kJ/kg clk.
	Nm3/kg clk.*			
Chaleur sensible				
-chaleur de formation				1797
-evaporation de l'eau	0.01	2450		24.5
-Poussière air exhaure (prechauffeur)	0.10	1.01	333	31.61
- Air exhaure du préchauffeur				
-gaz sortie tour	1.42	1.50	333	666.69
-CO (Combustion Incomplète)	341	12640		6.12
Clinker (refroidisseur)	1	0.81	130	88.8
Refroidisseur				
-air exhaure médian	0.634	1.332	390	312.47
-air exhaure rejeté	0.39	1.31	180	81.74
Convection et Radiation				
- Tour de préchauffage				266.8
-Virol du Four				169.6
- Refroidisseur				20
TOTAL des sorties				3465.33
Différence (entrée –sortie) non déterminé				41.3

Tableau 9: bilan thermique de l'atelier de cuisson

Interprétation:

La valeur de 41.3 kJ/kg clk de chaleur indéterminée constitue 1.17% 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.

Valeur importante

La consommation calorifique est 3398.1 kJ/kg de clinker qui dépasse la valeur de référence du procédé qui est de 3350 kJ/kg de clinker.

La consommation calorifique varie dans un intervalle allant de 3000 kJ/kg clinker à 3500 kJ/kg clinker.

Combustibles	Debit moyen	PCI	Consommation calorifique spécifique	Repartition de la ccs
	kg/kg clk.	kJ/kg	kJ/kg clk.	%
Conventionnel	0,08345612	31 350,0	2 616,3	77
A.F.G.O	0,050356835	8360,0	421,0	12.39
AF. Fluffs	0,028774101	12540,0	360,8	10,61
Total	0.16258705	-	3398.1	100

Tableau 10: répartition de la consommation calorifique

Commentaire :

- Les combustibles conventionnels (gaz, pétrole) représentent la quasi-totalité de la consommation calorifique (77%), l'optimisation de la consommation des combustibles alternatif s'avère nécessaire vue les exigences environnementales, la rareté et les couts élevés du combustible fossile.

III. Refroidisseur

1. Bilan thermique du refroidisseur

<i>Bilan thermique du refroidisseur :</i>				
	<i>Débit</i>	<i>Pci</i>		<i>Chaleur spécifique</i>
Entrées de chaleur	Kg/kg ck.	CP	T	kJ/kg ck.
	Nm3/kg ck.	Kj/kg °C	°C	
Chaleur sensible:				
- Clinker	1.05	1,08	1350	1508,22
- Air refroidisseur	1,68	1,30	25	10,92
- Air faux dans le refroidisseur	0.05	1,30	25	0,32
TOTAL				1519,4
Sorties de chaleur	Kg/kg ck.		°C	kJ/kg ck.
	Nm3/kg ck.*			
Chaleur sensible:				
- Clinker (inclus poussière dans l'air exhaure)	1.00	0,81	130	89,1
- Air secondaire	0,27	1,41	1015	378,79
-Air tertiaire	0,44	1,41	1015	617,29
- Air exhaure du refroidisseur	0,39	1,31	180	81,74
-Air exhaure median du refroidisseur	0,63	1,33	390	310,023
Radiation et convection				20
TOTAL				1496.94
Différence (entrée-sortie) non déterminé				22.46

Tableau 11: Bilan thermique du refroidisseur

Interprétation :

La valeur de 22.46kJ/kg clk de chaleur indéterminée constitue 1.47% de la chaleur totale entrante dans le refroidisseur, la source la plus probable de cette chaleur est les erreurs de mesures et de calcul.

Les pertes par radiation et convection sont localisés surtout dans la conduite transportant l'air tertiaire.

IV. Rendement, analyse des pertes et recommandation [4]

L'évaluation des rendements et performances, des systèmes étudiés permettent de connaître le niveau de récupération de l'énergie par rapport à l'énergie fournie, et donc d'identifier les pertes thermiques à travers le système étudié. Dans cette partie, on va calculer les rendements de la ligne de cuisson et du refroidisseur et on va proposer des actions à mener pour les améliorer et obtenir en fin de compte une économie d'énergie et par conséquent une diminution du coût d'exploitation.

1. Rendement énergétique au niveau du four

L'énergie utile est donnée par la relation :

$$Q_u = Q_{\text{formation}} + Q_{\text{evap}}$$

Avec :

$Q_{\text{formation}}$: la chaleur de formation depuis le tableau résultat du bilan thermique.

$$Q_{\text{formations}} = 1797 \text{ kJ/kg clk}$$

Q_{evap} : la chaleur d'évaporation de l'eau du coke et de la farine depuis le tableau résultat du bilan thermique.

$$Q_{\text{evap}} = 24.5 \text{ kJ/kg clk}$$

Donc :

$$Q_{\text{utile}} = 24.5 + 1797 = 1821.5 \text{ kJ/k gclk}$$

L'énergie fournie lors de la combustion du coke égale à:

$$Q_c = M_c * PCI = 3398.1 \text{ kJ/kg clk}$$

Finalement le rendement au niveau du four rotatif est :

$$\eta = \frac{\text{energie utile recuperée}}{\text{energie totale dégagée par le combustible}}$$

$$\eta = 53.6\%$$

Remarque :

Rendement du four en dessous du standard (57%).

2. Rendement du refroidisseur

Le rendement de récupération du refroidisseur caractérisé par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{energie recuperée par l'air secondaire et l'air tertiaire}}{\text{energie du clinker entree refroidisseur}}$$

$$\eta = \frac{996.08 - 89,1}{1419.12}$$

D'où :

$$\eta = 63,91\%$$

Remarque :

Le rendement du refroidisseur est en dessous de la valeur standard (70%).

V. Sorties thermiques

1. Répartition des pertes dans l'atelier de cuisson :

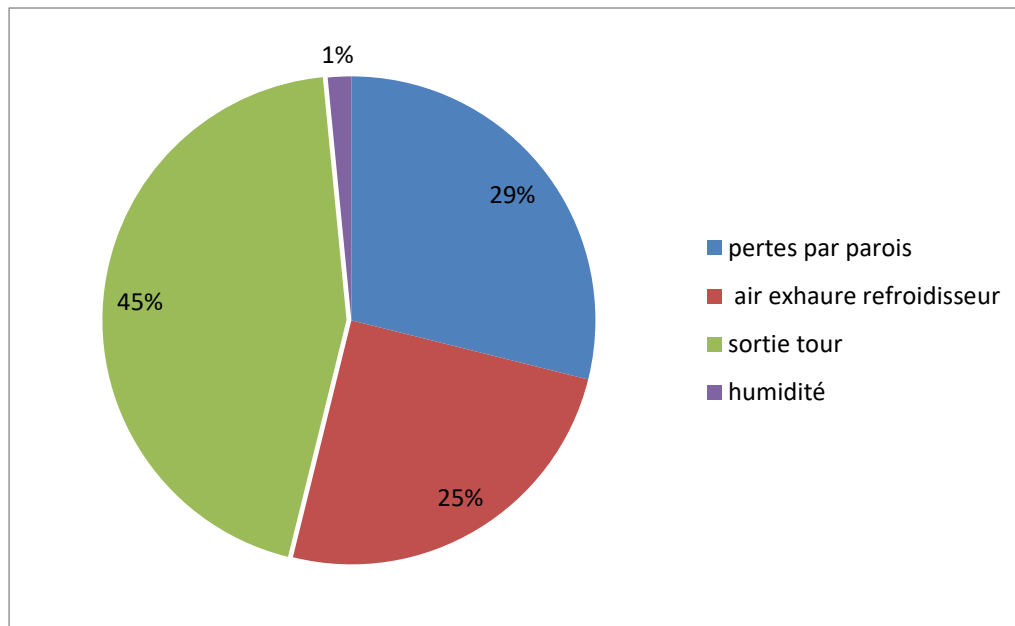


Figure 12: répartition des pertes dans l'atelier de cuisson

Commentaires:

La plupart des pertes observées dans l'atelier de cuisson sont localisées :

- **A la sortie de la tour de préchauffage** : avec un pourcentage de 45% environ 704.42 kJ/kg clinker, les gaz de la sortie de la tour constituent la perte la plus importante de l'atelier : c'est dû principalement à la température des gaz qui est élevée.

- **L'air exhaure:** l'air excédentaire du refroidisseur constitue une perte énorme soit 25% de toutes les pertes de l'atelier;
- **Perte par parois :** les pertes par parois sont des pertes généralement par convection et rayonnement qui alourdissent la consommation calorifique de l'atelier, L'état du briquetage et du croûtage constitue la cause principale de ces pertes.

2. Etudes des principales pertes dans l'atelier de cuisson:

2.1. Perte des gaz sortie tour de préchauffage :

Le flux de chaleur sortant de la tour de préchauffage est de 672.81 kJ/kg de clinker. Les gaz dépassent un petit peu le standard du procédé (650 kJ/kg de clinker) et les pertes sont principalement dues à la vitesse élevée des gaz à l'intérieur des cyclones, qui conduit à un mauvais échange thermique entre la matière et les gaz du four au niveau du préchauffeur.

Il faut donc améliorer la qualité de l'échange thermique de façon à diminuer la chaleur sensible des gaz sortis jusqu'au standard, ce qui génèrera un gain d'énergie E_{Gain} de :

$$E_{\text{Gain}}=672.81-650=22.81 \text{ kJ/kg clinker}$$

2.2. Perte dans le refroidisseur:

Pour augmenter le rendement du refroidisseur de 63,9% a 70% (valeurs standards), il faut optimiser la hauteur de la couche du clinker qui doit être maintenu entre 600mm et 800mm.

2.3. Pertes par air exhaure :

L'air exhaure représente la deuxième perte majeur de l'atelier, la température de l'air exhaure est relativement faible pour la production de vapeur. La seule voie de valorisation possible est la production de l'eau chaude; cependant les besoins en eaux dans les cimenteries sont très faibles et aussi sa commercialisation nécessite des investissements lourds. L'air exhaure est dépoussiéré puis injecté dans l'atmosphère.

2.4 Pertes par parois :

Répartition des pertes par parois :

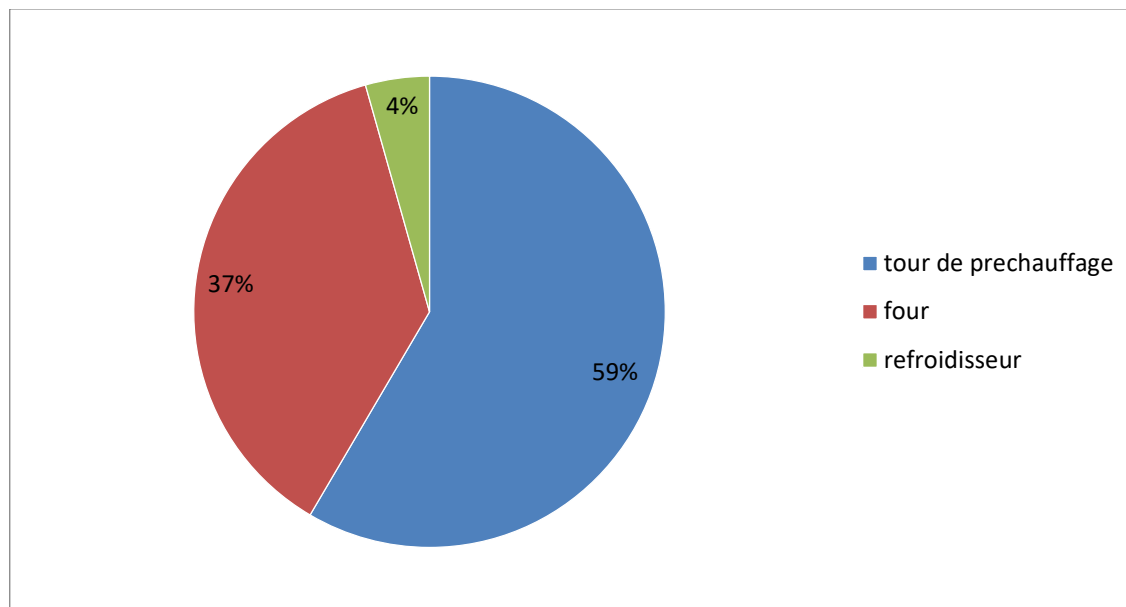


Figure 13 : répartition des pertes par parois

La tour est la première source de pertes, ceci est justifié par l'échange thermique relativement moyen dans la tour, ce qui laisse la température des gaz élevée et augmente la température des parois.

La valeur des pertes totales par parois est 456.4kJ/kg de clinker en dessus du standard (279kJ/kg du clinker).

Le calorifugeage est une solution pour diminuer les pertes par parois.

2.5 L'air faux :

L'air faux contribue à la diminution du rendement thermique de l'atelier. Plus de 17600Nm³/h pénètre l'atelier de cuisson, la répartition de cette quantité est comme suit:

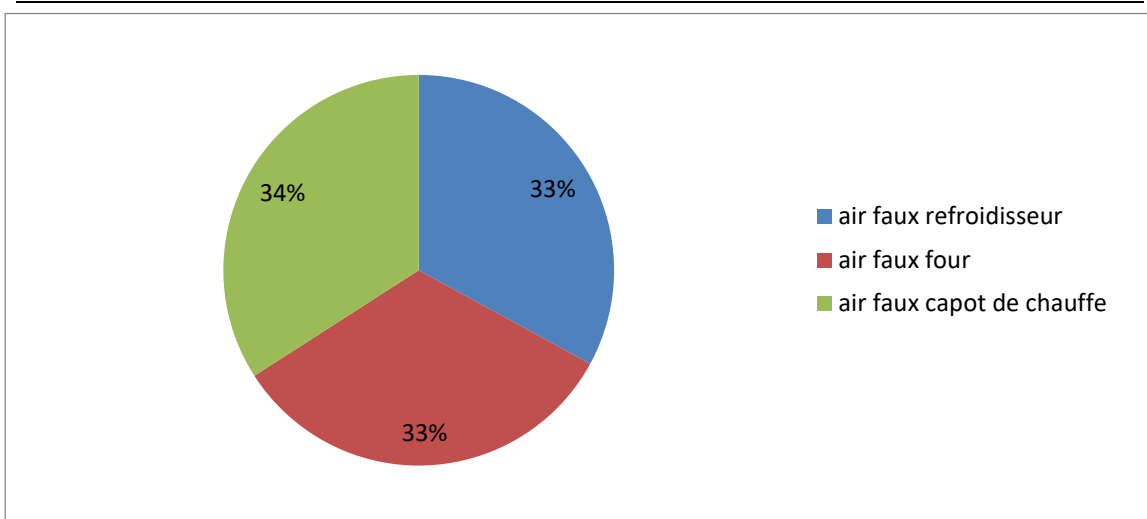


Figure 14 : Répartition de l'air faux dans l'atelier

Une quantité importante d'air faux pénètre dans la tour de préchauffage, des actions correctives sont à mener dans cette zone.

VI. Recommandations :

Désignations	Incohérence	Actions à mettre en place
Air faux	Quantité d'air faux au niveau de la tour de préchauffage est importante.	Vérification des joints d'étanchéité et les portes de visite.
Pertes par parois	Perte par parois dépassent les standards du procédé.	Isolation thermique de la tour de préchauffage : -mettre un béton isolant et une peinture réfléchissante.
refroidisseur	rendement en dessous du standard	Maintenir la hauteur du couche de clinker dans l'intervalle de [600mm ; 800mm]. Contrôle du fonctionnement du refroidisseur.
Air faux	Quantité d'air faux au-dessus des limites standard au niveau du four.	Vérification des joints amont et aval et les portes de visite.
Four	Rendement du four en dessous du standard	S'assurer que les capteurs four soient en parfait état de marche.

Tableau 12 : recommandations

Conclusion

Notre travail réalisé au sein de LafargeHolcim Fès consiste à faire :

- Un bilan thermique de l'atelier de cuisson et l'analyse des sources principales des pertes.
- Des propositions pour l'optimisation du fonctionnement de l'atelier de cuisson.

L'évaluation des performances de l'atelier nous a permis de dégager les résultats suivants :

- Rendement du four en dessous du standard.
- Quantité d'air faux en dessus des limites standard au niveau de la tour de préchauffage et du four.
- La perte par parois dans l'ensemble de l'atelier dépasse la valeur permise.
- Le rendement du refroidisseur (63.91%) est en dessous de sa valeur nominale [70%].
- La consommation calorifique est de 3 398,1 KJ/Kg de clinker en dessus de la valeur de référence [3350 KJ/Kg de clinker].

A l'issue des résultats listés ci-haut, nous avons proposé les recommandations suivantes :

- S'assurer que les capteurs du four soient en parfait état de marche.
- Vérification des joints amont et aval et les portes de visite pour limiter l'air faux aux niveaux du four et de la tour de préchauffage.
- Isolation thermique de la tour.
- Optimisation de la hauteur de couche du clinker au niveau du refroidisseur.

Finalement, ce stage nous a permis de découvrir le monde professionnel et de nous intégrer avec l'ensemble du personnel de la société LafargeHolcim Fès, et qui nous a permis d'améliorer notre esprit d'analyse et d'équipe pour une meilleure communication afin de pouvoir trouver des solutions adéquates à des problématiques industrielles.

WEBOGRAPHIE et BIBLIOGRAPHIE

- [1] Institut de l'énergie et l'environnement de la francophonie.
- [2] Etude des caractéristique physico-chimique de nouveaux bétons éco-respectueux à l'environnement, *Nikolas BUR, Thèse.*
- [3] <http://www.scaek.dz/documents/14.pdf>
- [4] Heat Balances of Kilns and Coolers and Related Topics, holderbank
- [5] Cours de thermodynamique (1 ère année MIP) : Mr Haouache Said

Annexes

Appareils de mesure utilisée

Appareils	Nom et utilisation	Appareils	Nom et utilisation
	Sonde à température : Mesure de la température des gaz.		Tube de BERY : Mesure de la pression dynamique d'un écoulement avec poussière.
	Tube de PITOT : Mesure de la pression dynamique d'un écoulement sans poussière.		Anémomètre à hélice : Mesure de la vitesse des gaz
	Analyseur de gaz et d'air : Mesure de la composition des gaz.		Pyromètre : Mesure de la température (parois).

Annexe 1 : Calcul de perte par radiation et convection [4] :

Méthode de calcul [4] :

En utilisant l'équation dans les équations de chaleur du bilan thermique :

Les températures T (température de parois), Ta (température ambiante) sont mesurées par un pyromètre et sonde à température voir annexe 1: appareils de mesure utilisés.

Le coefficient global de transfert est calculé en utilisant un abaque [4] :

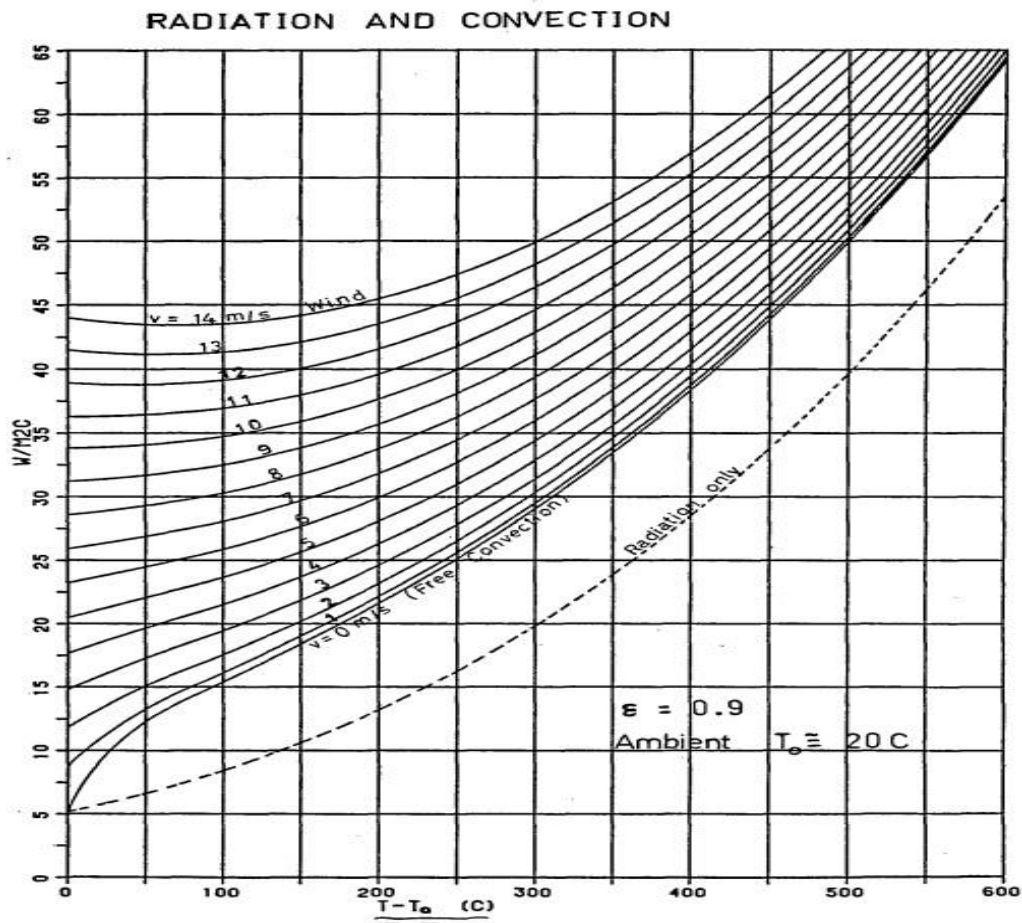


Figure 1 : Abaque de coefficient global de transfert en fonction d'autres paramètres.

La vitesse du vent est mesurée avec un Anémomètre à hélice voir annexe 1 : les appareils de mesure utilisés.

L'émissivité ϵ est fixée à 0,9 pour un acier oxydé.

La température ambiante sera corrigée dans les calculs pour le calcul du coefficient

global depuis l'abaque.

La surface de la paroi A dépend de l'équipement.

Pour le four rotatif, la subdivision sera en plusieurs cylindres d'une surface $A_i = \pi D_i L_i$ (m²).

Annexe 2 : les différentes caractéristiques des briques réfractaires utilisées selon la longueur du four

Selon la longueur du Four	1m-2m	3m-8m	9m-10m	11m-20m	21m-34m	35m-62m
Type de brique	KRONEX 87 Bauxite (type gibbsite)	ALMAG AF Magnésie- spinnelle fusé	FERROMAG 90 Magnésie- hercynite	PERILEX CF Magnésie- spinnelle (spinnelle fMA)	REFRAMAG AF Magnésie- Spinnelle	KRONEX Bauxite, chamotte
Composant principal en %	83-87 Al ₂ O ₃	85-89 MgO	87-92 MgO	78-82 MgO	82-87 MgO	58-62 Al ₂ O ₃
Densité g/cm ³	2,85-3,00	2,95-3,10	2,85-3,00	2,95-3,10	2,85-3,00	2,40-2,55
Porosité ouverte %	16-18	13-15	16-18	13-15	15-17	15-17
Résistance à l'écrasement à froid N/mm ²	100	70	50	70	65	60
Résistance à l'affaissement sous charge à chaud						
Ta	1550	>1700	1650	1600	>1700	1500
Te	1700	> 1700	> 1700	1700	> 1700	1680
Cône de Seger	40	> 42	> 42	42	> 42	36
Dilatation thermique % lin.						
400°C	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
800 °C	0,5	0,9	0,9	1,0	0,9	0,5
1200 °C	0,8	1,4	1,5	1,6	1,5	0,8
Résistance aux Chocthermiques	100	100	100	100	100	60

Tableau 1 : les différentes caractéristiques des briques réfractaires utilisées selon la longueur du four