

Faculté des Sciences et Techniques de Fès



Département de Génie Industriel



LST de Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes

Mise en place d'un flash-process
pour le suivi des performances du
four rotatif de la cuisson du ciment

Lieu : Holcim ; Fès

Référence : 15 /16GI

Préparé par :

- GENANE Khalil
- MDARHRI ALAOUI Achraf

Soutenu le 09 Juin 2016 devant le jury composé de :

- Pr S. Haouache (Encadrant FST)
- Pr M. El Hammoumi (Examineur)
- Pr M. Rjeb (Examineur)
- Mr. Nawfal Lambaraa (Encadrant Société)

Dédicace

A Nos Parents

*En témoignage de notre amour, notre affection et notre reconnaissance pour les
efforts qu'ils ont consentis pour nous durant toutes ces années*

A Nos frères et Nos sœurs

A Nos familles sur tout Nos Grands Parents

A tous Nos amis

*A tous ceux qui nous sont chers, Qui nous offrent leur amour
et leur affection*

Merci pour votre soutien et encouragement

*Nous vous dédions ce modeste travail en signe de reconnaissance et de
dévouement.*

*Khalil GENANE
MDARHRI ALAOUI Achraf*

Remerciements

« Il n'y a guère au monde un plus bel excès que celui de la reconnaissance. »

Jean de la Bruyère

Au terme de la rédaction de ce rapport de stage de projet de fin d'études, nous présentons nos sincères remerciements à la Direction de la Faculté des Sciences et Techniques, de nous avoir accueillis dans leur établissement et à L'ensemble du corps professoral pour leurs enseignements au cours des trois années scolaires qui viennent de s'écouler, en particulier au professeur Saïd HAOUACHE, qui a accepté d'être notre tuteur pédagogique. Nous avons apprécié l'étendue de ses connaissances et de ses grandes qualités humaines. Nous lui sommes très reconnaissants de bien vouloir porter intérêt à ce travail.

Nos respectueuses reconnaissances sont adressées à Monsieur M.CHETTABI directeur générale de l'usine qui a bien voulu nous accepter au sein du service production.

Nous remercions également Mr Nawfal LAMBARAA pour nous avoir assuré l'encadrement de ce travail et pour nous avoir fait profiter de ses vastes connaissances scientifiques qui nous ont permis de mener à terme ce travail ainsi qu'à l'ensemble du personnel de Holcim Fès pour leur disponibilité et leur collaboration.

Aux membres de Jury, nous exprimons nos gratitude et nos remerciements du grand honneur qu'ils ont manifesté à notre égard en acceptant de juger ce travail et de siéger à la commission d'examen.

Nous tenons à remercier enfin tous ceux que nous n'avons pas nommés et qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Merci à tous

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Entreprise et procédé de fabrication du ciment.....	2
A-Présentation de l'entreprise	3
I. Présentation de Holcim Maroc.....	3
I.1)- Introduction	3
I.2)- Présentation du groupe Holcim	3
I.3)- Holcim Maroc	3
I.4)-Implantation au Maroc	4
I.5)- Situation de la cimenterie Holcim dans le marché national	4
I.6)-Fiche signalétique.....	4
I.7)-Historique de Holcim Maroc.....	5
II. Présentation de Holcim Fès Ras El Ma	6
II.1). Situation géographique et accessibilité	6
II.2). Activités	7
II.3). Organigramme interne de la société Holcim Fès- Ras ELMA.....	7
B-Procédé de fabrication du ciment	8
I. Généralités	8
I.1)- Définition du ciment	8
I.2)- Types du ciment	8
I.3)- Les différentes voies de production du ciment	9
II. Description du Procédé utilisé par Holcim Fès	9
II.1)- Etape 1: Préparation des matières premières	9
II.1.1)- La carrière	9
II.1.2)- Le concassage	10
II.1.3)- Le Transport des matières premières	10
II.2 Etape 2: Homogénéisation et broyage du cru	11
II.2.1)- Pré-Homogénéisation.....	11
II.2.2)- Dosage crû	11
II.2.3)- Broyage du crû.....	11
II.2.4)- Dépoussiérage	12
II.3 Etape 3: Production du Clinker (ligne de Cuisson)	12
II.3.1)- Tour de préchauffage	13

II.3.2)- Four rotatif	14
II.3.3)- Refroidisseur	15
II.4 Etape 4: Mouture du ciment et expédition.....	16
II.4.1)- Silos à clinker.....	16
II.4.2)- Broyage du ciment	17
II.4.3)- Ensachage et expédition.....	17
Chapitre II : Paramètres de suivi des performances du four	18
 I.Introduction.....	19
I.1)- Définition des paramètres.....	19
I.2)- Mesure des paramètres	19
I.3)- Les intentions de suivi du four	19
II. Paramètres process	20
II.1)- Température de la zone de cuisson (BZT)	20
II.2)- Température à l’amont du four (BZT)	20
II.3)- Concentration d’oxygène dans les gaz de combustion	21
II.4)- Débit farine	21
II.5)- Tirage dans le four	21
II.5.1)- Paramètres secondaires	22
II.6)- Débit des combustibles injectés au four.....	23
II.7)- Vitesse du four	23
III. Paramètres qualité	23
III.1)- Facteur de Saturation en Chaux (FSC)	23
III.2)- Module Silicique (MS)	24
III.3)- Module Alumini Ferrique (MAF).....	25
III.4)- La Fluorine	26
III.5)-Finesse du crû	26
IV. Paramètres maintenance.....	27
IV.1)- MTBF (Mean Time Between Failures)	27
IV.2)- MTTR (Mean Time To Repair).....	28
IV.3)- Disponibilité	28
V. Mise en place du tableau de bord	28
V.1)- Exemples de suivi des paramètres du four rotatif.....	28
V.2)- Elaboration du tableau de bord	29

Chapitre III :Etude des transferts thermiques et calcul des pertes d'énergie	31
A-Rappels théoriques.....	32
I. Modes de transfert de chaleur	32
I.1)- Transfert de chaleur par conduction.....	32
I.2)- Transfert de chaleur par convection	33
I.3)- Transfert de chaleur par rayonnement.....	33
I.4)- Flux de chaleur lié à un débit massique	34
II.Les effets de la chaleur sur la matière	34
II.1)- La dilatation et la contraction thermique	34
II.2)- Les changements d'état.....	34
B-Calcul des pertes thermiques	35
I. Introduction.....	35
II. Caractéristiques du four et des combustibles	36
II.1)- Caractéristiques du four	36
II.2)- Données thermique	36
II.3)- Pouvoir calorifique des combustibles	36
II.4)- Chaleur spécifique (C_p)	36
III. Calcul des flux de chaleur	37
III.1)- Flux de chaleur à l'entrée	37
III.2)- Flux de chaleur absorbée	37
III.3)- Calcul des pertes par paroi.....	37
III.3.1)- Conduction - Convection.....	37
III.3.2)- Rayonnement	38
III.3.2)- Pertes par fumée	38
III.4)- Calcul des gains	39
III.4.1)- Taux de pertes totale de la chaleur	39
III.4.2)- Chaleur absorbée	39
IV). Solution pour diminuer les pertes thermiques	40
IV.1)- Calcul des pertes thermiques avec isolant.....	40
IV.1.1)- Etude d'épaisseur de l'isolant.....	40
IV.1.2)- Pertes de chaleur par conduction & convection	41
IV.2)- Calcul de la chaleur totale perdue	42
IV.3)- Calcul des gains.....	42

IV.3.1)- Taux de pertes totales de la chaleur.....	42
IV.3.2)- Chaleur absorbée	42
Conclusion.....	43
Bibliographie	44
Webographie	45
Annexes	46

Liste des Figures

Figure 1 : Organisme générale de HOLCIM Fès	7
Figure 2 : Atelier de pré-homogénéisation.....	11
Figure 3 : Broyeur crû	12
Figure 4 : Différents flux dans la tour de préchauffage.....	13
Figure 5 : Four rotatif de Holcim Fès Ras El Ma.....	14
Figure 6: Construction du four rotatif	15
Figure 7 : Installation des briques réfractaire	15
Figure 8 : Différentes étapes de cuisson	15
Figure 9 : Les zones du refroidisseur à grilles	16
Figure 10 : Influence de FSC sur la CCS	24
Figure 11 : Influence de MS sur la CCS.....	25
Figure 12 : Influence de M.A.F Sur La CCS	25
Figure 13 : Influence de la finesse sur la CCS	27
Figure 14 : La relation entre le débit de farine et la puissance alimentatio tour	28
Figure 15 : Influence de la vitesse du four sur le taux d'oxygène	29
Figure 16 : Schéma du transfert de chaleur conductif	32
Figure 17 : Schéma du transfert de chaleur convectif	33
Figure 18 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	33
Figure 19 : Comparaison de la consommation calorifique entre 2014 et 2015.....	35
Figure 20 : Isolant en laine de verre	40
Figure 21 : Evolution du flux de chaleur et de la résistance thermique.....	40

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Cimenteries du Maroc et leurs parts du marché	4
Tableau 2 : Fiche signalétique de Holcim Maroc	4
Tableau 3 : Informations sur le four rotatif de Holcim Fès Ras El Ma	14
Tableau 4 : Conditions sur les paramètres process (BZT, BET, O_2)	21
Tableau 5 : Fourchettes des paramètres qualité	26
Tableau 6 : Données de calcul du MTBF	27
Tableau 7 : Tableau de bord de suivi des performances du Four	30
Tableau 8: Caractéristiques du Four de Holcim Ras El Ma	36
Tableau 9 : Pouvoir calorifique des combustibles.....	36
Tableau 10 : Chaleur spécifique de chaque matière	36

Liste des abbreviations

CPJ : Ciment Portland avec ajout de constituants secondaires.	$\phi_{absorbée}$: Quantité de chaleur absorbée par la farine (sans isolant) (W)
BK : Broyeur de Clinker.	$\phi_{pertes-1}$: Quantité de chaleur perdue par paroi (convection & conduction) (sans isolant)
LTD: <i>limited company</i>	$\phi'_{pertes-1}$: Quantité de chaleur perdue par paroi (convection & conduction) (avec isolant) (W)
BTP: <u>Bâtiment et travaux publics</u>	$\phi_{sans\ isolant}$: Quantité de chaleur perdue (sans isolant thermique) (W)
BZT : <i>Burning Zone Temperature</i> (°C)	R_{th} : Résistance thermique (W^{-1})
BET : <i>Temperature at the back end</i> (°C)	R'_{th-tot} : Résistance thermique totale (avec isolant) (W^{-1})
FSC : Facteur de Saturation en Chaux (%)	C_p : Chaleur spécifique ($KJ / Kg \cdot ^\circ C$)
MAF : Module Alumino Ferrique (%)	R_{th-tot} : Résistance thermique totale (sans isolant) (W^{-1})
MS : Module Silicique (%)	$\phi'_{absorbée}$: Quantité de chaleur absorbée par la farine (avec isolant) (W)
F^- : Fluorine (%)	$T_{air-ambient}$: Température de l'air ambiant (°C)
CaO : Oxyde de calcium, communément appelé « chaux vive »	$T_{\infty i}$: la température à intérieur du four (loin de l'axe Horizontal) (°C)
SiO_2 : Dioxyde de silicium (silice)	$T_{\infty e}$: la température à l'extérieur du four (loin de la paroi extérieure) (°C)
Al_2O_3 : L'alumine ou oxyde d'aluminium	T_e : Température de la farine à l'entrée(°C)
Fe_2O_3 : Oxyde de fer	T_s : Température de la farine à la sortie(°C)
MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement (h)	T_{p-ext} : Température de la paroi extérieure (°C)
MTTR : Mean Time To Repair =temps moyen pour réparer (h)	S_L : Surface latérale du cylindre (m^2)
$\phi_{entrée}$: Quantité de Chaleur totale dégagée par les combustibles (W)	r_c : rayon critique (m)
$\phi_{pertes\ par\ fumée}$: Quantité de chaleur perdue par fumée	PCI : <i>Pouvoir Calorifique Inférieur</i> (Kcal / kg)

Glossaire

Filiale	Société dont le capital est détenu à plus de 50% par une autre société, la société mère.
Holding	Société de portefeuille qui détient et gère des participations dans plusieurs entreprises afin d'orienter leur activité, en fonction de la stratégie du groupe.
Normes	Pour une entreprise, ensemble de contraintes qui encadrent son activité.
Argile	Matériau généralement formé de minéraux argileux mais aussi habituellement d'oxydes libres amorphes et de minéraux primaires.
Granulats	matériaux particuliers utilisés en construction comme le sable, le gravier ainsi que la pierre et le laitier concassés.
Pouvoir calorifique	quantité de chaleur par unité de masse produite par la combustion complète d'une substance donnée. Les pouvoirs calorifiques servent à définir les valeurs énergétiques des combustibles, habituellement en mégajoules par kilogramme (MJ/kg).
Précalcinateur	Conteneur qui sert au préchauffage du cru avant son introduction au four.
Coke	Résidu solide provenant de la distillation du charbon à températures élevées (supérieures à 800°C).
Cru	Produit du broyage, mélangé avec des éléments constituant le ciment avant cuisson.
Clinker	Composant du ciment ayant la forme d'un nodule cristallisé résultant de la cuisson, dans un four de calcination, d'un mélange dosé de calcaire et d'argile.
Concassage	Opération consistant à soumettre les matières premières à des efforts d'impact, d'attrition et de cisaillement afin de réduire leurs dimensions.
Broyage	Opération consistant à réduire un matériau en particules plus fines.

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie cimentière est toujours à la recherche d'un outil permettant de juger de la performance (énergétique, thermiques.....) de ces installations et d'identifier les postes de consommations qui devront faire l'objet d'une rénovation ou d'une optimisation.

Cet outil devra se présenter sous la forme d'un « Tableau de bord ». Il devra permettre de repérer, à travers d'indicateurs, les points forts, mais surtout les points faibles du fonctionnement. La finalité de ce nouvel outil est donc de pouvoir déterminer quelles opérations seront à mettre en œuvre afin de réduire les consommations et d'améliorer la performance, le confort intérieur, et les qualités de production de l'installation.

Le but de ce projet effectué à Holcim Ras El Ma au sein du service production, est d'établir un tableau de bord pour la suivi des performances de la ligne de cuisson et spécifiquement celle de four en tenant compte de tous les paramètres qui ont une influence sur ce dernier, et essayer de trouver l'effet de quelques paramètres sur la consommation calorifique.

- Les principaux objectifs visés sont :

- ✓ Localiser les différentes paramètres et pertes de fonctionnement .
- ✓ Etablir un tableau de bord clair pour la conduite des mesures des différents paramètres.

Le présent rapport est subdivisé en trois chapitres:

- ✓ Le premier chapitre porte sur la présentation de la société d'accueil, ainsi qu'une description du procédé de production du ciment dans cette société.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à l'identification des différents paramètres
- ✓ Le troisième chapitre de ce rapport est divisé en deux parties :
 - La première partie est réservée aux rappels théoriques ;
 - La deuxième partie est consacré à l'étude des pertes de chaleur et la solution proposé

Chapitre I : Entreprise et procédé de fabrication du ciment

A-Présentation de l'entreprise

I- Présentation de HOLCIM MAROC

I.1)-Introduction

- Le nom HOLCIM est simple et facile à retenir :

Hol : rappelle les origines du Groupe (le village Holderbank) ;

Cime : symbolise l'activité du ciment.

- HOLCIM est un organisme national comportant plusieurs unités, dont chacune emploie des technologies récentes dans le domaine de l'industrie du ciment.

- Au sein de chaque unité il existe une organisation aussi bien élaborée qui permet de maintenir le contact avec toutes les unités pour former le grand organisme HOLCIM.

I.2)- Présentation du Groupe Holcim

- Holcim Ltd est un groupe suisse fondée en 1912, est un acteur majeur au niveau mondial dans la production de ciment, granulats et bétons.

- Holcim compte parmi les leaders de la production de matériaux de construction car il se concentre sur ses produits de base, en particulier la production et la distribution de ciments et granulats. , il compte 90000 employés à travers le monde.

- Actif dans près de 70 pays, le groupe Holcim offre la plus grande diversité géographique du marché.

- Présent aussi bien en Europe que dans les pays émergents, sa diversification géographique assure la solidité de son économie.

I.3)-Holcim Maroc

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

-**Vision** : être le promoteur du professionnalisme des filières BTP et du développement durable au Maroc.

-**mission** : est d'apporter au marché des produits et des solutions reconnues, performantes et durables accompagnant le développement économique et social du Maroc dans les filières du BTP.

I.4)- Implantation au MAROC

- Aujourd'hui Holcim est présente dans différentes régions du Maroc et dispose d'une capacité annuelle de production de 3,9 millions de tonnes, elle exploite trois cimenteries à Oujda, Fès et Settat, un centre de broyage, d'ensachage et de distribution à Nador, ainsi qu'un centre de distribution à Casablanca.

I.5)-Situation de la cimenterie Holcim dans le marché national

- L'industrie cimentière est l'une des activités industrielle les plus structurées et les plus réparties sur Le territoire national. Elle réalise en moyenne 46% de la production et 50% de la valeur ajoutée du Secteur matériaux de construction. Le marché national est réparti entre les différents acteurs comme suit :

Opérateurs cimentiers	Part du marché
Holcim Maroc	20,8%
LAFARGE Maroc	37%
Ciment du Maroc	25,4%
ASMENT Temara	26,4%
Ciment de l'atlas	9,5%
Le reste (Ynna Ciment et autres)	1,7%

Tableau 1 : Cimenteries du Maroc et leurs parts du marché

I.6)- Fiche signalétique

Raison sociale	HOLCIM (MAROC)
Forme juridique	société anonyme de droit privé
Date de création	1976 pour une durée de 99 ans
Activité	production et commercialisation du ciment
Capital social	494.626.000 MAD
Registre commercial	24713
N° de production fiscale	512367
Affiliation à la CNSS	2132223
Capacité de production	2.000.000t/an

Tableau 2: Fiche signalétique de Holcim Maroc.

I.7)- Historique de Holcim Maroc

- Ci-dessous quelques dates clés du développement de Holcim au Maroc :

1972 : Les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la SNMC, organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.

1976 : L'ODI crée une société nouvelle dénommée Cimenterie de l'Oriental (CIOR) qui reprend les actifs de la CIMA avec pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.

1979 : Holcim Maroc, 30 ans au service de la construction du Maroc. AR Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.

1980 : Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 T /an.

1982 : Installation à Casablanca d'un centre d'ensachage d'une capacité de 350 000 tonnes par an.

1985 : Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.

1989 : Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 T/an.

1990 : Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et lancement de l'activité BPE avec l'installation d'une première centrale à béton à Fès.

1993 : Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an. Prise de contrôle majoritaire du capital de la CIOR par Holcim Ltd dans le cadre du programme de privatisation.

1997 : Installation d'une centrale à béton à Rabat et d'une autre à Casablanca.

1999 : Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca. Mise en service d'un centre de broyage et d'ensachage à Nador. Mise en service des installations de valorisation de combustibles de substitution à l'usine de Fès Ras El Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador.

2001 : Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.

2002 : Changement de l'identité visuelle: CIOR devient Holcim Maroc. Démarrage de la nouvelle activité granulats (Benslimane). Début des investissements relatifs à la réalisation du dispositif industriel de Fès .

Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie d'Oujda.

2004 : Extension de la cimenterie de Fès.

2005 : Démarrage du centre d'ensachage et de distribution de Settât.

2006 : Extension du centre de Nador.

2007 : Démarrage de la cimenterie de Settât et de la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval.

2008 : Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès
Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.

2009 : Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc:
BATIPRO Distribution.

Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settât et de la plateforme de traitement de déchets Ecoval

2010 : Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.

2012 : Doublement de la capacité de production clinker de l'usine de Fès

2013 : Mise en arrêt d'une des deux lignes de cuisson de l'usine d'Oujda en mai 2013 en raison d'un ralentissement de la demande au niveau national.

2014 : Fusion du groupe LAFARGE avec son concurrent HOLCIM.

II. Présentation de Holcim Fès - Ras El Ma

II.1)- Situation géographique et accessibilité

- La cimenterie de Fès est située dans la localité de Ras El Ma à 25 Km de la ville de Fès et à 340 Km du port de Nador, à partir duquel elle est alimentée en pet coke.

-La liaison routière avec les autres régions du Royaume se fait à partir de l'autoroute reliant Casablanca et Oujda, tandis que l'accès à la ville de Fès se fait directement via les localités de BENSOUHA et de ZILILIG.

II.2)- Activités

- L'usine de Fès - Ras El Ma a été mise en service en 1993 et ne produit que du clinker pendant les trois premières années de son activité. Depuis 1996, l'usine de Fès Ras El Ma produit et commercialise différentes qualités de ciment.

- L'usine comprend des ateliers de concassage, de broyage, d'homogénéisation et de stockage de la farine, de cuisson et stockage du clinker, de broyage du ciment et d'ensachage et expédition du ciment.

- La production s'effectue à partir de matières premières extraites de la carrière de calcaire et de la carrière de schiste, les deux se situant à proximité de l'usine.

- L'usine de Fès est dotée des certificats de conformité aux normes ISO 9001 version 2008 de la gestion de la qualité, ainsi que la norme relative au management environnemental ISO 14001 version 2004.

- Le site bénéficie de plusieurs avantages, entre autres :

- ✓ La disponibilité des matières premières en quantité et en qualité.
- ✓ La possibilité d'alimentation en eau et en énergie électrique.
- ✓ La qualité des terrains du point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie

II.3)- Organigramme interne de la société Holcim Fès- Ras ELMA

- L'organigramme de la société Holcim Fès- Ras ELMA se présente de la forme suivante :

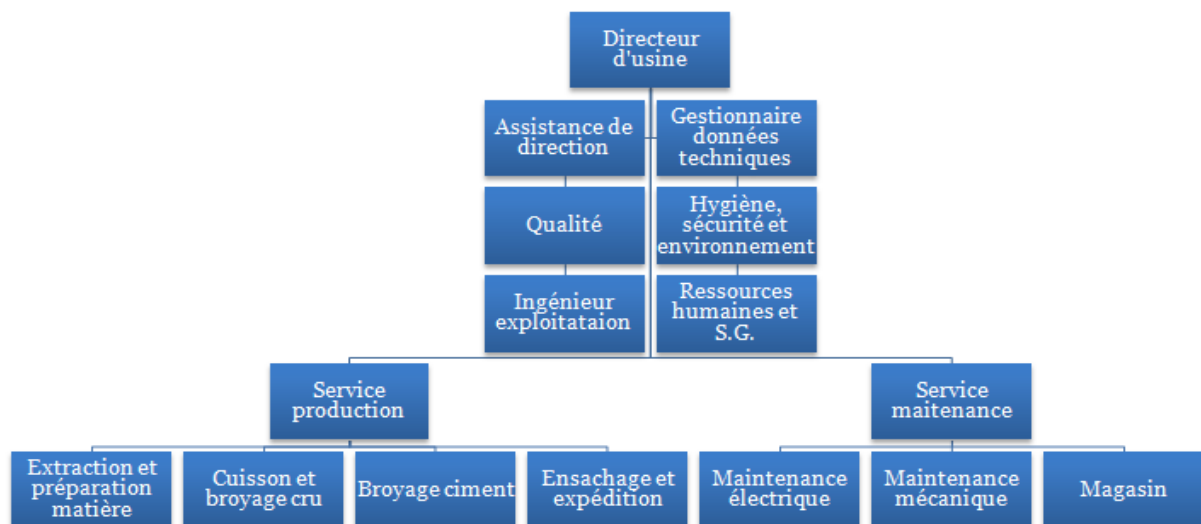


Figure 1 : Organigramme générale de HOLCIM Fès

B- Le procédé de fabrication de ciment

I- Généralités

I.1)- Définition du ciment

❖ Norme NF P 15-301 de 1994 :

« 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. »

I.2)- Types du ciment

-HOLCIM Ras el Ma produit trois types de ciment suivant leur classe de résistance : CPJ 35, CPJ 45, CPJ 55. Ces trois types sont constitués de clinker, gypse et de calcaire.

- CPJ35 : Ciment Portland composé avec ajouts : Il est principalement constitué du Clinker du filler et du gypse. La classe de résistance du CPJ35 fait de lui un produit particulièrement adapté à la fabrication des mortiers et des enduits pour la maçonnerie, ainsi que les bétons non armés sollicités et à résistance mécanique peu élevée. Il est aussi utilisé dans le domaine routier pour stabiliser les sols et les couches de caussées.

- CPJ45 : Ciment Portland composé avec ajouts : Il est principalement constitué du clinker du filler et du gypse. La classe de résistance du CPJ45 lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés, fortement sollicités et à résistance mécanique élevée.

- CPJ55 : Ciment Portland composé : Il est composé essentiellement du clinker et du gypse. Sa classe de résistance est de 55 MPA. Il est destiné à la fabrication des bétons armés à haute résistance.

I.3)- Les différentes voies de production du ciment

- Il existe 4 principaux procédés de fabrication du ciment qui diffèrent entre eux par la nature du traitement thermique utilisé.

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

➤ **La voie semi humide:** la matière est préparée en voie humide, puis séché avant le four.

➤ **La voie semi sèche:** la farine crue, sèche, passe d'abord dans un gradateur ou elle est humidifiée.

➤ **La voie sèche:** c'est la plus économique. La matière première, une fois concassée est broyée à sec, homogénéisée, et avant l'entrée au four, elle se chauffe à travers des cyclones. A l'entrée du four rotatif, la farine est sous une température de 900°C à 1000 °C. autrement dit, cette voie est plus rentable et plus optimale au niveau énergétique.

II- Description du procédé utilisé par Holcim Fès

- La fabrication de ciment à HOLCIM REM à Fès, utilise **le procédé par la voie sèche** car il est plus économique en énergie. Ce procédé se réduit schématiquement aux quatre opérations suivantes :

- ✓ Préparation des matières premières.
- ✓ Homogénéisation et broyage du cru.
- ✓ Production du Clinker (cuisson).
- ✓ Ensachage du ciment et expédition.

II.1)- Etape 1 : Préparation des matières premières

II.1.1) -La carrière :

- Pour assurer son approvisionnement en matières premières, la cimenterie de Fès dispose de deux carrières : l'une du calcaire et l'autre des schistes, ils sont extraits par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore au bulldozer afin de réduire les couts de transport.

- **Carrière de calcaire :**

- Le Calcaire est exploité à partir de la carrière située à proximité de l'usine, l'extraction se fait à partir d'un abattage à l'explosif, le pourcentage du calcaire dans la production peut atteindre 80%.

- **Carrière de schiste :**

- La carrière du schiste est située à 45 Km du site de l'usine, l'extraction est soustraite et le pourcentage peut aller de 15 à 20%.

II.1.2) -Le 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.

- Le concasseur a pour rôle de réduire la taille des rochers jusqu'à un diamètre moyen de 10 cm. Au niveau du concasseur, les matières premières sont mélangées dans des proportions bien déterminées.

- Pour réduire la taille des blocks, le concassage soumet les matières premières à des efforts impact, de cisaillement ou de compression. Le type du concasseur est choisi en fonction du procédé de concassage adopté par la cimenterie.

- Ce concasseur est constitué de deux rotors, chaque rotor contient 18 marteaux et il peut traiter jusqu'à 400 tonnes par heure.

- La matière sortant du concasseur est acheminée vers un hall de stockage par un convoyeur à bande.

II.1.3) - Transport des matières premières

- Le transport et la manutention des matières premières est assuré par des engins mécaniques (pelles mécaniques, chenilles, camions bennes, ...) et des équipements de manutention. Les engins mécaniques sont utilisés lors des phases d'extraction et d'alimentation du concasseur et pour le transport des ajouts. Les équipements de manutention (bandes, aéroglosses, élévateurs, ...) sont utilisés après l'opération de concassage pour transporter les différentes matières entre hall de stockage et les différentes installations de l'usine.

II.2)- Etape 2 : Homogénéisation et broyage du cru

II.2.1)- Pré-homogénéisation

- La pré-homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières, ce mélange est dénommé en cimenterie par le crû.

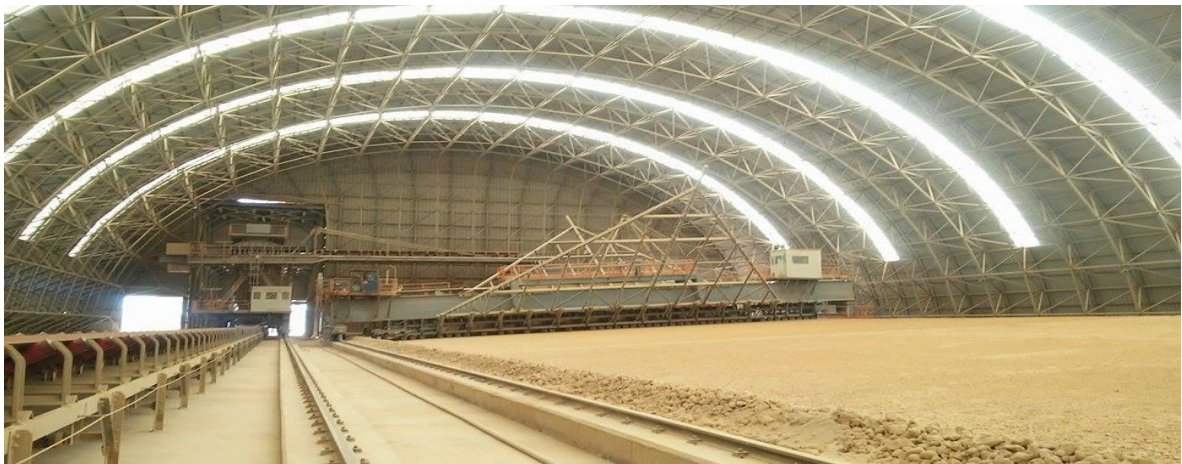


Figure 2 : Atelier de pré-homogénéisation

II.2.2)- Dosage crû :

- Cette étape a pour but de déterminer et de réaliser un pré-dosage des quartes constituants de base du «clinker» (78.5% calcaire + 20% de schiste + + 1,5% de minerai de fer). Pour cela, on dispose de quatre trémies assurant le stockage des matières premières.

- Une fois le dosage effectué, les constituants sont rejetés dans une bande transporteuse pour le broyage.

II.2.3)- Broyage du crû

- Le broyage du crû est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. Le broyage du crû consiste à l'introduire dans le broyeur à crû dans lequel il subit des actions mécaniques pour l'obtention de la farine. La farine obtenue (qui est une poudre fine) est stockée dans un silo après avoir subi une opération

d'homogénéisation pour obtenir une composition chimique régulière des matières premières qui seront introduites dans le four pour cuisson.

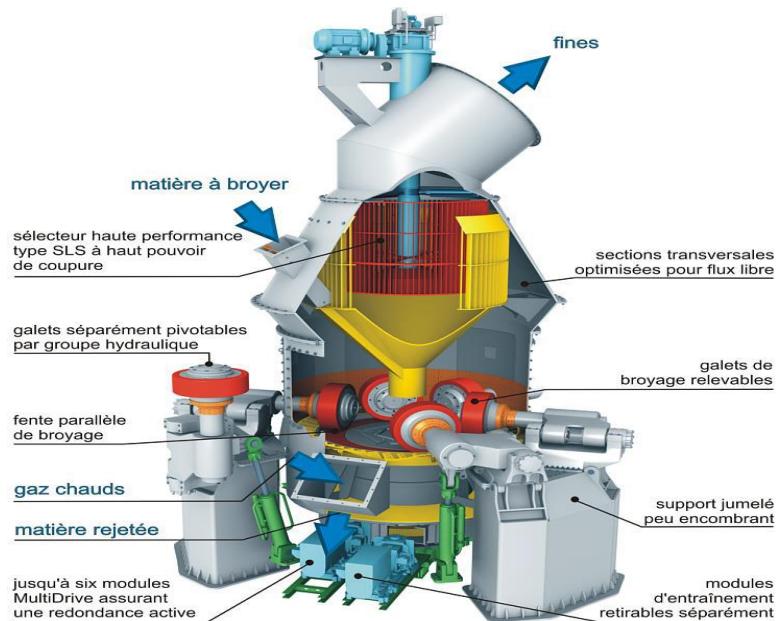


Figure 3 : Broyeur crû

II.2.4)-Dépoussiérage

- Le transport de la farine du crû par des aéroglissières risque de générer des poussières. Le système de dépoussiérage consiste à éliminer les émissions des poussières par l'utilisation de filtres à manches ou d'électro-filtres pour une meilleure protection de l'environnement. Ceci permet à la fois un gain en productivité et une réduction des nuisances engendrées par les poussières aussi bien pour l'installation que pour le personnel

- A noter que le dépoussiérage n'est pas une opération spécifique à la farine, d'autres ateliers (le broyage du ciment par exemple) comportent des systèmes de dépoussiérage.

II.3- Etape 3: Production du Clinker (ligne de Cuisson)

- La cuisson est l'opération fondamentale de la préparation du ciment, elle recouvre toutes les étapes de transformation chimique de la farine crue, jusqu'à la formation du clinker.

- L'atelier de cuisson est constitué de trois éléments principaux :

- ❖ Deux tours à cyclones ;
- ❖ Un four rotatif ;
- ❖ Un refroidisseur.

II.3.1)- tour de préchauffage :

- Une tour de préchauffage permet de préchauffer la matière avant son introduction dans le four par un échange thermique entre la matière froide, injectée à son sommet et descendant vers le four par une cascade de cyclones, et les gaz chauds traversant le four et tirés par des ventilateurs vers le haut de la tour.

- Les cyclones réalisent la séparation gaz-matière à chaque étage du préchauffeur.

- L'opération commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se

poursuit par la décarbonatation. Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés verticalement sur plusieurs étages, appelée " Préchauffeur". La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C



Figure 4 : Différents flux dans la tour de préchauffage

- le préchauffage comporte deux étapes de la cuisson :

- **Évaporation de l'eau : aussi dite déshydratation** (c'est-à-dire le départ de l'eau libre et l'eau combinée) et se fait entre 250°C et 750°C. Les granules du cru humide passent dans une grille mobile qui les fait progresser jusqu'au four. Elle est divisée en deux chambres : la première pour le séchage et le deuxième pour la décarbonatation.

- **La décarbonatation** : Le cru étant séché, il s'échauffe sans grande réaction chimique jusqu'à une température de l'ordre de 950 °C où intervient la décarbonatation de la phase calcaire : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

- De cette réaction endothermique résulte la formation de CaO naissante indispensable pour la formation des différentes phases du clinker, accompagnée d'un important dégagement gazeux de CO_2 .

II.3.2)- Le four rotatif :

- Le four rotatif est un cylindre en acier de 62m de longueur, reposant sur des stations de roulement, il est garni intérieurement par des produits réfractaires, et présente une inclinaison de 3% dans le sens de l'écoulement de la matière, dans laquelle on injecte le combustible sous pression pour produire une flamme. Il permet un échange de chaleur à contre-courant entre la farine et la chaleur cédée par la flamme et les gaz récupérés du refroidisseur.

- Le four est constitué par une virole en acier animé d'une vitesse de rotation variable pouvant atteindre 5,2 tr/mn.

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

- Cette inclinaison combinée avec la rotation font que la matière puisse progresser par gravité vers le brûleur, ce brûleur dégage une flamme qui s'établit à la sortie de la tuyère lieu où le combustible (Fuel, coke de pétrole) et le comburant (O₂ de l'air) et qui peuvent atteindre 1450° C. La matière sortant du four est le clinker.



Figure 5 : Four rotatif de Holcim Fès Ras El Ma

installation	longueur (m)	Rayon intérieur(m)	Rayon extérieur (m)	Pente	Capacité (t/j)
Fou rotatif	62	1,7	1,9	3%	2800

Tableau 3 : informations sur le four rotatif de Holcim Fès Ras El Ma

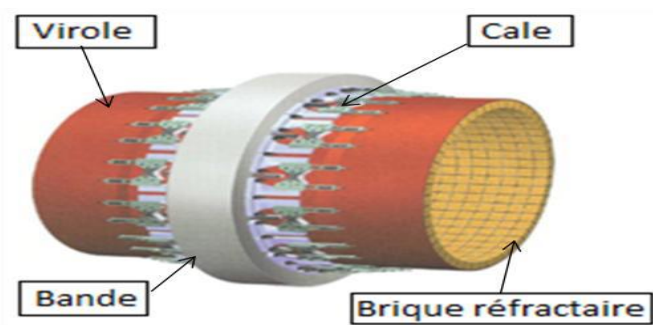


Figure 6 : Construction du four rotatif



Figure 7 : Installation des briques réfractaire

- La virole se compose de plusieurs tronçons de différentes tailles, ces tronçons sont assemblés par soudage et sont revêtus par des briques réfractaires d'épaisseur 16 cm, afin de protéger les fours des très hautes températures qui avoisinent les 1300 °C, la nature de ces briques variant suivant leur proximité avec la tuyère.

- La réaction qui se produit dans le four est la **clinkérisation**. Elle a lieu entre 1200 et 1500°C et elle donne naissance à une phase liquide formée de C_3A et C_4AF , et à des phases solides formée de C_2S et C_3S .

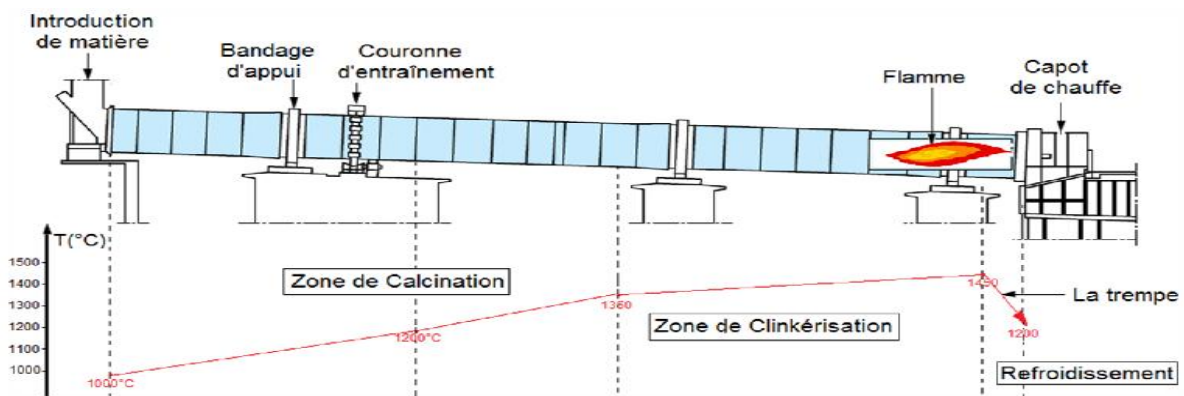


Figure 8 : Différentes étapes de cuisson

II.3.3)- Refroidisseur :

- Le refroidissement du clinker se fait à l'aide de huit ventilateurs latéraux possède deux grilles équipé d'un concasseur rouleaux.

- Le refroidisseur a un triple rôle :

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

- Le refroidisseur fonctionne selon le principe du courant transversal, c'est-à-dire que la matière traverse horizontalement le refroidisseur tandis que l'air est soufflé verticalement.

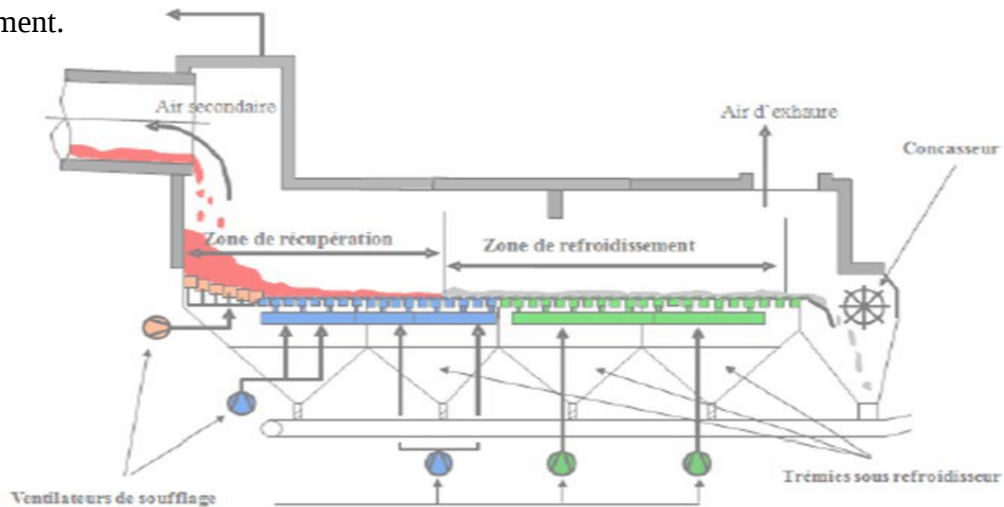


Figure 9 : Les zones du refroidisseur à grilles

- Le refroidisseur à grille répartie en 2 zones :
 - Zone de refroidissement : assure le refroidissement optimale du clinker et aussi réduire l'impact de chaleur sur les processus suivant (transport de clinker, séchage, broyage de ciment).
 - Zone de récupération : Permet la récupération des calories pour minimiser la consommation thermique et obtenir la température d'air de combustion, qui doivent recyclées au four grâce aux petites chambres de soufflages

II.4)- Etape 4 : Mouture du ciment et expédition

II.4.1)- Silos à clinker

- Le clinker issu du four est stocké dans le silo clinker ou ailleurs dans les zones de stockages qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage ciment (étape suivante) une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunissent le clinker d'une dégradation physico-chimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre.

II.4.2)- Broyage du ciment

- A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 à 40 mm environ. Brusquement refroidi, puis finement broyé avec addition du gypse (2 à 5%) pour régulariser la prise donnant le ciment.

- Dans le but d'augmenter le débit de production du ciment, l'usine HOLCIM Ras El Ma utilise deux broyeurs qui fonctionnent simultanément (BK3 et BK4)

- **Un broyeur vertical à galets BK4** : 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.

-Il est équipé d'un séparateur qui ne laisse passer que les grains de dimension souhaités(les autres seront recyclés) .Il est plus efficace que le BK3

- **Un broyeur horizontal à boulets BK3** : 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.

- Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 40 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur.

II.4.3)- Ensachage et expédition

- Le processus de fabrication du ciment est terminé, l'ensachage est assuré par quatre installations identiques produisant chacune 90 tonnes par heure.

➤ L'expédition se fait en deux manières :

- En sac : Les sacs contiennent généralement 50 Kg de ciment sur lesquels est marquée la classe de résistance du ciment (35, 45 ou 55).

- En vrac : la livraison du ciment en vrac se fait sur des citernes. Le ciment est injecté avec l'air dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint.

Chapitre II : Paramètres de suivi des performances du four

I- Introduction

Le présent chapitre est dédié à la présentation des différents paramètres nécessaires pour le suivi et le contrôle du four rotatif. Leur signification et l'influence des uns par rapport aux autres

Dans ce présent rapport, on va distinguer trois types de paramètres :

- ✓ Paramètres process
- ✓ Paramètres qualité
- ✓ Paramètres maintenance

I.1)- Définition des paramètres

Définition : Les paramètres sont des indicateurs utilisés pour la conduite à distance du four.

On peut définir deux types de paramètres :

- il y a des paramètres qu'on peut définir à partir de la théorie et d'autres à partir d'expérience.

I.2)- Mesure des paramètres

Une usine de production de ciment compte près de deux mille points de contrôle et de détection : mesures de température, analyses de gaz, contrôles de rotation, de vitesse, etc.

De nombreux capteurs de température et de pression assurent le suivi en continu de la stabilité thermique le long de la ligne de cuisson.

Le processus de production est contrôlé par des opérateurs avec écran où sont affichés les schémas de procédé et les diverses valeurs des paramètres opératoires tels que températures, pressions et débits.

I.3)- les intentions de suivi du four

➤ Le suivi des performances du four a pour but de :

Produire un clinker de bonne qualité avec la productivité attendue accompagnée d'une consommation calorifique spécifique la plus faible possible :

➤ Et pour objectifs :

- ❖ Un clinker répondant constamment au label de qualité
- ❖ Un déroulement stable et continu
- ❖ Rendement thermique extrême

❖ Productivité maximale

Une mauvaise conduite du four risque de générer un rendement thermique réduit causant des coûts spécifiques élevés d'exploitation, une productivité réduite causant une utilisation insatisfaisante des capacités du site.

II- Paramètres process

II.1)- Température de zone de cuisson (BZT)

- BZT représente la température du clinker en zone de cuisson. Cette température indique le taux de transformation du C_2S en C_3S . BZT est donc un indicateur indirect de la qualité du clinker produit.

- BZT ne peut en fait pas être mesuré. Des indicateurs sont utilisés pour le calculer. Ce sont:

❖ La teneur en NO_x dans les gaz d'échappement du four:

- NO_x est la somme du NO et du NO_2 (surtout du NO). La teneur en NO_x dépend principalement de la température de la flamme. Plus celle-ci est élevée, plus la teneur en NO_x augmente, donc la température à l'intérieur du four augmente. Si NO_x diminue, donc on constate que le four est froid

- L'oxygène suscite la formation du NO_x alors que le CO la réduit. NO_x se mesure au niveau de la boîte à fumée.

❖ CO boîte à fumée : si CO augmente donc on a une mauvaise combustion, et un manque de O_2

- Le dégagement de CO doit être évité dans le but d'éviter une augmentation de la volatilité du soufre et des alcalis. Le % de CO à l'entrée du four doit être $< 0.05\%$

- L'absence de CO au niveau de la combustion est un gage de bonnes conditions de marche du four et de qualité du produit obtenu.

II.2)-Température à l'amont du four (BET)

- BET est la température des gaz, mesurée pour conduire correctement les réactions intermédiaires, physiques et chimiques, du cru, avant sa clinkérisation.

II.3)- Concentration d'oxygène dans les gaz de combustion

- La concentration d'oxygène dans les gaz de combustion, après la flamme principale, est mesurée pour maîtriser l'excès d'air, nécessaire à une combustion complète et efficace dans le four.

paramètre	BZT	BET	O ₂
Max	1470 °C	1980 °C	3.0 %
Min	1430 °C	1020 °C	2.0 %
Objectif	1450°C	1000 °C	2.5 %

Tableau 4 : Conditions sur les paramètres process (BZT, BET, O₂)

II.4)- Débit farine

- c'est un paramètre variable gouvernail qui détermine les valeurs des autres paramètres

- En modifiant une **variable**, plusieurs **paramètres** sont influencés. Il faudra donc "jouer" avec plusieurs **variables** simultanément pour ramener le **paramètre** "vagabond".

- En faisant varier le débit d'alimentation du cru au four en gardant constantes les autres variables de conduite, les paramètres du processus réagissent comme suit:

- Augmentation du débit d'alimentation au four:
 - ✓ BET diminue – BZT diminue- Le taux d'oxygène diminue ;
- Diminution du débit d'alimentation au four ;
 - ✓ BET augmente - BZT augmente à son tour - Le taux d'oxygène augmente

❖ **Production de clinker** : elle est liée avec le débit de la farine

- Par exemple : si on introduit 180 t/h de farine on obtient $180 \times 0,6 = 108 \text{ t/h}$ du clinker (avec 0,6= rendement du four), le suivi permet de savoir la quantité de clinker produit par heure

❖ **L'ampérage du four**: est un courant absorbé par le moteur du four. Lorsque le débit de farine augmente, l'ampérage lui aussi augmente.

II.5)- Tirage dans le four

Ce tirage influence tous les paramètres de conduite, essentiellement l'oxygène

Lorsqu'on parle de tirage, c'est qu'il ya des ventilateurs de tirage, qui permettent de créer la dépression le long du four sécheur pour empêcher la sortie de la poussière et assurer l'écoulement des gaz le long du four ;

➤ Augmentation du tirage

- ✓ O₂ augmente car plus d'air passe dans le système de cuisson, et par voie de conséquence, plus d'excès d'air est disponible pour la combustion.
- ✓ BZT décroît
- ✓ BET augmente.
- Baisse du tirage assez significative
 - ✓ O₂ ↘ : moins d'excès d'air disponible
 - ✓ BZT ↘ : température flamme ↘ (manque excès d'air)
 - ✓ BET ↗ : moins d'énergie thermique disponible en zone.

Les paramètres de tirage sont :

II.5.1) – Paramètres secondaires

- ❖ **Dépression air tertiaire** : L'air provenant du refroidisseur à grille est remplie de poussière de clinker fortement abrasifs, donc le ventilateur de tirage attire l'air tertiaire vers le précalcinateur, un suivi de cette dépression permet de voir la quantité d'air qui va préchauffer la farine dans le précalcinateur.
- ❖ **Dépression filtre process** : $\Delta P = P_{\text{sortie}} - P_{\text{entrée}}$.
Si ΔP augmente donc on distingue que le filtre est plein et non stable.
- ❖ **Dépression boîte à fumée** :
La boîte à fumée est l'élément le plus en avant du four, les gaz de combustion sont récupérés dans la boîte à fumée et chassés à l'extérieur par la cheminée.
- ❖ **Puissance alimentation tour** : puissance de l'élévateur à godets, qui vari selon la farine.
On fait son suivi pour déterminer la puissance nécessaire à l'élévation de la farine
- ❖ **Air axial** :
C'est une partie de l'air primaire entrant dans le four parallèle à l'axe longitudinal central du brûleur. il permet d'obtenir une flamme dure à forte impulsion.
- ❖ **Air radial** :
C'est une partie de l'air primaire entrant dans le four presque perpendiculaire à la direction du brûleur. Il modifie la forme de la flamme en jouant principalement sur le diamètre.

II.6)- Débit des combustibles injectés au four

Agit sur tous les paramètres de conduite et en particulier sur BZT.

En ne variant que le débit des combustibles, et gardant constantes les autres variables de conduite, les paramètres du processus vont réagir comme suit:

- Augmentation du débit des combustibles:
 - ✓ BZT augmente - BET augmente- Le taux d'oxygène diminue
- Diminution du débit des combustibles:
 - ✓ BZT diminue - BET diminue- Le taux d'oxygène augmente

II.7)- Vitesse du four

- Cette vitesse influence tous les paramètres de conduite durant un certain temps

- En faisant varier la vitesse de rotation du four, en gardant inchangées les autres variables, le O_2 va réagir comme indiqué ci-dessous :

- En augmentant la vitesse du four :
 - ✓ BZT diminue - BET diminue- Le taux d'oxygène diminue
- En diminuant la vitesse du four :
 - ✓ BZT augmente - BET augmente- Le taux d'oxygène augmente

III- Paramètres qualité

III.1)- Facteur de saturation en chaux FSC

- Le facteur de saturation en chaux mesure le taux de chaux nécessaire pour se combiner avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. Le FSC se mesure avec la formule

suivante :

$$LSF = \frac{\%CaO}{2,8 \times \%SiO_2 + 1,18 \times \%Al_2O_3 + 0,6 \times \%Fe_2O_3}$$

☞ Fourchettes : 101 % < LSF < 102 % **objectif** : 101,5 %

- F.S.C idéale : 100 (avec pet coke comme combustible)

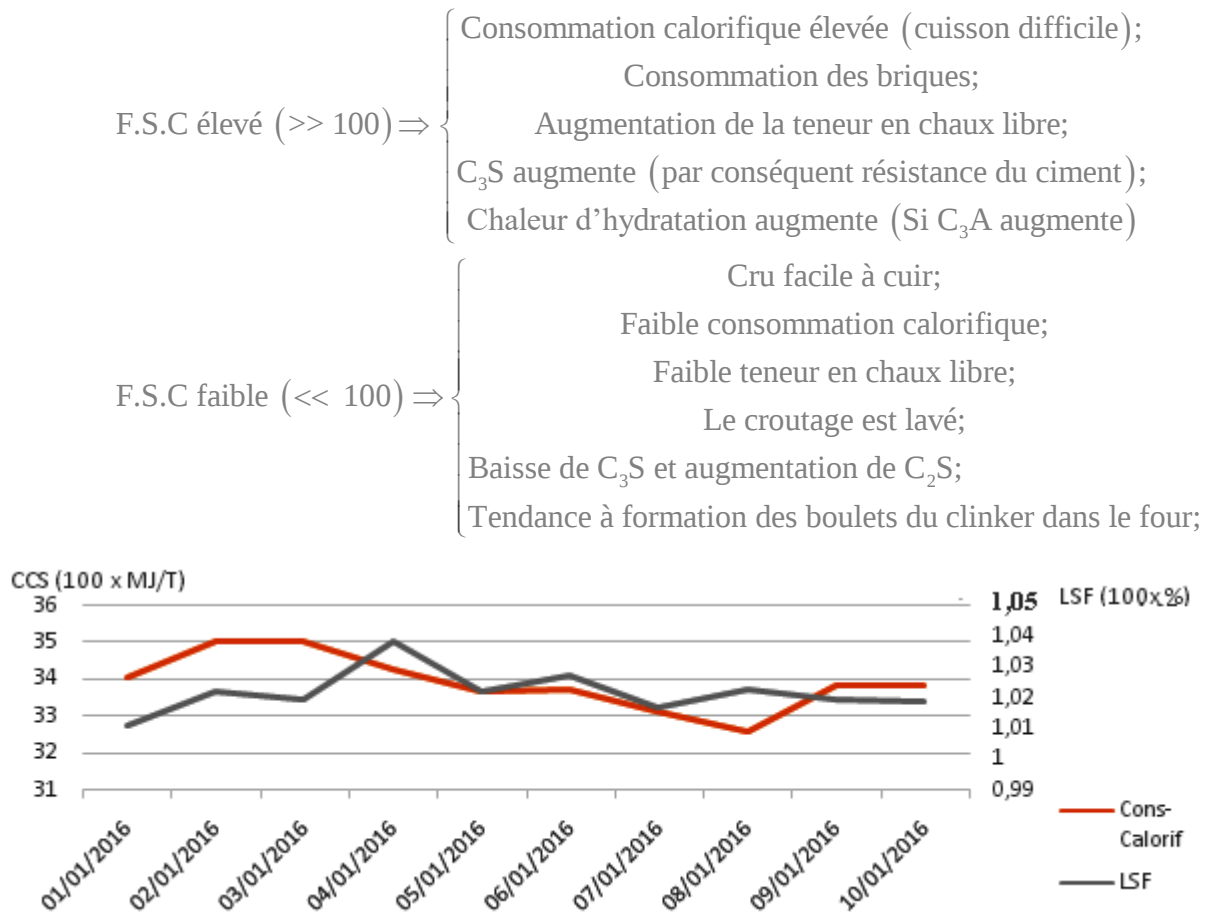


Figure 10: influence de FSC sur la CCS

- D'après le graphe ci-dessus on remarque que lorsque le FSC (LSF) dépasse la valeur 100, la consommation calorifique augmente. L'augmentation du facteur de saturation en chaux indique une augmentation de chaux libre et ceci cause une difficulté de la cuisson du cru et vice versa.

III.2)- M.S : module silicique

- Le module silicique mesure le taux de silice par rapport au taux des oxydes de fer et d'aluminium ensemble. Il se mesure avec la formule suivante :

$$M.S = \frac{\% SiO_2}{\% Al_2O_3 + \% Fe_2O_3}$$

- Fourchettes: $2,45 \% < M.S < 2,5 \%$

Si $M.S < 2,45\%$ $\Rightarrow$ {

 Cuisson facile, briques attaquées, revêtement lavé;

 Clinker dur, four instable, consommation calorifique basse

Si $M.S > 2,5 \%$ $\Rightarrow$ {

 Cuisson difficile, charge thermique élevée, pas de croutage;

 CaO libre élevé, four instable, ciment à résistance élevée, clinker poussiéreux

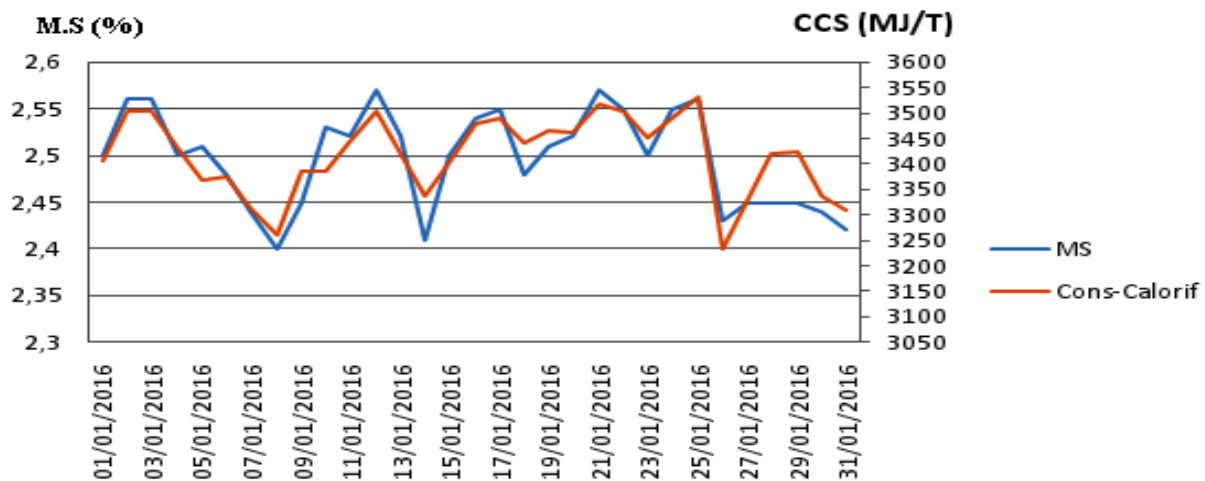


Figure 11: influence de M.S sur la CCS

- On assiste à une augmentation de la CCS du four avec l'augmentation du module silicique.

III.3)- M.A.F : Module Alumino Ferrique

- Sa valeur caractérise la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Il se mesure avec la formule suivante

$$M.A.F = \frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3}$$

☞ Fourchette : $1,7 \% < M.A.F < 1,8 \%$

- Quand MAF augmente, la cuisson est difficile, par conséquent, une grande consommation d'énergie, et plus la température de clinkérisation sera élevée et vice versa.

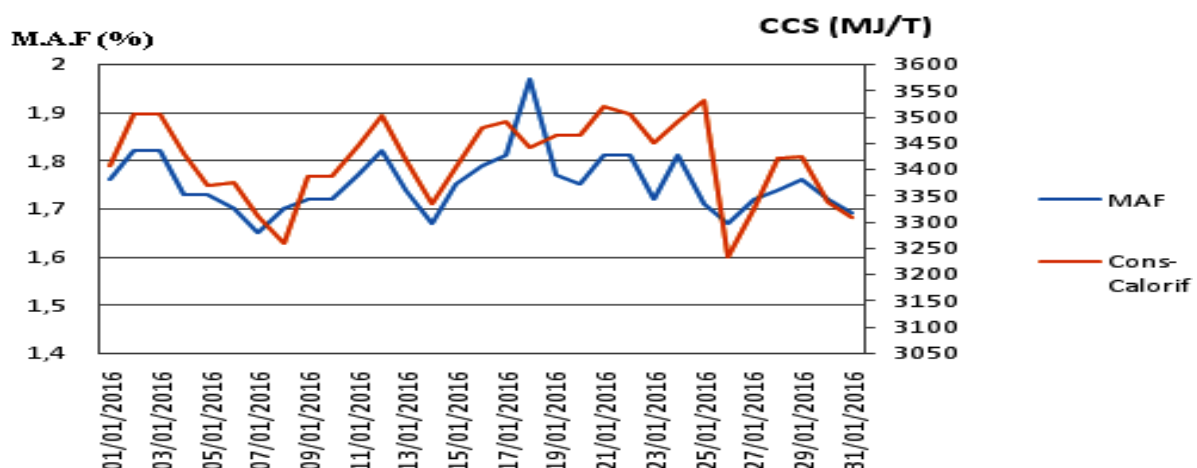


Figure 12 : influence de M.A.F Sur La CCS

-D'après l'illustration ci-dessus on peut Remarquer simplement que lorsque MAF augmente, La CCS aussi augmente et réciproquement vraie.

- Du coup, il y a une influence sur la CCS pendant la période indiquée.

III.4)- La Fluorine

- La fluorine est utilisée pour 2 raisons :
 - ✓ Produire un clinker plus réactif :
 - Augmenter la saturation en chaux.
 - Maitriser la chaux libre (< 3 %).
 - Favoriser la fixation de Soufre dans le clinker.
 - ✓ Gain éventuel de la consommation calorifique :
 - Facilite la cuisson.
 - Conserve l'énergie dans le four
 - Le tableau représenté ci-dessous regroupe les fourchettes (les bornes) de chaque paramètre qualité avec et sans **AFR** (Alternative fuel and Raw materials).

NB : les AFR sont les combustibles secondaires (les grignons d'olives, les déchets, les pneus...) lequel on les utilise au but d'optimiser grâce à leurs coûts optimales par rapport au combustible principal (pet-coke ou coke de pétrole).

	Entrée Four				Clinker			
	LSF	MS	MAF	F^-	LSF	MS	MAF	F^-
Cible sans AFR (%)	103,5	2,50	1,85	0,15	100,5	2,5	1,8	0,15
Fourchettes sans AFR (%)	103-104	2,45-2,55	1,8-1,9	0,145-0,155	100-101	2,45-2,55	1,75-1,85	0,145-0,155
Cible avec AFR (%)	103,5	2,55	1,9	0,15	101,5	2,47	1,75	0,15
Fourchettes avec AFR (%)	103-104	2,5-2,6	1,85-1,95	0,145-0,155	101-102	2,45-2,5	1,7-1,8	0,145-0,155

Tableau 5 : Fourchettes des paramètres qualité

III.5)- Finesse du crû

- La matière première est réduite à l'aide d'un broyeur à galets jusqu'à l'obtention de la finesse souhaitée. Holcim exige une finesse de 90 microns.

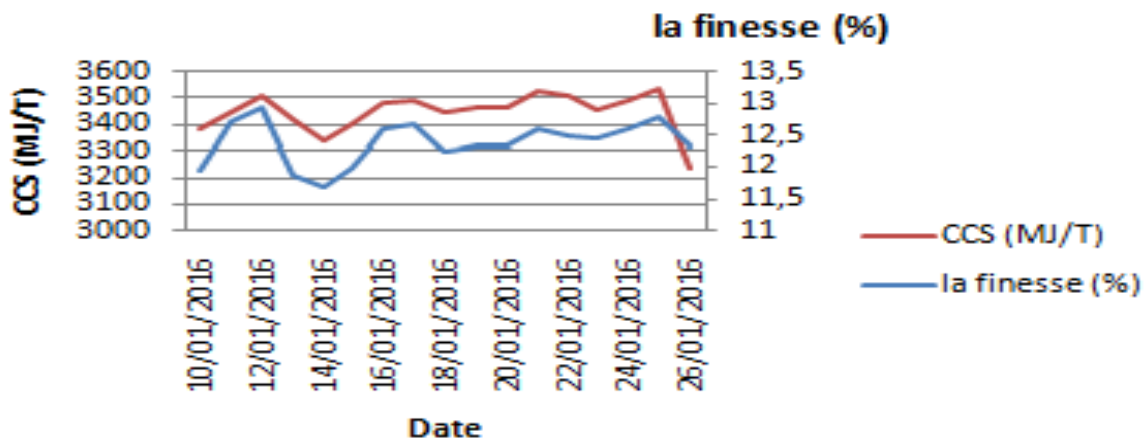


Figure 13: l'influence de la finesse sur la CCS

- D'après l'illustration ci-dessus on peut Remarquer simplement que lorsque la Finesse augmente, La CCS aussi augmente et réciproquement vraie.

IV) - Paramètres maintenance

IV.1)- MTBF (Mean Time Between Failures)

- ❖ **MTBF** : Moyenne des temps de bon fonctionnement, Elle représente l'espérance de vie du dispositif.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{le temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre de défaillances}}$$

Date de début d'étude	02/04/2015	11:34:00
Date de fin d'étude	27/04/2016	18:22:00
La période étudiée	391 jours = 391x24 heures = 9390,8 heures	
temps de disponibilité	100 jours = 100x24 heures = 2400 heures	
temps d'entretiens	25,315 jours = 25,31x24 heures = 607,56 heures	
Nombre des pannes	21	

Tableau 6 : Données de calcul du MTBF

$$MTBF = \frac{9390,8 - (3007,56)}{21} = 303,96 \text{ heures}$$

- L'objectif visé par l'usine Holcim Fès cette année en ce qui concerne le MTBF est : d'atteindre une valeur d'environ de 500 heures.

IV.2)- MTTR (Mean time to Repair)

- ❖ **MTTR** : (Mean time to Repair) littéralement : temps moyen pour réparer exprime la moyenne des temps de tâches de réparation

$$MTTR = \frac{\text{le temps d'arrêt total}}{\text{nombre de défaillances}}$$

$$MTTR = \frac{3007,56}{21} = 143,22 \text{ heures}$$

IV.3) -Disponibilité

- ❖ **Disponibilité du four** : suivi de l'aptitude du four à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné, ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée.

$$\text{disponibilité} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \Rightarrow \text{disponibilité} = \frac{303,96}{303,96 + 143,22}$$

$$\text{disponibilité} = 67,97\%$$

- L'objectif visé par l'usine Holcim Fès cette année en ce qui concerne la disponibilité est d'atteindre un taux de 78,13%.

V)- Mise en place du tableau de bord

V.1)- Exemples de suivi des paramètres du four rotatif

A- D'après les informations tirés de {1,a} (bibliographie)

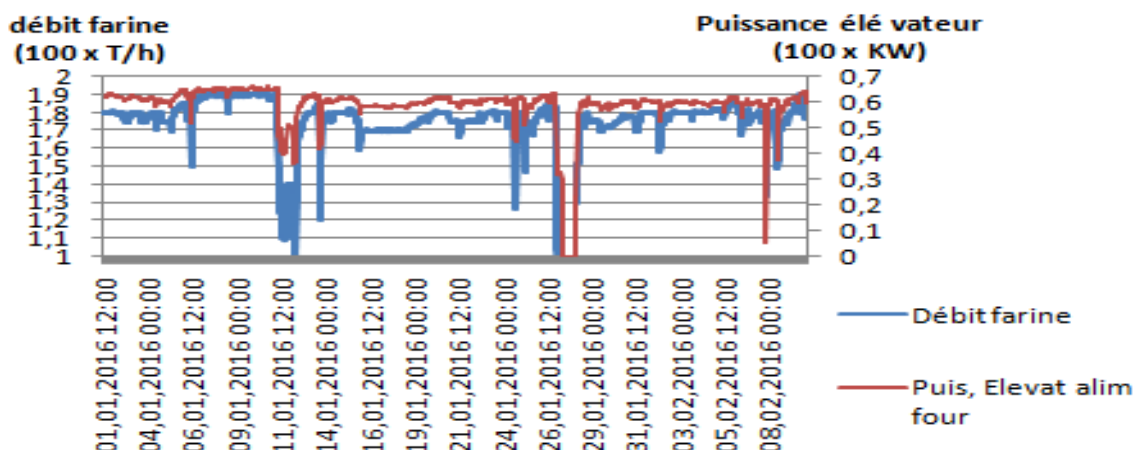


Figure 14 : La relation entre le débit de farine et la puissance alimentation tour

- D'après l'illustration ci-dessus on peut observer simplement que lorsque la puissance d'élévateur augmente, le débit de farine aussi augmente et réciproquement vraie.

B-

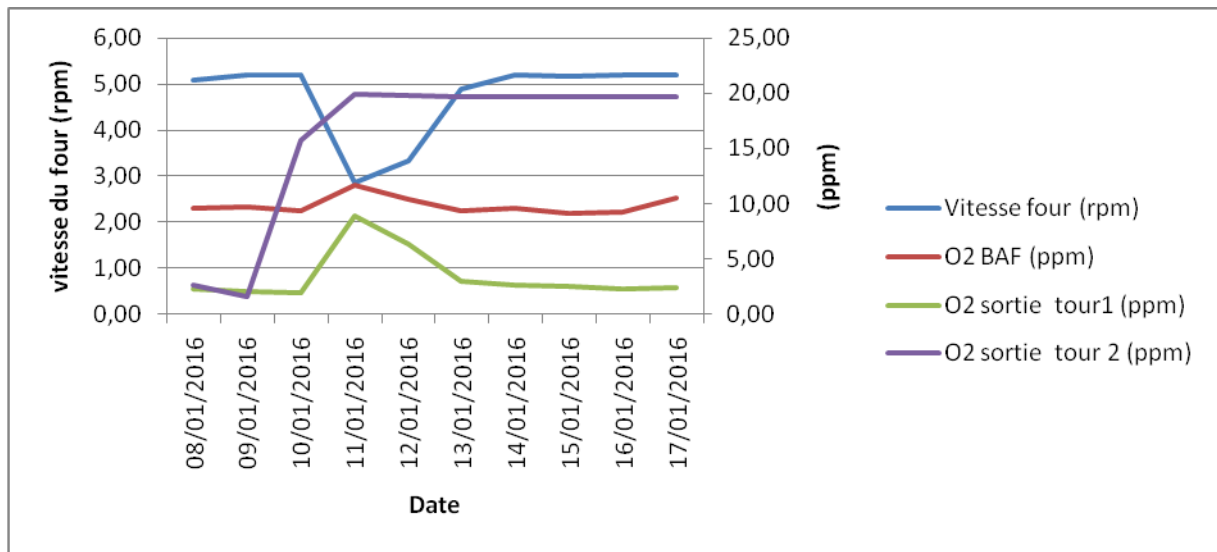


Figure 15 : Influence de la vitesse du four sur le taux d'oxygène

- D'après la figure 15, on remarque que lorsque la vitesse du four augmente le taux d'oxygène diminue et vice versa.

V.2)- Elaboration du tableau de bord

-Définition : Un tableau de bord est une série d'indicateurs visant à mesurer la performance d'une entreprise ou d'une installation par rapport à un objectif, une norme ou encore une statistique.

- Celui-ci doit être :

- Pertinent : seuls les indicateurs les plus représentatifs de l'activité doivent y figurer.
- Visuel : il doit pouvoir s'appréhender d'un coup d'œil.
- Réactif : il doit être constamment mis à jour (de façon mensuelle voire hebdomadaire)

- Le tableau 7 présenté ci-dessous, rassemble tout les paramètres qui vont servir pour le suivi des performances du four rotatif :

Paramètres process																									Paramètres qualité					Paramètres maintenance				
paramètres	Débit t/heure	Puissance kW	Température entrée sortie	Température tuyau sortie	Dépression Tou	Température tuyau sortie	air ambiant		air refroidi		Dépression on air ventilateur	Dépression on BAF	Ampléag é four	% d'air ventilateur	dp (hPa) Process	Produit on Ck	Temp initiale	Vitesse four	MDX BAF	Conso cal/four	F.	USF	MS	MAF	finesse	MTBF	MTTR	DISPONIBILITE %						
01/01/2016	162.16		372.24	248.47	-2.85	867.00	340.00	96.20	719.25	64.25	-1.75	-5.03	501.10	76.10	10.52	109.30	895.00	5.06	654.36	3407.80	0.15	10.11	2.50	191	12.27	300.96	143.22	67.97						
02/01/2016	173.89	62.20	388.65	289.21	-2.47	868.15	333.58	95.10	180.54	65.00	-1.89	-5.04	488.24	71.00	11.86	107.94	879.25	5.12	547.32	3585.00	0.19	10.22	2.49	179	12.47	300.96	143.22	67.97						
03/01/2016	172.35	58.34	401.25	281.40	-2.89	862.14	333.28	95.14	178.56	64.10	-1.84	-5.08	475.32	69.45	12.47	111.4	881.58	5.14	785.14	3584.59	0.15	10.98	2.46	177	12.47	300.96	143.22	67.97						
04/01/2016	165.24	63.70	387.23	276.50	-2.56	799.88	338.56	94.45	179.10	64.15	-1.58	-5.58	504.25	71.17	12.96	110.07	890.90	5.18	459.69	3401.00	0.15	10.84	2.44	182	12.30	300.96	143.22	67.97						
05/01/2016	163.45	63.12	375.45	283.11	-2.88	845.71	340.10	96.35	177.58	63.45	-1.87	-5.42	504.31	72.26	11.88	112.07	891.45	5.19	556.55	3385.57	0.15	10.23	2.42	180	11.82	300.96	143.22	67.97						
06/01/2016	166.78	63.90	347.24	245.15	-2.78	897.74	339.20	95.14	175.98	62.10	-1.75	4.49	505.01	76.45	12.85	112.83	894.45	5.02	479.24	3373.45	0.15	10.25	2.43	178	11.85	300.96	143.22	67.97						
07/01/2016	168.05	64.84	351.40	251.26	-2.56	865.45	339.25	95.21	180.10	64.98	-1.76	-5.52	507.21	75.26	10.88	113.40	901.15	5.15	580.05	3301.79	0.16	10.69	2.47	179	11.89	300.96	143.22	67.97						
08/01/2016	168.89	64.95	376.48	276.59	-2.78	889.65	339.91	95.37	180.02	64.87	-1.77	-5.63	507.88	76.91	12.41	110.53	901.89	5.08	689.15	3258.38	0.16	10.28	2.46	181	11.43	300.96	143.22	67.97						
09/01/2016	169.86	65.29	374.87	270.66	-2.62	887.30	340.04	96.37	179.95	64.94	-1.84	-6.03	519.19	78.84	12.92	113.92	893.84	5.20	755.80	3385.20	0.15	10.97	2.45	177	11.90	300.96	143.22	67.97						
10/01/2016	167.50	65.20	377.23	276.51	-2.48	861.38	339.99	95.48	180.00	64.87	-1.88	-6.03	538.51	79.00	13.31	113.72	898.33	5.20	792.05	3385.25	0.15	10.86	2.53	178	11.96	300.96	143.22	67.97						
11/01/2016	147.41	51.87	432.83	340.95	-4.10	755.38	338.21	78.14	180.00	64.28	-1.42	-3.08	386.75	58.89	10.45	54.06	663.35	2.86	280.84	3444.16	0.16	10.07	2.53	175	12.93	300.96	143.22	67.97						
12/01/2016	53.14	53.84	380.59	279.65	-2.63	709.11	334.47	80.39	177.87	63.43	-1.86	-3.80	486.84	59.40	11.14	91.88	649.79	3.34	383.72	3580.06	0.16	10.07	2.53	175	12.93	300.96	143.22	67.97						
13/01/2016	173.88	59.81	392.17	297.70	-2.89	882.32	338.23	91.31	180.14	64.49	-2.27	-5.38	507.94	74.12	13.74	99.15	923.33	4.90	636.48	3419.08	0.15	10.43	2.52	176	11.90	300.96	143.22	67.97						
14/01/2016	178.87	60.81	388.86	282.28	-2.51	885.88	339.91	95.18	179.95	64.93	-2.36	-5.48	589.72	77.85	14.92	107.32	899.26	5.20	626.78	3385.10	0.16	10.52	2.53	175	11.70	300.96	143.22	67.97						
15/01/2016	178.04	60.79	392.29	291.02	-3.14	861.50	340.30	93.94	180.10	64.79	-2.83	-5.70	617.23	76.90	12.29	106.82	898.00	5.17	354.80	3403.43	0.16	10.46	2.52	175	12.00	300.96	143.22	67.97						
16/01/2016	169.82	58.50	390.84	296.54	-2.28	889.38	340.02	88.38	180.14	64.16	-3.01	-5.82	654.90	74.90	13.82	110.89	885.14	5.20	282.28	3480.83	0.15	10.79	2.54	176	12.80	300.96	143.22	67.97						
17/01/2016	170.06	58.45	378.12	288.91	-2.87	882.18	337.72	88.46	177.36	63.76	-2.89	-6.15	638.99	75.12	13.45	112.44	871.21	5.20	237.89	3490.92	0.15	10.88	2.47	175	12.67	300.96	143.22	67.97						
18/01/2016	179.26	61.27	387.10	305.40	-2.88	871.98	337.25	87.88	179.88	64.40	-2.80	-6.05	501.56	71.88	12.47	107.56	920.14	5.20	388.45	3442.89	0.16	10.86	2.48	176	12.26	300.96	143.22	67.97						
19/01/2016	180.47	62.15	389.47	288.12	-3.00	882.12	338.25	94.24	178.89	64.45	-2.56	-5.57	500.28	75.52	13.54	108.28	901.95	5.20	489.74	3461.05	0.15	10.56	2.51	177	12.34	300.96	143.22	67.97						
20/01/2016	178.78	61.90	361.94	289.78	-2.76	897.56	338.28	93.25	178.88	64.40	-2.49	-6.13	502.03	75.64	12.89	110.27	874.15	5.14	256.48	3465.80	0.15	10.65	2.48	175	12.35	300.96	143.22	67.97						
21/01/2016	181.28	62.20	375.25	272.24	-2.89	888.48	338.54	94.05	179.24	64.82	-1.99	-5.18	500.05	76.58	12.71	108.66	898.65	5.08	408.58	3583.58	0.15	10.35	2.40	178	12.80	300.96	143.22	67.97						
22/01/2016	184.49	63.45	354.89	285.17	-2.78	897.45	339.85	95.10	180.25	64.99	-1.78	-5.48	500.89	77.59	11.89	110.89	945.65	5.04	482.15	3583.28	0.15	10.04	2.49	181	12.50	300.96	143.22	67.97						
23/01/2016	171.53	59.41	381.27	280.15	-2.91	884.24	338.45	94.89	179.32	64.79	-1.89	-6.01	489.89	78.82	12.85	112.92	998.59	5.20	544.56	3461.21	0.16	10.16	2.50	172	12.45	300.96	143.22	67.97						
24/01/2016	178.57	61.87	381.45	280.75	-3.10	861.45	337.58	94.54	180.25	64.95	-1.89	-4.89	501.88	79.52	12.47	110.72	891.56	5.18	520.14	3491.58	0.15	10.14	2.47	171	12.80	300.96	143.22	67.97						
25/01/2016	180.32	62.00	388.47	274.54	-2.54	879.14	338.48	93.88	178.54	64.21	-2.11	-5.17	502.45	77.45	12.96	108.12	897.45	5.11	488.75	3583.95	0.15	10.79	2.44	171	12.80	300.96	143.22	67.97						
26/01/2016	183.63	63.10	386.12	301.15	-2.85	897.45	338.56	95.02	177.77	63.89	-1.78	-5.85	500.27	78.24	12.25	110.18	905.45	5.13	489.98	3283.83	0.15	10.29	2.43	173	12.35	300.96	143.22	67.97						
27/01/2016	184.47	63.45	388.12	275.10	-3.10	887.12	341.21	96.85	178.82	64.56	-1.85	-6.18	500.87	75.45	12.45	110.88	921.45	5.07	389.40	3283.32	0.15	10.52	2.44	172	12.80	300.96	143.22	67.97						
28/01/2016	178.44	61.87	379.11	289.65	-2.87	886.14	340.10	96.82	179.25	64.89	-2.41	-5.57	487.45	79.52	13.08	110.76	899.45	5.13	654.47	3420.80	0.15	10.63	2.45	174	12.88	300.96	143.22	67.97						
29/01/2016	176.80	60.20	380.88	290.78	-2.86	875.75	339.20	95.45	179.89	64.91	-1.89	-5.91	496.21	83.52	13.05	110.86	900.45	5.20	388.98	3425.40	0.15	10.50	2.50	176	12.63	300.96	143.22	67.97						
30/01/2016	180.10	62.14	372.12	281.36	-3.52	882.25	338.25	94.89	179.26	64.82	-1.96	-5.47	501.10	71.24	12.11	110.97	946.26	5.20	547.50	3383.50	0.15	10.50	2.46	172	12.54	300.96	143.22	67.97						
31/01/2016	184.85	63.88	359.45	271.25	-2.67	897.78	339.00	95.38	180.42	65.12	-2.10	-6.00	502.34	88.89	12.56	112.25	887.55	5.20	378.89	3388.59	0.16	10.36	2.45	169	12.21	300.96	143.22	67.97						
Max		75.00	410.00	380.00	1.00		390.00		220.00		-2.00	730.00	88%	10.00		1200.00		5.2			0.86	104.35	2.54	182	12.93									
Min		60.00	350.00	240.00	-8.00		200.00		120.00		-10.00	350.00	79%	2.00		700.00					0.148	10.11	2.4	169	11.43									
objectif																		5.2			0.15	102.88	2.47	176	12.31	500		140	78.13					

Tableau 7 : Tableau de bord pour suivi des performances du four

Chapitre III :
Etude des transferts thermiques
&
calcul des pertes d'énergie

A- Rappels théoriques

I- Modes de transfert de chaleur

- **Définition :** Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre 2 corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les 2 corps.

On distingue habituellement 3 modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique ou diffusion thermique
2. Le rayonnement thermique
3. La convection

I.1)- Transfert de chaleur par conduction

- C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température.

- La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

ou sous forme algébrique

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \phi : \text{Flux de chaleur transmis par conduction (W)} \\ \lambda : \text{Conductivité thermique du milieu (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \\ x : \text{Variable d'espace dans la direction du flux (m)} \\ S : \text{Aire de la section de passage du flux de chaleur (m}^2) \end{array} \right.$

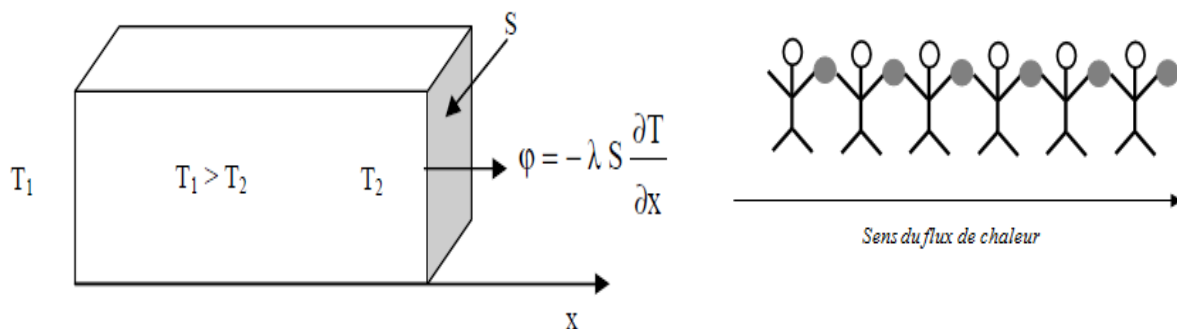


Figure 16 : Schéma du transfert de chaleur conductif

I.2)- Transfert de chaleur par convection

- C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

- Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton $\phi = h S (T_p - T_\infty)$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \phi : \text{Flux de chaleur transmis par convection (W)} \\ h : \text{Coefficient de transfert de chaleur par convection (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}) \\ T_p : \text{Température de surface du solide (°C)} \\ T_\infty : \text{Température du fluide loin de la surface du solide (°C)} \\ S : \text{Aire de la surface de contact solide/fluide (m}^2\text{)} \end{array} \right.$

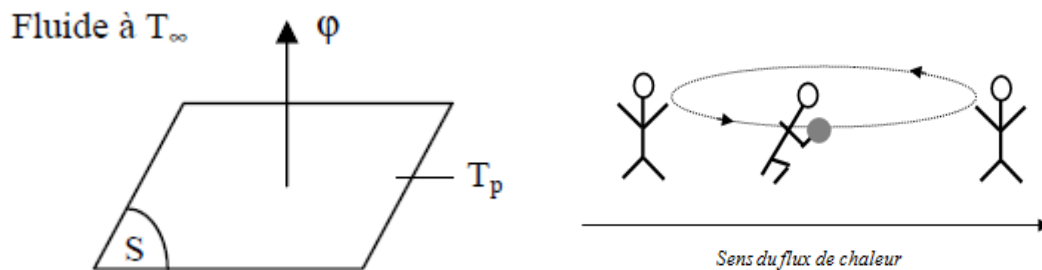


Figure 17 : Schéma du transfert de chaleur convectif

I.3)- Transfert de chaleur par Rayonnement

- C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$\phi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4)$ avec $\left\{ \begin{array}{l} \phi : \text{Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)} \\ \sigma : \text{constante de Stephan (5,67} \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \\ \varepsilon_p : \text{Facteur d'émission de la surface} \\ T_p : \text{Température de la surface (K)} \\ T_\infty : \text{Température du milieu environnant la surface (K)} \\ S : \text{Aire de la surface (m}^2\text{)} \end{array} \right.$

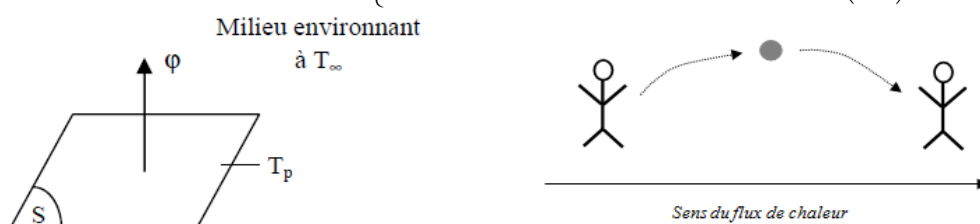


Figure 18 : Schéma du transfert de chaleur radiatif(d'une petite surface sur une autre plus grande)

I.4)- Flux de chaleur lié à un débit massique

- Lorsqu'un débit massique $\dot{m}$ de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer dans le bilan $\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T)$ un flux de chaleur entrant correspondant : $\phi_e = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$ $T_1 > T_2$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \phi_e : \text{Flux de chaleur entrant dans le système (W)} \\ \dot{m} : \text{Débit massique (kg} \cdot \text{s}^{-1}) \\ C_p : \text{Chaleur spécifique massique (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ T_1, T_2 : \text{Températures d'entrée et de sortie (K) ou (}^\circ\text{C)} \end{array} \right.$

II-Les effets de la chaleur sur la matière

II.1)-La dilatation et la contraction thermiques

- Quand les solides, les liquides et les gaz sont chauffés, leur volume augmente. Ce processus s'appelle la **dilatation thermique**. Le mouvement des particules est accéléré, donc plus d'énergie cinétique. Les particules, en se déplaçant plus vite, parcourent de plus longues distances et occupent donc plus d'espace.

- Quand les solides, les liquides et les gaz sont refroidis, leur volume diminue. Ce processus s'appelle la **contraction thermique**. Le mouvement des particules est ralenti donc moins d'énergie cinétique. Les particules, en se déplaçant moins vite, parcourent de moins longues distances et occupent donc moins d'espace.

- Au cours de la dilatation et de la contraction thermiques, la masse de l'objet reste la même.

II.2)- Les changements d'état

- Toutes les substances pures peuvent exister sous la forme des trois états de la matière :

- L'état solide
- L'état liquide
- L'état gazeux

- On peut changer l'état de toute substance si on la chauffe ou la refroidit. Les variations de températures ne sont qu'un signe de changement du mouvement des particules, donc de changement de l'énergie thermique.

B- Calcul des pertes thermiques

I- Introduction :

- Le service procédé accorde une grande importance à la minimisation des pertes thermiques au niveau de la ligne de cuisson. L'élaboration du tableau de bord était un outil de suivi des paramètres qui vont servir à atteindre cet objectif. La figure 19 présente l'historique de la consommation calorifique des années 2014 et 2015.

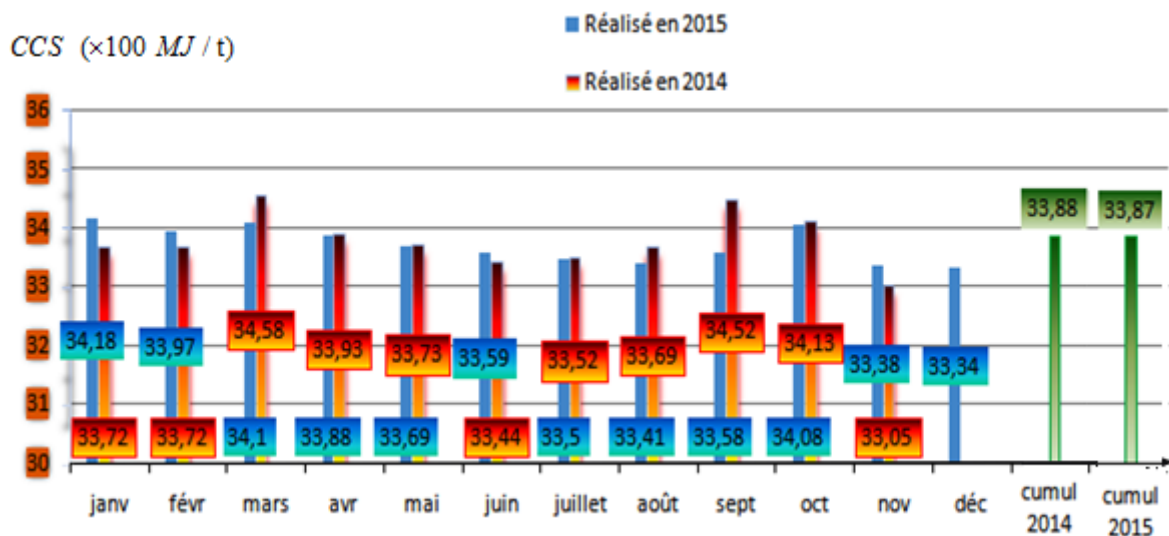


Figure 19 : Comparaison de la consommation calorifique entre 2014 et 2015

- d'après la figure ci-dessus Holcim Fès a consommé moins d'énergie en 2015 par rapport à l'année 2014

- Plusieurs facteurs influencent cette variation de la consommation calorifique, parmi lesquels on peut citer les pertes thermiques

- L'objectif visé par l'usine Holcim Fès en ce qui concerne la Consommation Calorifique est : de Diminuer cette dernière de 27 MJ/t , une réduction d'un pourcentage de 0,79% par rapport à l'année 2015

II- Caractéristiques du four et des combustibles

II.1)- Caractéristiques du Four

longueur	Rayon intérieur	Rayon extérieur	Epaisseur du briques	Epaisseur d'acier	Epaisseur de laine de verre
$L = 62 \text{ m}$	$r_1 = 1,7 \text{ m}$	$r_3 = 1,94 \text{ m}$	$e_1 = 200 \text{ mm}$	$e_2 = 40 \text{ mm}$	$e_{LV} = 25 \text{ mm}$

Tableau 8 : Caractéristiques du Four de Holcim Ras El Ma

II.2)-Données thermiques

- ✓ Conductivité thermique du brique : $\lambda_{br} = 2,6 \text{ W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}$
- ✓ Conductivité thermique d'acier : $\lambda_{Ac} = 52 \text{ W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}$
- ✓ Conductivité thermique de la laine de verre : $\lambda_{LV} = 0,04 \text{ W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}$
- ✓ Le Coefficient de transfert de chaleur par convection intérieure : $h_1 = 32 \text{ W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$
- ✓ Le Coefficient de transfert de chaleur par convection extérieure : $h_2 = 25 \text{ W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$

II.3)- Pouvoir calorifique des combustibles

Combustible	pneu	petcoke	Charbon	Grignon d'olives	Gasoil	Huile	Fluffs
Pouvoir calorifique (Kcal / kg)	6000	8100	6000	3000	10 000	6000	3000
état	solide	solide	solide	solide	liquide	liquide	solide

Tableau 9 : Pouvoir calorifique des combustibles

II.4)- Chaleur spécifique (C_p)

La Matière	Eau	Clinker	Farine (sèche)
$C_p \text{ (KJ / Kg} \cdot ^\circ\text{C)}$	4,182	0,791	0,865

Tableau 10 : Chaleur spécifique de chaque matière

III -Calcul des flux de chaleur

III.1)- Flux de Chaleur à l'entrée

On sait que
$$\begin{cases} \dot{m}_{Moy} = 3,9 t / h \\ \dot{m}_{Petcoke} = 3,9 \times 85\% = 3,315 t / h \\ \dot{m}_{G.d'olives} = 3,9 \times 15\% = 0,585 t / h \\ \dot{m}_{Fluffs} = 1 t / h \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} PCI_{petcoke} = 8100 kcal / kg \\ PCI_{Fluffs} = 3000 kcal / kg \\ PCI_{G.d'olives} = 3000 kcal / kg \end{cases}$$

$$\phi_{entrée} = \dot{m}_{Petcoke} \times PCI_{petcoke} + \dot{m}_{G.d'olives} \times PCI_{G.d'olives} + \dot{m}_{Fluffs} \times PCI_{Fluffs}$$

$$\phi_{entrée} = (3,315 \times 8100 + 0,585 \times 3000 + 1 \times 3000) \times \frac{10^3}{3600} \times 4,182 \times 10^3 J / s$$

$$\Rightarrow \phi_{entrée} = 36,71 MW$$

III.2) Flux de chaleur absorbée



On a :

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_{farine} = 185 t / h \\ C_{pf} = 0,865 KJ / Kg. ^\circ C \\ T_s = 1400 ^\circ C \\ T_e = 900 ^\circ C \\ \phi_{absorbée} = \dot{m}_{farine} \cdot C_{pf} \cdot (T_s - T_e) \end{array} \right\} \Rightarrow \phi_{absorbée} = 185 \times \frac{10^3}{3600} \times 0,865 \times 10^3 \times (1400 - 900) J / s$$



D'où

$$\phi_{absorbée} = 22,23 MW$$

III.3)-Calcul des pertes par paroi

III.3.1)-Conduction-convection :



Rayon extérieur des briques :

$$r_2 = r_1 + e_1$$

- La résistance thermique s'exprime comme suit :

$$\left. \begin{aligned} R_{th1-cv} &= \frac{1}{2\pi h_1 r_1 L} = 4,72 \times 10^{-5} W^{-1} \\ R_{th1-cond} &= \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_b L} = 1,1 \times 10^{-4} W^{-1} \\ R_{th2-cond} &= \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \lambda_{ac} L} = 1,02 \times 10^{-6} W^{-1} \\ R_{th2-cv} &= \frac{1}{2\pi h_2 r_3 L} = 5,3 \times 10^{-5} W^{-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_{th-tot} = R_{th1-cv} + R_{th1-cond} + R_{th2-cond} + R_{th2-cv}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{th-tot} &= 2,11 \times 10^{-4} W^{-1} \\ T_{air-ambient} &= T_{\infty e} = 30^\circ C \\ T_{\infty i} &= 1400^\circ C \end{aligned} \right\} \Rightarrow \phi_{pertes-1} = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{R_{th-tot}}$$

$$\Rightarrow \phi_{pertes-1} = \frac{1400 - 30}{2,11 \times 10^{-4}} \Rightarrow \boxed{\phi_{pertes-1} = 6,49 MW}$$

III.3.2)- rayonnement :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 5,67 \times 10^{-8} W / m^2.k^4 \\ \varepsilon &= 0,9 \\ S_L &= 755,74 m^2 \\ T_{p-ext} &= 673,15 K \\ T_{air-ambient} &= 303,15 K \end{aligned} \right\} \Rightarrow \phi_{pertes \text{ par ray}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S_L \cdot (T_{p-ext}^4 - T_{air-ambient}^4)$$

$$\Rightarrow \phi_{pertes \text{ par ray}} = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,9 \times 755,74 \times (673,15^4 - 303,15^4)$$



Finalement on trouve :

$$\boxed{\phi_{pertes \text{ par ray}} = 7,59 MW}$$

III.3.3) - pertes par fumée :

$$\text{- On a } \phi_{entrée} = \phi_{absorbée} + \phi_{pertes \text{ Totales}} \Rightarrow \phi_{pertes \text{ Totales}} = 36,71 - 22,23$$

$$\Rightarrow \boxed{\phi_{pertes-tot} = 14,48 MW}$$

- On sait que : $\phi_{\text{pertes-Totales}} = \phi_{\text{pertes-rayo}} + \phi_{\text{pertes-1}} + \phi_{\text{pertes-fumée}}$

- Donc : $\phi_{\text{pertes par fumée}} = 14,48 - 7,59 - 6,49 = 0,4 \text{ MW}$

$$G_{\text{pertes par fumée}} = \frac{\phi_{\text{pertes par fumée}}}{\phi_{\text{pertes Totales}}} \Rightarrow G_{\text{pertes par fumée}} = \frac{0,4}{14,48} \Rightarrow G_{\text{pertes par fumée}} = 2,76\%$$

- Pour la phase d'étude on peut négliger les pertes par fumée car elles sont négligeables par rapport aux autres pertes (97,24%)

III.4)- calcul des gains

III.4.1)- taux de pertes totales de la chaleur

Nous avons :

$$G_{\text{pertes Totales}} = \frac{\phi_{\text{pertes Totales}}}{\phi_{\text{entrée}}} \Rightarrow G_{\text{pertes Totales}} = \frac{14,48}{36,71} \Rightarrow G_{\text{pertes Totales}} = 39,44\%$$

III.4.2)- taux de la Chaleur absorbée

On sait que :

$$G_{\text{absorbée}} = \frac{\phi_{\text{absorbée}}}{\phi_{\text{entrée}}} \Rightarrow G_{\text{absorbée}} = \frac{22,23}{36,71} \Rightarrow G_{\text{absorbée}} = 60,56\%$$

IV)- Solution pour diminuer les pertes thermiques

- pour Diminuer la Quantité de la chaleur perdue, il faut placer une couche d'un isolant convenable, bien étudié et bien définie . Après une recherche d'un bon isolant thermique, qui peut supporter une température élevée et peut réfléchir une grande quantité de chaleur vers l'intérieur du four, on a proposé la laine de verre

- La **laine de verre** est un matériau isolant de consistance laineuse obtenu par fusion à partir de sable et de verre recyclé Elle a été inventée en 1938, par Russell Games Slayter d'Owens-Corning, depuis elle est utilisée abondamment pour l'isolation thermique, l'isolation phonique et la protection incendie de tous types de bâtis, et il supporte une température à environ de 600 °C



Figure 20 : isolant en laine de verre

IV.1) calcul des pertes thermiques avec isolant

IV.1.1)-L'étude d'épaisseur de l'isolant :

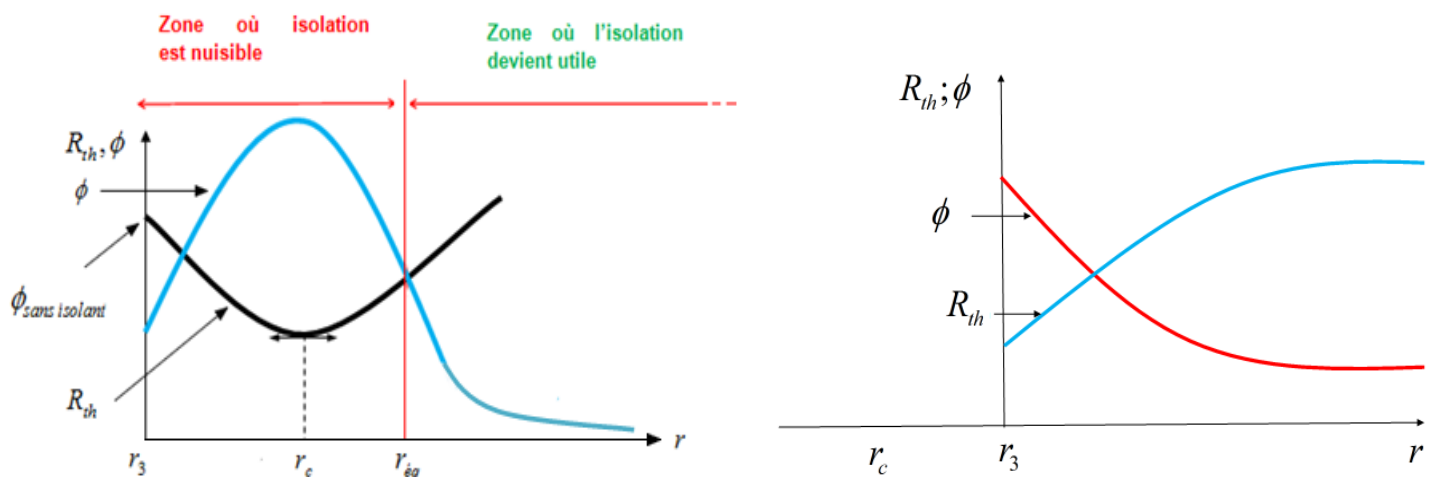


Figure 21 : Evolution du flux de chaleur et de la résistance thermique

On a
$$r_c = \frac{\lambda_{isolant}}{h_2} = \frac{0,04}{25} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,6 \text{ mm}$$

Alors on voit que

$$r_{iso} = 25 \text{ mm} \succ r_c = 1,6 \text{ mm} \text{ (rayon d'isolation supérieur au rayon critique)}$$

Le flux de chaleur diminue lorsque r augmente, dans ce cas l'isolation joue son rôle et la résistance thermique augmente en empêchant la chaleur de se déplacer vers l'extérieur

Par conséquent on arrive à éviter la zone où l'isolation est nuisible, on peut dire que plus le rayon d'isolant augmente, plus les pertes diminuent.

IV.1.2) -pertes de chaleur par conduction & convection :

$$\text{- On a } \left\{ \begin{array}{l} r_1 = 1.7 \text{ m} \\ r_2 = 1.9 \text{ m} \\ R_{LV} = r_2 + e_{LV} = 1.925 \text{ m} \\ R_{Aci} = R_{LV} + e_2 = 1.965 \text{ m} \end{array} \right. \text{ donc } \left\{ \begin{array}{l} R_{th1-conve} = \frac{1}{2\pi h_1 r_1 L} = 4,72 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1} \\ R_{th1-condu} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_b L} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ W}^{-1} \\ R'_{th2-condu} = \frac{\ln\left(\frac{R_{LV}}{r_2}\right)}{2\pi \lambda_{LV} L} = 8.39 \times 10^{-4} \text{ W}^{-1} \\ R_{th3-condu} = \frac{\ln\left(\frac{R_{Aci}}{R_{LV}}\right)}{2\pi \lambda_{ac} L} = 1.01 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1} \\ R'_{th2-conve} = \frac{1}{2\pi h_2 R_{Aci} L} = 5,22 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1} \end{array} \right.$$



On applique la relation suivante pour calculer la résistance

thermique totale :

$$R'_{th-tot} = R_{th1-conve} + R_{th1-condu} + R'_{th2-condu} + R_{th3-condu} + R'_{th2-conve}$$

Or on a
$$\phi'_{pertes-1} = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{R'_{th-tot}} \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} R'_{th-tot} = 1,05 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \\ T_{air-ambient} = T_{\infty e} = 30 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{\infty i} = 1400 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

- On trouve finalement
$$\phi'_{pertes-1} = \frac{1400 - 30}{1,05 \times 10^{-3}} \Rightarrow \boxed{\phi'_{pertes-1} = 1,3 \text{ MW}}$$

IV.2) calcul de la chaleur totale perdue

- On a : $\phi'_{\text{pertes-Tot}} = \phi_{\text{pertes-ray}} + \phi'_{\text{pertes-1}} \Rightarrow \phi'_{\text{pertes-Tot}} = 7,59 + 1,3$

$$\phi'_{\text{pertes-Tot}} = 8,89 \text{ M W}$$

- Or $\phi_{\text{entrée}} = \phi'_{\text{absorbée}} + \phi'_{\text{pertes-Tot}} \Rightarrow \phi'_{\text{absorbée}} = \phi_{\text{entrée}} - \phi'_{\text{pertes-Tot}}$

Avec $\phi_{\text{entrée}} = 36,71 \text{ MW}$

D'où $\phi'_{\text{absorbée}} = 36,71 - 8,89 \Rightarrow \phi'_{\text{absorbée}} = 27,82 \text{ M W}$

IV.3) calcul des taux

IV.3.1) -taux de pertes totales de la chaleur :

$$G'_{\text{pertes-Tot}} = \frac{\phi'_{\text{pertes-Tot}}}{\phi_{\text{entrée}}} \Rightarrow G'_{\text{pertes-Tot}} = \frac{8,89}{36,71} \Rightarrow G'_{\text{pertes-Tot}} = 24,22\%$$

IV.3.2)-taux de la Chaleur Absorbée

$$G'_{\text{C.absorbée}} = \frac{\phi'_{\text{C.absorbée}}}{\phi_{\text{entrée}}} \Rightarrow G'_{\text{C.absorbée}} = \frac{27,82}{36,71} \Rightarrow G'_{\text{C.absorbée}} = 75,78 \%$$

- Enfin on arrive à diminuer les pertes d'un taux de 15,22 % lorsqu'on utilise la laine de verre, si on veut diminuer plus des pertes on doit augmenter l'épaisseur d'isolant mais comme vous savez plus que l'épaisseur augmente le prix d'achat augmente donc il faut utiliser une épaisseur optimale.

CONCLUSION

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, l'enjeu crucial que représente l'amélioration des performances du four rotatif de cuisson du ciment, dans l'industrie cimentière, nous a amené à faire un suivi de la consommation d'énergie thermique, et la mise en place d'un tableau de bord. en étudiant : les paramètres process : la puissance de moteur de l'élévateur, les différentes dépressions, Ampérage du moteur du four, BZT, BET , le taux d'oxygène, etc....., et aussi les paramètres qualité : LSF, MAF, MS, F- et la finesse du crû, enfin les paramètres maintenance au niveau du four étudié : MTBF, MTTR, la Disponibilité, et à analyser les données : les fourchettes de chaque paramètre, tout en évitant les valeurs où on est hors la marche idéale, faire une étude de l'épaisseur d'isolant (la laine de verre), **et** à présenter les principales causes de la surconsommation qui sont : augmentation de LSF, MAF, MS, la finesse du crû, et aussi la diminution de la Fluorine (F-), les pertes par paroi, et s'assurer de la production d'une manière permanente.

- Nos solutions proposées sont comme suit :

- ☞ Solutions efficaces pour réduire au maximum les pertes engendrées par les différentes sources de la surconsommation calorifique et Solution d'optimisation obtenue grâce à :
 - Un suivi quotidien standard des paramètres importants dans l'objectif de suivre leurs évolution.
 - Un revêtement en isolant thermique (la laine de verre) bien approprié avec une épaisseur bien étudiée.
- ❖ Enfin on arrive à mettre en place d'un tableau de bord clair, qui regroupe les différentes paramètres avec leurs bornes, les objectifs de chaque paramètre, on arrive aussi à diminuer les pertes thermiques, du coup on diminue la CCS, qui est l'objectif principal de la société.

Finalement, nous considérons notre stage comme un apport totalement bénéfique pour nous sur les plans humains et techniques car il nous a permis de contribuer à résoudre des problèmes réels de l'industrie.

Bibliographie

{1} Documents de la société (service production) :

{1.a} Technical information system for Holcim (TIS)

{1.b} Documents fournisseurs (Guide d'aide à la conduite « FIVES PILLARD »)

{1.c} « CHIMIE DU CLINKER » BAOUENDI Mohamed Sadok

{2} « Cours des Transferts thermiques, LST GI S6, AU 2015/2016 » Pr S. HAOUACHE

{3} « Cours de gestion de la maintenance, LST GI S5, AU 2015/2016 » Pr A. CHAFI

Webographie

- <http://www.holcim.co.ma/>
- <http://www.holcim.co.ma/uploads/MA/fes.pdf>
- <http://www.memoirepfe.fst-usmba.ac.ma/>
- <http://www.nsiequipments.com/rotary-kilns.html>
- http://www.coen.com/wp-content/uploads/Rotary_Kiln_Burner.pdf

Annexes

Annexe 1 : suivi journalier des paramètres qualité

paramètres	F-	LSF	MS	MAF	Cons-Calorif
Date	%	%	%	%	MJ/t
01/01/2016	0,154	101,11	2,5	1,76	3408
02/01/2016	0,186	102,22	2,56	1,82	3505
03/01/2016	0,152	101,98	2,56	1,82	3505
04/01/2016	0,152	103,84	2,5	1,73	3431
05/01/2016	0,153	102,23	2,51	1,73	3370
06/01/2016	0,148	102,75	2,48	1,7	3373
07/01/2016	0,155	101,69	2,44	1,65	3312
08/01/2016	0,159	102,28	2,4	1,7	3258
09/01/2016	0,154	101,97	2,45	1,72	3385
10/01/2016	0,153	101,86	2,53	1,72	3385
11/01/2016	0,154	101,59	2,52	1,77	3444
12/01/2016	0,155	102,07	2,57	1,82	3503
13/01/2016	0,154	102,43	2,52	1,74	3419
14/01/2016	0,156	103,52	2,41	1,67	3335
15/01/2016	0,159	104,16	2,5	1,75	3403
16/01/2016	0,15	103,79	2,54	1,79	3481
17/01/2016	0,153	102,98	2,55	1,81	3491
18/01/2016	0,155	103,66	2,48	1,97	3443
19/01/2016	0,154	103,56	2,51	1,77	3464
20/01/2016	0,153	102,65	2,52	1,75	3464
21/01/2016	0,153	104,35	2,57	1,81	3520
22/01/2016	0,154	103,04	2,55	1,81	3505
23/01/2016	0,155	103,16	2,5	1,72	3451
24/01/2016	0,149	102,14	2,55	1,81	3492
25/01/2016	0,154	103,79	2,56	1,71	3532
26/01/2016	0,151	102,79	2,43	1,67	3232
27/01/2016	0,151	101,52	2,45	1,72	3326
28/01/2016	0,152	103,63	2,45	1,74	3421
29/01/2016	0,152	102,5	2,45	1,76	3425
30/01/2016	0,151	102,5	2,44	1,72	3335
31/01/2016	0,156	101,36	2,42	1,69	3307
Moyen	0,154	102,68	2,5	1,75	3417
MAX	0,186	104,35	2,57	1,97	3532
MIN	0,148	101,11	2,4	1,65	3232

Annexe 2 : Débits des gaz & matières

Matière	Air secondaire	charbon	Farine	Gasoil	Pneu+Grignons d'olives+déchets (Fluffs)+petcoke	Air Primaire	Clinker
État	Gaz	Solide	Solide	Liquide	Solide	Gaz	Solide
Debit	36,4	9	195 max	1	9	6,72	2800 max
Unité	Kg/s	t/h	t/h	t/h	t/h	Kg/s	t/j

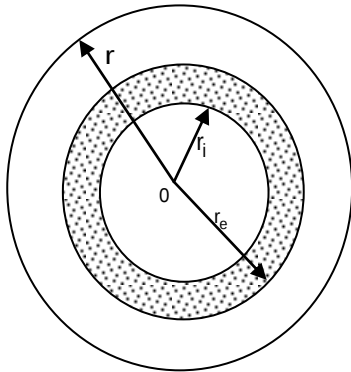
Annexe 3 : Comparaison de la consommation calorifique entre 2014 et 2015

Date	CCS Réalisée en 2015 (MJ/t)	CCS Réalisée en 2014 (MJ/t)
janvier	3418	3372
février	3397	3372
mars	3410	3458
avril	3388	3388
mai	3369	3388
juin	3359	3388
juillet	3350	3388
août	3341	3388
septembre	3358	3388
octobre	3408	3388
novembre	3338	3388
décembre	3334	3388
cumul	3387	3388

Annexe 4: Epaisseur critique d'un revêtement isolant

- Considérons un cylindre creux de rayons r_1 et r_2 , de longueur L , de conductivité thermique λ , en contact avec 2 fluides en mouvement. Supposons qu'autour de ce tube soit placé un isolant de rayon extérieur r et de conductivité thermique λ_i .

- h_i et h_e sont les coefficients de transfert de chaleur Par convection entre les fluides et les faces interne et externe.



$$R_i = \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right)}{2\pi\lambda_i l} \text{ donc } R_{th} = \frac{1}{h_i 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)}{2\pi\lambda_i L} + \frac{1}{h_e 2\pi r L}$$

Variation de R_{th} en fonction de r :

$$\frac{dR_{th}}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{\ln r - \ln r_2}{2\pi\lambda_i L} \right) + \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{h_e 2\pi r L} \right) = \frac{1}{2\pi\lambda_i L r} - \frac{1}{h_e 2\pi r^2 L}$$

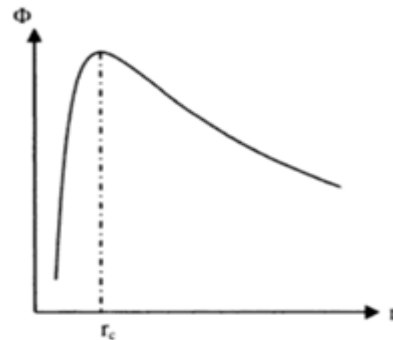
$$= \frac{1}{2\pi\lambda_i L r^2} \left(r - \frac{\lambda_i}{h_e} \right)$$

- On pose $r_c = \frac{\lambda_i}{h_e} \Rightarrow \frac{dR_{th}}{dr} = \frac{1}{2\pi\lambda_i L r^2} (r - r_c)$

r_c : rayon critique du revêtement, il correspond à une résistance thermique extrême

Soit $\frac{dR_{th}}{dr} > 0$ si $r > r_c$ et $\frac{dR_{th}}{dr} < 0$ si $r < r_c$

- pour $r < r_c$ (rayon d'isolation inférieur au rayon critique) : le flux de chaleur augmente lorsque r augmente, ce phénomène s'explique par la déperdition thermique par convection à travers la surface latérale du cylindre.



Or $r_2 \leq r \leq +\infty$: on distingue 2 cas :

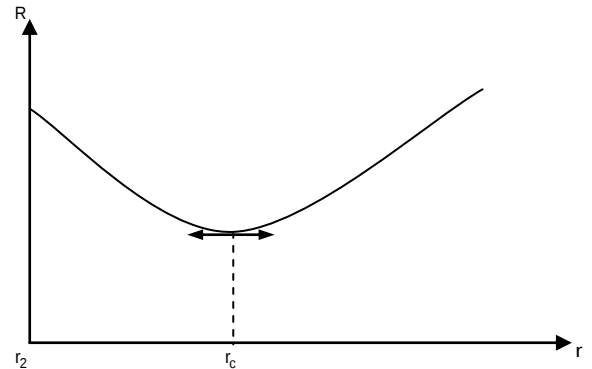
- 1^{er} cas : $r_c \leq r_2 \Rightarrow r_c \leq r_2 \leq r \Rightarrow \frac{dR_{th}}{dr} \geq 0$

- Dans ce cas quelque soit l'épaisseur du calorifuge, r est nécessairement supérieur à r_c et le flux thermique diminue.

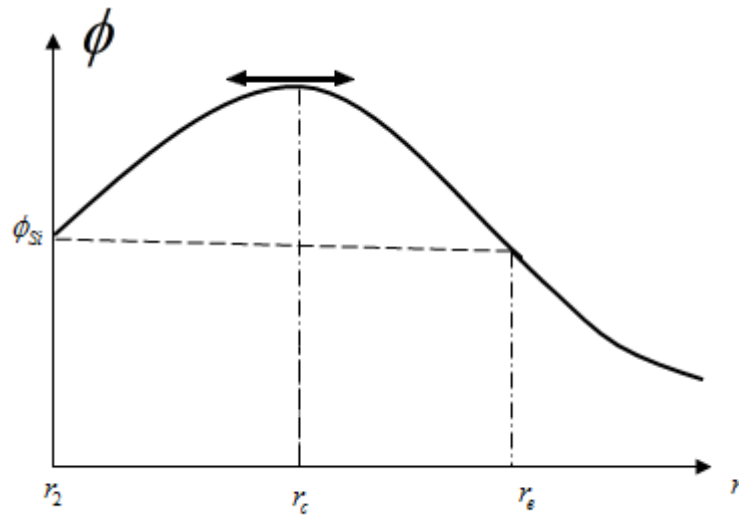
- 2^{eme} cas : $r_2 \leq r_c$:

a- $r_2 \leq r \leq r_c \Rightarrow \frac{dR_{th}}{dr} \leq 0$; R_{th} décroît avec r

b- $r_2 \leq r_c \leq r \Rightarrow \frac{dR_{th}}{dr} \geq 0$; R_{th} croît avec r



- On définit le rayon équivalent r_e comme le rayon pour lequel l'isolation est inefficace



Annexe 6 : Modes de transfert de chaleur dans le four rotatif

- Les fours rotatifs sont normalement recouverts d'un matériau réfractaire pour réduire les pertes de rayonnement et de transférer la chaleur à la matière
- Tous les fours sont des échangeurs de chaleur et elle est transférée à travers plusieurs façons : par rayonnement , convection et conduction.



Annexe 6 : Caractéristiques de la tuyère

- Puissance calorifique à la tuyère : 57 MW
- Longueur partie avant : 5,5 m
- Longueur totale approximative : 11 m
- Poids unitaire approximatif avec béton réfractaire : 8000 Kg
- Revêtement réfractaire, épaisseur conseillée : 80 mm
- Débit d'air de combustion : 60 500 Nm³/h
- Débit d'air primaire : 7200 Nm³/h
- Débit maxi charbon : 9000 Kg/h
- Débit nominal charbon : 7900 Kg/h
- Variation : 1 :10
- Débit d'air de transport : 2000 Nm³/h
- Débit diesel : 1000 Kg/h

