



Année Universitaire : 2015-2016

**Master Sciences et Techniques GMP
Génie des Matériaux et des Procédés**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

**OPTIMISATION DE L'ENERGIE CALORIFIQUE
DU FOUR DE LA CUISSON**

Présenté par :

HAL HOUSSINE Chaimae

Encadré par:

- M. RAHAT Khalil - Holcim
- Pr. ZEROUALE Aziz - Fès

Soutenu Le 18 Juin 2016 devant le jury composé de :

- Pr. A. ZEROUALE
- Pr. N. IDRISSI KANDRI
- Pr. H. SOUHA

Stage effectué à : Holcim Ras El Ma





Dédicace

Ce modeste travail est dédié :

A la mémoire de mon père

A ma chère mère

A mon beau-père

A mon frère Louay et ma sœur Afrae

A la famille ENNMINEJ, tout particulièrement ma chère tante
Najia, mon oncle Mohammed et tous mes cousins

A la famille HAL HOUSSINE

A tous mes chers amis de la Faculté de Sciences et de Techniques de
Fes et surtout ceux en Génie de Matériaux et de Procédés

A mes enseignants le long de ma vie scolaire et universitaire



Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements les plus sincères à M. ZEROUALE qui m'a beaucoup aidé lors de la rédaction de mon rapport de stage. Son écoute et ses conseils pertinents m'ont permis d'accomplir ce travail. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je remercie surtout Messieurs les professeurs N. IDRISSE KANDRI et H. SOUHA d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie également M. RAHAT Khalil, responsable de la ligne de cuisson qui a bien voulu m'accueillir comme stagiaire et il s'est montré très disponible pour répondre à mes questions malgré son planning chargé.

Je tiens à remercier aussi M. LAMBARAA Nawfal et M. AYYADI de m'avoir accueillie dans leur bureau et de m'avoir faite travailler dans la bonne humeur. Ils m'ont aussi aidé à réunir les informations et les documents qui pouvaient me servir dans mon rapport de stage.

Je remercie particulièrement M. BAJJA Mohammed pour les tournées dans l'usine, qui m'ont aidé beaucoup à élaborer mon projet de fin d'études.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé lors de la rédaction de ce rapport de stage : ma famille surtout HAL HOUSSINE Afrae, tous mes amis et plus particulièrement : ALAOUI Achraf, AMRANI Mohammed, BOUKHIR Nadir, ANNABA Khadija, EL AKKARI Montasser et EL MAALEMY Youness.



Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Présentation de l'organisme d'accueil.....	2
1. Présentation de Holcim-Maroc	3
1.1. Industrie du ciment au Maroc	3
1.2. Historique de Holcim Maroc.....	4
1.3. Localisation.....	6
2. Présentation de Holcim Ras El MA	6
2.1. Organigramme.....	7
2.2. Activités	7
3. Procédé de fabrication du ciment	8
3.1. Extraction et préparation des matières premières	8
3.2. Séchage et broyage	8
3.3. Cuisson	8
3.4. Du clinker aux ciments	9
3.5. Expéditions	10
3.6. Salle de contrôle.....	10
3.7. Contrôle qualité.....	10
Chapitre2 Description du processus du ciment	12
Problématique.....	13
1. Présentation de la ligne de cuisson.....	14
1.1. Tour de préchauffage	14
1.2. Four rotatif	14
1.3. Tuyère.....	17
1.4. Refroidisseur.....	19
2. Processus de cuisson	19
3. Combustion	23
3.1. Définition	23
3.2. Produits de combustion	23
3.3. Quantité d'air nécessaire	25
4. Combustibles	25
4.1. Types de combustibles	26
4.1.1. Combustibles fossiles traditionnels.....	26

4.1.2. Combustibles de substitution ou AFR	27
4.2. Broyeur combustible	29
5. Consommation calorifique	30
6. Axes à améliorer	31
7. Diagramme d'ishikawa	32
Chapitre 3 Résultats et Discussion	34
1. Combustible.....	35
1.1. Petcoke HTS/ Petcoke BTS.....	35
1.2. Finesse du combustible	38
2. Composition chimique du cru	40
2.1. Modules du cru.....	40
2.1.1. Facteur de saturation en chaux -FSC-.....	40
2.1.2. Module silicique -MS-.....	41
2.1.3. Module aluminoferrique -MAF-	43
2.2. Finesse du cru.....	44
2.3. Phase liquide	45
2.4. Relation entre le module silicique et la phase liquide	46
3. Fluorine.....	47
4. Airs faux.....	48
5. Réglage de la tuyère	49
5.1. Air axial	49
5.2. Air radial	50
6. Isolant thermique.....	52
7. KilnMaster	53
7.1. Précalcinateur.....	53
7.2. Refroidisseur.....	54
7.3. La zone de cuisson.....	54
Synthèse	56
Conclusion générale	57

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation des différents sociétés d’Holcim et de Lafarge dans le monde	6
Figure 2: Organigramme de Holcim Ras El Ma.....	7
Figure 3: Procédé de fabrication du ciment.....	11
Figure 4: Four de cuisson à Holcim	15
Figure 5: Tuyère de combustion d’Holcim Ras El Ma.....	18
Figure 6: Processus de cuisson obtenu de la salle de contrôle à Holcim.....	22
Figure 7: Charbon	26
Figure 8: Installation du raffinage du pétrole	27
Figure 9: Installation pour gaz naturel	27
Figure 10: Petcoke	28
Figure 11: Grignons d'olives	29
Figure 12: Graphe montrant la différence de la consommation calorifique entre 2014 et 2015..	31
Figure 13: Diagramme Ishikawa.....	33
Figure 14: Influence de la quantité du soufre dans le Petcoke sur la consommation calorifique	36
Figure 15: Effet de la diminution de la consommation calorifique sur la production en clinker	38
Figure 16: Influence de la finesse du petcoke sur la consommation calorifique.....	39
Figure 17: Influence du facteur de saturation en chaux sur la consommation calorifique	41
Figure 18: Influence du module silicique sur la consommation calorifique.....	42
Figure 19: Influence du module alumino-ferrique sur la consommation calorifique	43
Figure 20: Influence de la finesse du cru sur la consommation calorifique	44
Figure 21: Effet du taux de la phase liquide sur la consommation calorifique.....	46
Figure 22: Effet du taux de la phase liquide sur le module silicique	47
Figure 23: Effet de la fluorine sur la consommation calorifique	48
Figure 24: Formes de flamme selon le réglage de la tuyère.....	51
Figure 25: Laine de verre	53



Liste des tableaux

Tableau 1: Types des briques réfractaires utilisées selon la longueur du four de cuisson.....	17
Tableau 2: Composition générique typique de quelques combustibles	23
Tableau 3: Production de CO₂ Lors de la combustion du gaz et du fuel.....	24
Tableau 4: Production de H₂O lors de la combustion du gaz et du fuel	24
Tableau 5: Exemples des pouvoirs calorifiques des combustibles	31
Tableau 6: Caractéristiques du Petcoke à haute teneur en soufre.....	37
Tableau 7: Caractéristiques du Petcoke à basse teneur en soufre	37

Introduction générale

Les cimenteries sont de grosses consommatrices d'énergie thermique. Ces dernières années, les cimenteries ont fait d'importants efforts pour réduire cette consommation et alléger les coûts de production avec des équipements moins énergivores ainsi que des combustibles et des matières premières de substitution. Mais cette évolution a créé des contraintes qui doivent être maîtrisées pour satisfaire aux exigences de qualité et de productivité.

La fabrication du ciment est un procédé complexe et gourmand en énergie. L'étape la plus importante est la transformation des minerais de calcaire, du schiste, du sable et du fer en clinker dans le four de cuisson. Une cimenterie type récupère les gaz brûlés du four pour préchauffer la matière première avant de l'enfourner. Au fur et à mesure de la montée en température de la zone de cuisson (jusqu'à 1500 °C environ), les minerais fondent partiellement et réagissent pour former le clinker, qui deviendra ensuite du ciment en additionnant des ajouts correctifs.

Le but de ce projet est d'optimiser l'énergie calorifique de la ligne de cuisson et spécifiquement celle du four en tenant compte de tous les paramètres influençant cette énergie et d'essayer de trouver l'effet de chacun de ces paramètres sur la consommation calorifique et de proposer des solutions pour diminuer cette dernière.

Ce travail traitera en détail le rôle de chaque paramètre ainsi que son optimisation afin de diminuer la consommation calorifique, de garder une bonne réactivité du clinker ainsi qu'une meilleure qualité du ciment.

Notre rapport est subdivisé en trois chapitres selon le plan suivant :

- Introduction
- Présentation de l'organisme d'accueil
- Description du processus de cuisson
- Résultats et discussion
- Conclusion générale

Chapitre 1

Présentation de l'organisme d'accueil

1. Présentation de Holcim-Maroc

1.1. Industrie du ciment au Maroc

L'industrie cimentière est l'une des activités industrielles la plus structurée et la mieux répartie 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, avec une prédominance de LAFARGE dans le nord-est, CIMENT DU MAROC dans le sud et HOLCIM dans le nord-est.

Les années 90 ont constitué pour cette industrie, une période de restructuration, de développement et d'investissement. Les progrès réalisés ont permis au Maroc, d'une part, de rompre avec l'importation du ciment et d'autre part, de promouvoir à partir de 1994, l'exportation du clinker et du ciment.

Holcim est l'un des plus grands producteurs mondiaux du ciment. Le siège central se trouve à Zurich. Son ancien nom était Holderbank.

Holcim a été fondée en 1912 sous le nom de « financière Glaris » dans le village d'Holderbank du canton d'Argovie. C'est un groupe suisse leader dans les produits de matériaux de construction pour un usage varié, présent dans plus de 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats et du béton. Il compte plus de 90 000 employés à travers le monde.

Holcim Maroc est un groupe cimentier national présent dans différentes régions du pays et dispose d'une capacité de production de 4,5 millions de tonnes. Parmi ses activités :

- **Ciment** : Trois cimenteries (Oujda, Settat, Fès), un centre de broyage, d'ensachage et de distribution (Nador) et un centre d'ensachage et de distribution (Casablanca).
- **Béton** : Avec 9 centrales (Fès, Nador, 2 à Rabat, 2 à Tanger et 3 à Casablanca).
- **Granulat** : Une carrière dans la région de Benslimane.
- **Ecoval** : Plateforme de prétraitement des déchets dans la région d'El Gara à 40 Km de Casablanca.
- **Batipro distribution** : Premier réseau de distribution de matériaux de construction au Maroc initié par Holcim Maroc.
- **Mateen** : Société de promotion immobilière lancée en 2007 par Holcim Maroc et deux opérateurs immobiliers marocain et français.



1.2. Historique de Holcim Maroc

1976 : Création de la société CIOR par l'Office de Développement Industriel ODI, ayant pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.

1978 : Mise en service de l'usine d'Oujda avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.

1979 : Installation à Fès Doukkarat d'un centre d'ensachage et de distribution d'une capacité de 50000 T/an, transformé en centre de broyage en clinker en 1989.

1982 : Mise en service d'un centre d'ensachage et de distribution de Casablanca d'une capacité de 35000 T/an.

1985 : Création de la société Ciments Blancs du Maroc à Casablanca.

1986 : Création de la filiale Andira, dont l'activité consiste en la location du siège de HOLCIM (Maroc).

1990 : Deux événements ont marqué cette année, le premier étant l'implantation d'un centre de broyage à Fès Ras El Ma d'une capacité de 350000 T/an. Le deuxième étant la création de la société HOLCIM Béton, afin de porter le développement de l'activité BPE de HOLCIM (Maroc).

1992 : Changement de dénomination de la société CIOR qui devient Ciments de l'Oriental.

1993 : Privatisation par voie de cession de 51% du capital social de la société Ciments de l'Oriental au groupe suisse HOLCIM Ltd : Introduction en bourse et mise en service d'une ligne complète de production de clinker à Fès Ras El Ma.

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

1999 : Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca et mise en service d'une centrale de broyage et d'ensachage.

2000 : Mise en service des installations de valorisation de combustibles de substitutions à l'usine des Fès Ras El Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre centrale à Nador.

2001 : Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie de Fès.



2002 : Changement de l'identité visuelle : la société Ciment de l'Oriental devient HOLCIM (Maroc) ; Adsorption par HOLCIM (Maroc) des sociétés Atlacim et de la société HOLCIM (Méditerranée) ; Création de la filiale granulats (HOLCIM granulats) ; Démarrage de l'unité de production à Benslimane et certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie d'Oujda.

2004 : Extension de la capacité de broyage et stockage du ciment à Fès Ras El Ma ; acquisition de 51% du capitale de la société Asment Ouled Ziane qui devient HOLCIM AOZ ; fermeture du centre de broyage de Doukkarat en raison du surcout qu'il générerait du fait de son éloignement de la cimenterie de Fès Ras El Ma.

2005 : Mise en service du centre d'ensachage et de distribution de Settat, comme première étape du processus de réalisation graduelle d'une cimenterie.

2006 : Extension du centre de broyage de Nador (500 000 tonnes de clinker), création de la filiale Ecoval, spécialisée dans le traitement des déchets industriels et mise en service du centre de broyage de Settat.

2007 : Entrée en production de l'usine de Settat avec une capacité de production 1,7 millions de tonnes de ciments, création de la société « Promotion H.A.S. », spécialisée dans les opérations immobilières afin de promouvoir la construction durable avec des matériaux innovants, dans le cadre d'un partenariat avec des opérateurs spécialisés.

2008 : Lancement du projet du doublement de la capacité de l'usine de Fès (1.2 Mt à horizon 2012) ; lancement d'une émission obligatoire de 1.5 milliards de dirhams et certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de Nador.

2009 : Démarrage de la carrière de Skhirat qui permet de stimuler le volume des ventes de granulats (1160 KT en 2009 vs. 653 KT en 2008) ; création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : Batipro distribution avec un réseau de plus de 100 franchisés à travers le Maroc ; mise en service d'une station de traitement de déchets liquides dans l'unité de traitement de déchets industriels Ecoval et signature d'une convention avec le Groupe AL OMRANE pour la réalisation d'une opération de 1000 logements à BOUZNIKA et BENSLIMANE.

2010 : Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settat et de la plateforme de traitement de déchets d'Ecoval à EL GARA.

2011 : Implémentation d'une nouvelle organisation commerciale.

2012 : Mise en service de la nouvelle capacité de production 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 : Holcim annonce un projet de fusion avec Lafarge. La nouvelle entité sera basée en suisse.

1.3. Localisation

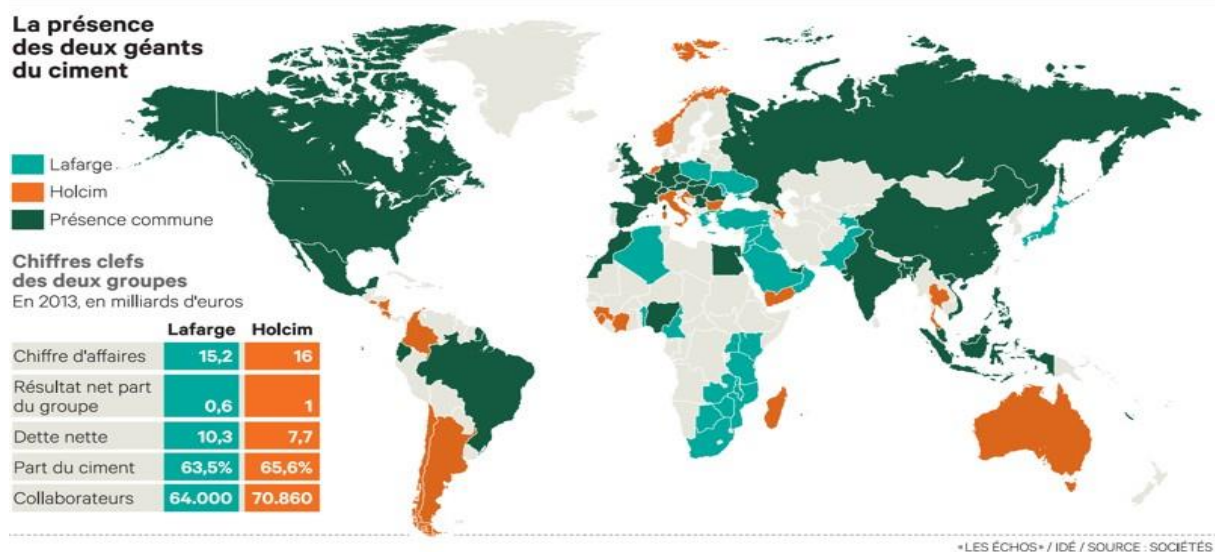


Figure 1 : Localisation des différents sociétés d'Holcim et de Lafarge dans le monde

2. Présentation de Holcim Ras El MA

La cimenterie HOLLCIM Ras EL MA est placée au centre du royaume. Elle a démarré en 1993 afin de renforcer la présence de HOLLCIM au Maroc et de répondre aux besoins grandissants du ciment dans une région où le marché de construction ne cesse de s'étendre.

L'usine est située à 25 Km au sud de Fès, à Bensouda-Ras El Ma, avec une superficie de 230 ha, ses ventes peuvent atteindre 3500 T/jr.

2.1. Organigramme

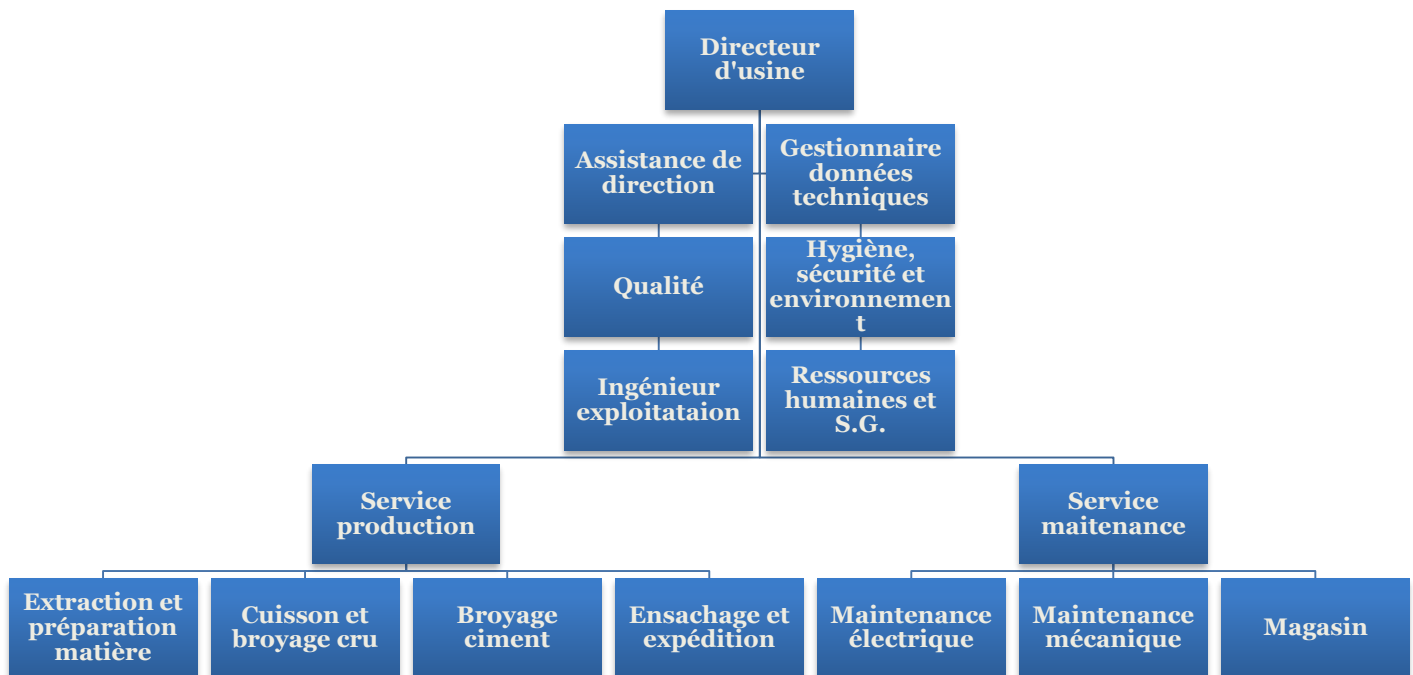


Figure 2: Organigramme de Holcim Ras El Ma

2.2. Activités

Holcim Ras EL Ma est spécialisée dans la fabrication de différents types du ciment :

- 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 chaussées.
- 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 dans 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.

3. Procédé de fabrication du ciment

3.1. Extraction et préparation des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83 %
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14 %
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) : de 1,5 à 3 %

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

3.2. Séchage et broyage

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques μm) dans des broyeurs à galets. Ces derniers, plus récents, sont plus économes en énergie et permettent un séchage plus efficace.

Ensuite 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et semi-sèche. La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire.

Aujourd'hui, Holcim-Ras El Ma n'utilise que la voie sèche. Dans ce procédé, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération du broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci est introduite directement dans le four sous forme pulvérulente.

3.3. Cuisson

La cuisson se fait à une température voisine de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ dans un four rotatif, long, cylindrique, tournant à 5,2 tours/minute et incliné de 3 %.

La matière chemine lentement et se combine en venant à la rencontre de la source de chaleur, une longue flamme alimentée au charbon pulvérisé, au fuel lourd, au gaz, ou encore partiellement avec des combustibles de substitution (valorisation de résidus d'autres industries).

L'énergie calorifique consommée est considérable : 3 200 à 4 200 MJoule par tonne de clinker produit, qui équivaut à 766 à 1005 Mcalorie/Tck.

Pour améliorer le bilan thermique, on utilise en amont du four un échangeur thermique qui préchauffe le cru à environ 900 °C. Puisque Holcim utilise la voie sèche comme processus de fabrication, alors elle est dotée d'un échangeur à cyclone.

Entre l'échangeur et le four, est installé un brûleur supplémentaire assurant une « pré-calcination », c'est à dire une décarbonatation partielle qui favorise les réactions ultérieures de clinkérisation et améliore la fiabilité de l'atelier de cuisson.

A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100 °C.

Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker, notamment :

- La décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive,
- Le sable et le schiste se scindent en ces constituants en silice et en alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation.

3.4. Du clinker aux ciments

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyeurs 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 de taille supérieure à 90 µm. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur.

C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5 %) indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments "à ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Différentes catégories de ciments sont ainsi obtenues permettant la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant.

3.5. Expéditions

Acheminés vers les silos de stockage par transport pneumatique ou mécanique, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac. Les sacs contiennent 50 kg de ciment. Les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion.

Le ciment livré en vrac constitue 70 % de la production, il est transporté par camion-citerne.

3.6. Salle de contrôle

Les cimenteries modernes sont aujourd'hui fortement automatisées.

Les ordinateurs analysent en permanence les données transmises par les capteurs disposés en différents points de l'unité de production. De la salle de contrôle, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, les techniciens supervisent l'ensemble des phases de production (de la carrière jusqu'à l'ensachage). La supervision est faite par une interface graphique assurée par le logiciel ABB.

3.7. Contrôle qualité

De la qualité du ciment dépendent la résistance et la pérennité des ouvrages.

Le ciment répond à des normes françaises et européennes très sévères sur lesquelles les cimenteries s'engagent. C'est pourquoi Holcim a depuis longtemps mis en place des procédures de contrôle rigoureuses qui lui permettent de garantir un produit de qualité.

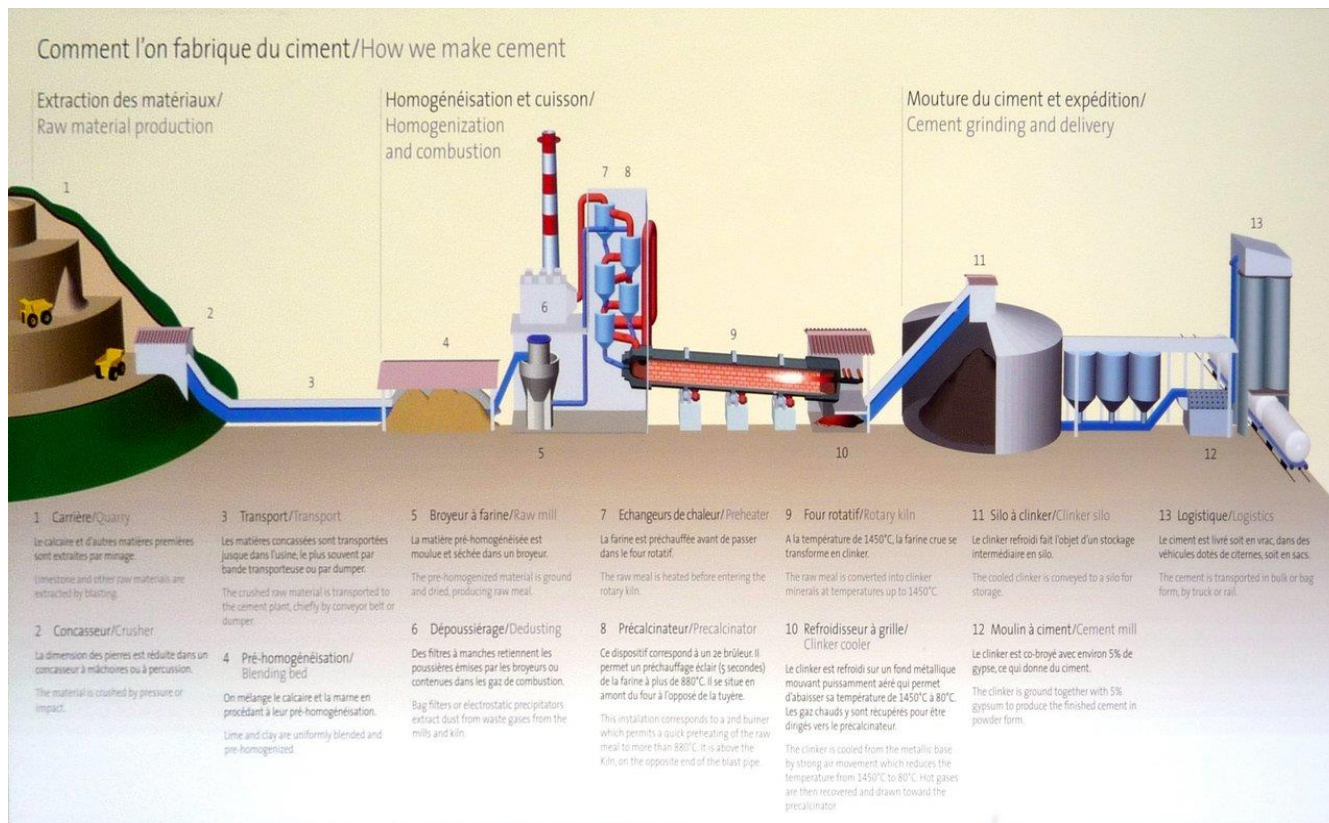


Figure 3: Procédé de fabrication du ciment

Chapitre2

Description du processus du ciment

Problématique

Le processus de la cuisson du clinker nécessite une grande énergie calorifique, car la température de la réaction de clinkérisation est très élevée et peut atteindre 1450°C, ce qui occasionne à Holcim d'immenses dépenses énergétiques. Le grand souci de cette cimenterie devient donc l'optimisation de l'énergie calorifique de l'atelier de cuisson. Pour cette fin, Holcim a déployé plusieurs investissements pour réduire la consommation calorifique, en employant un nouveau processus de fabrication (voie sèche), en remplaçant les anciennes installations par de nouvelles plus efficaces et plus économes en énergie. De nouvelles sources énergivores ont été utilisées dont le petcoke et les grignons d'olives. Ces combustibles sont nommés des combustibles de substitution ou AFR.

Notre travail consiste à proposer de nouvelles solutions pour optimiser la consommation calorifique du four ainsi que les paramètres influençant cette consommation. Afin d'atteindre ce but, une meilleure compréhension du processus de cuisson du clinker est nécessaire.

La consommation énergétique dépend de la nature de la matière entrante au four ainsi que la nature du combustible et les paramètres influençant la cuisson. Elle dépend aussi du réglage de la tuyère contrôlant la forme de la flamme de combustion et des entrées d'air faux. Le plus grand problème à éviter est l'arrêt inattendu du four.

Il faut alors évaluer l'impact de tous ces paramètres et proposer des méthodes visant leur optimisation tout en préservant une bonne qualité du produit final et en ayant comme but principal d'alléger la facture énergétique, l'étude de chacun des paramètres cités auparavant, afin de trouver des solutions permettant l'optimisation de la consommation d'énergie.

1. Présentation de la ligne de cuisson

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

A la cuisson, les composants du mélange cru se décomposent et se recombinent entre eux pour former de nouvelles liaisons minérales : ce sont les minéraux du clinker. L'écriture chimique de ces liaisons est simplifiée en utilisant les lettres C pour CaO (chaux), S pour SiO₂ (silice), A pour Al₂O₃ (alumine) et F pour Fe₂O₃ (oxyde de fer).

L'atelier de cuisson est constitué de quatre éléments principaux :

1.1. Tour de préchauffage

La tour est constituée de deux tours dont chacune est munie de 5 cyclones disposés verticalement sur plusieurs étages. D'étage en étage, la farine est partiellement décarbonatée jusqu'à l'étage inférieur. Dans la tour, les gaz chauds sortant du four préparent la matière thermiquement et chimiquement afin de diminuer l'humidité de cette dernière.

Elle est aussi munie d'un point de combustion, le précalcinateur, permettant de générer des gaz chauds directement dans le bas et diminuant par la même occasion la charge thermique du four.

Grâce à ce procédé, la farine arrive à 93 % décarbonatée à l'entrée du four à une température avoisinante 900 °C, ainsi la longueur du four peut être réduite.

1.2. Four rotatif

C'est un four rotatif cylindrique d'une longueur de 62 m, et 3.4 m de largeur sans acier et 3.8 m avec acier. Il est incliné par rapport à l'horizontal de 3% permettant l'écoulement de la farine et tournant de 5,2 tours/min.

A la sortie de la tour de préchauffage, la farine arrive dans le four où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation : la clinkérisation qui commence à une température de 1200 °C jusqu'à 1450 °C, l'alimentation en farine est située à l'extrémité opposée du brûleur.

En théorie, cette réaction s'arrête lorsqu'il n'y a plus de chaux disponible. Mais en réalité il reste toujours de la chaux non combinée (chaux libre).

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

Caractéristiques du four

- La longueur du four : $L_1 = 62$ m
- Vitesse de rotation : 5,2 tours/minute
- Inclinaison : 3 %
- Le rayon intérieur du four : $r_1 = 1.7$ m
- Le rayon extérieur du four : $r_2 = 1.94$ m
- Epaisseur d'acier : $e_2 = 40$ mm
- Epaisseur du brique : $e_1 = 200$ mm



Figure 4: Image du four de cuisson du clinker utilisé par Holcim

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.

Les briques sont obtenues essentiellement par utilisation de silice SiO_2 et d'alumine Al_2O_3 en plus ou moins grandes quantités selon l'effet recherché. On distingue :

- Produits à base de silice (teneur en silice supérieur à 91 %, en alumine, inférieur à 3 %) ;
- Produits siliceux (teneur en silice entre 85 à 91 %, en alumine, supérieur à 5 %) ;
- Produits à base d'argile (silico-alumineux) (teneur en alumine entre 15 et 40 %) ;
- Produits spéciaux à base de bauxite, magnésie et dolomie, corindon, graphite, carbure de silicium, etc ;

- Produits naturels utilisables sans cuisson préalable. [1]

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

Le tableau n^o 1 présente les différents types de briques utilisées ainsi que leurs caractéristiques.

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- spinelle fusé	FERROMAG 90 Magnésie- hercynite	PERILEX CF Magnésie- spinelle (spinelle fMA)	REFRAMAG AF Magnésie- spinelle	KRONEX 60 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/cm³	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/mm²	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 chocs thermiques	100	100	100	100	100	60

950 °C/air						
Coefficient de conductibilité thermique W/m.K						
300 °C	2,3	4,1	3,7	3,7	4,0	1,4
700 °C	2,2	3,1	3,0	3,0	3,0	1,6
1000 °C	2,1	2,9	2,6	2,8	2,8	1,6
Domaine caractéristique d'utilisation	Zone de sortie, capot de chauffe, refroidisseur, conduite d'air tertiaire, calcinateur	Zone de transition inférieure et supérieure thermo-chimiquement extrêmement sollicités en utilisant des combustibles alternatifs, exempt du chrome	Zone de cuisson et de transition supérieure, favorise le croûtage, exempt de chrome	Zone de cuisson et de transition inférieure et supérieure normalement sollicitées, exempt de chrome	Zone de transition inférieure et supérieure et de cuisson thermo-chimiquement sollicitées en utilisant des combustibles alternatifs exempt du chrome	Zone de sécurité

Tableau 1: Types des briques réfractaires utilisées selon la longueur du four de cuisson

1.3. Tuyère

La tuyère est un tube cylindrique conçue pour la production d'une flamme indispensable pour la formation du clinker. Une bonne optimisation de cette flamme assure une bonne combustion au sein du four. Il faut manipuler les paramètres de la tuyère de façon à ce que la flamme ne soit ni trop longue ni trop large.

La tuyère au sein de Holcim est de type Multichannels fabriqué par fives pillard à flamme rotationnelle. Elle est d'une longueur de 10,37 m, d'une épaisseur de 100 mm et d'un poids de 8000 Kg.

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 d'air de transport : 2000 Nm³/h
- Débit diesel : 1000 Kg/h

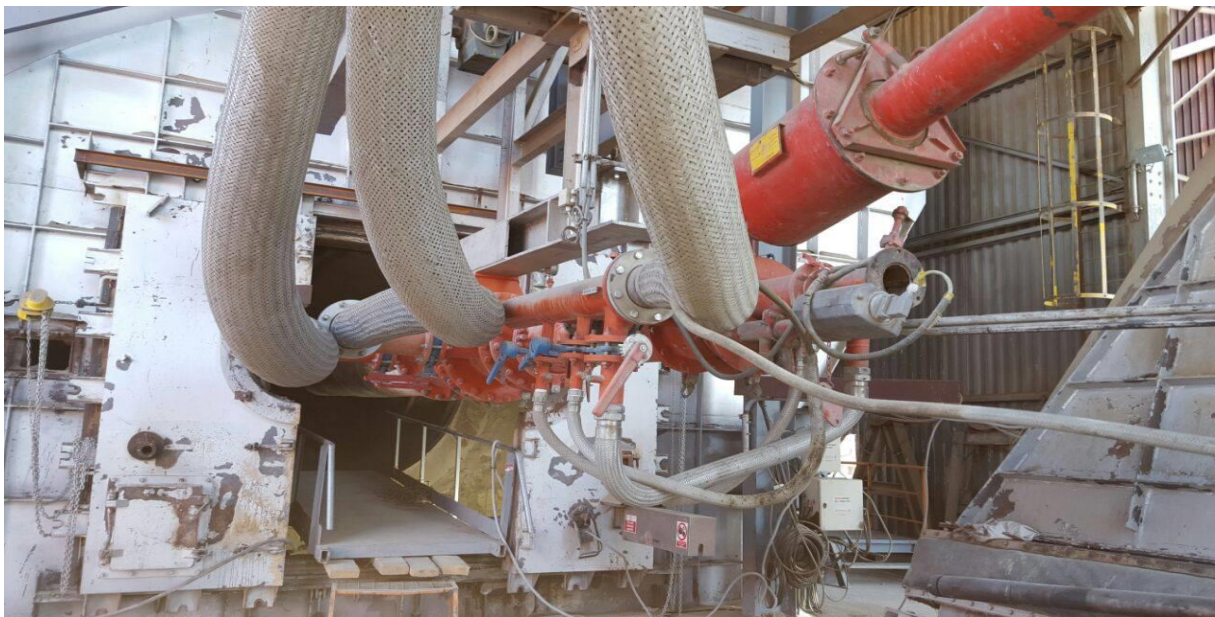


Figure 5: Tuyère de combustion d'Holcim Ras El Ma

La Rotaflam permet une grande flexibilité avec ses deux circuits d'air primaire indépendants, dont les sections de passage aux embouts sont ajustables en fonctionnement.

Le circuit d'air primaire axial propulse de l'air à grande vitesse sans aucune divergence alors que celui d'air primaire radial propulse de l'air à grande vitesse avec rotation.

Le réglage de la répartition des débits d'air entre les deux circuits induit une modification de la forme de la flamme permettant l'optimisation des conditions de fonctionnement du four. Le principe de fonctionnement de ces deux circuits est :

- Forte impulsion axiale : Qui permet de faire pénétrer et mélanger progressivement l'air secondaire dans la flamme et de contrôler le diamètre de la flamme.

- Air radial : Permet la mise en rotation de la flamme améliorant ainsi le mélange du combustible et de l'air primaire. Il modifie la forme de la flamme en jouant principalement sur le diamètre de la flamme.

Types de combustibles qui peuvent passer par la tuyère :

Le brûleur peut fonctionner avec les combustibles suivants :

- Combustibles solides pulvérisés, comme le charbon, le petcoke ;
- Gaz (gaz naturel, COG, LDG, ...) ;
- Produits pétroliers liquide (fioul, gasoil ...) ;
- Combustibles alternatifs liquides ou solides comme les grignons d'olives ;
- Mélange de combustibles dans toutes les proportions.

1.4. Refroidisseur

Le clinker produit est trempé par refroidisseur à grille qui abaisse la température de 1450 °C à 100 °C par soufflage d'air frais.

La procédure de refroidissement après cuisson joue un rôle très important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker, elle évite la décomposition de C_3S en C_2S , la précipitation de MgO sous forme de gros cristaux et le changement de la forme cristalline de C_2S qui provoque la modification des propriétés hydrauliques du ciment ce qui facilitera son broyage et son stockage. Le refroidisseur accomplit une autre fonction très importante qui consiste à récupérer l'énergie thermique à partir du clinker chaud et l'utiliser afin de préchauffer la matière crue.

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté par un élévateur vers un silo de stockage d'une capacité de 40 000 tonnes.

2. Processus de cuisson

Dans une voie sèche, le four est relativement court (de l'ordre de 60 mètres). La farine est introduite dans les cyclones en haut de la tour, elle se réchauffe au contact des gaz de combustion.

Au fur et à mesure de son cheminement dans les cyclones, en descendant dans la tour, la farine rencontre des gaz de plus en plus chauds et sa température est de l'ordre de 900°C en pied de tour.

L'effet cyclonique permet un bon échange thermique entre les gaz et la farine, tout en évitant un entrainement de la farine hors de la tour.

1^{ère} étape : La décarbonatation

Elle s'effectue en bas de la tour, exactement dans le précalcinateur. Le calcaire CaCO_3 est décomposé en oxyde de calcium (CaO) + le gaz carbonique (CO_2). Ce dernier est évacué par la cheminée.

$\text{CaCO}_3 \text{ ----> CaO + CO}_2$ à une température comprise entre 900 et 1000°C (Réaction fortement exothermique).

Pour 1 tonne de CaCO_3 , on évacue à la cheminée 440 kg de CO_2 , du simple fait de la décarbonatation.

2^{ème} étape : Phase de transition

Combinaison de CaO avec :

- SiO_2 , pour former du C_2S (silicate bicalcique)



- Al_2O_3 , pour former C_3A , une solution solide d'aluminate tricalcique



- Fe_2O_3 et Al_2O_3 pour former C_4AF (Aluminoferrite tricalcique)



Les réactions ont eu lieu à l'état solide.

La réaction de formation du C_2S est endothermique.

3^{ème} étape : Phase de cuisson

La température du cru monte progressivement jusqu'à 1450 °C. Une partie du cru fond pour donner naissance à la phase liquide (constituée de phase aluminate et ferrite), cette étape demande beaucoup d'énergie et elle est endothermique.

En parallèle, il y a la formation de C_3S (silicate tricalcique) : à partir de $1300^\circ C$, le C_2S se transforme en C_3S en réagissant avec une partie de CaO non combinée. La réaction est exothermique.



Remarque

Le terme C_3S et C_2S s'applique en réalité à des phases pures. Dans le cas présent, des éléments mineurs issus de la carrière (éléments de transition : titane, vanadium, chrome, manganèse, cobalt, ...) sont inclus dans les réseaux cristallins des silicates, qui portent en réalité les noms respectifs d'alite et de bélite. Il en est de même pour l'aluminate tricalcique (C_3A ou célite).

La cristallinité et la composition de ces phases influent sur leurs propriétés (couleur par exemple) et leur réactivité en présence de l'eau.

4^{ème} étape : Trempe

Le cru est refroidi brusquement de $1450^\circ C$ environ à $100^\circ C$ en quelques minutes. On obtient le clinker.

La trempe a pour but de figer les espèces minérales qui seraient instables à la température ambiante (le C_3S se décomposerait en $C_2S + CaO$).

Le C_2S cristallise sous sa forme allotropique β , seule phase capable de réagir avec l'eau, au lieu de la phase γ , qui est inerte.

Les aluminates, phase liquide dans le four (phase interstitielle), vont être « figés » en entourant les phases cristallines du clinker.

Le bilan énergétique théorique (en comptabilisant les réactions endothermiques et exothermiques) permet d'estimer la chaleur de formation du clinker à 422 Kcal/Kg . En réalité les besoins énergétiques sont de l'ordre de 814 Kcal/Kg dans le cas d'une voie sèche. [2]

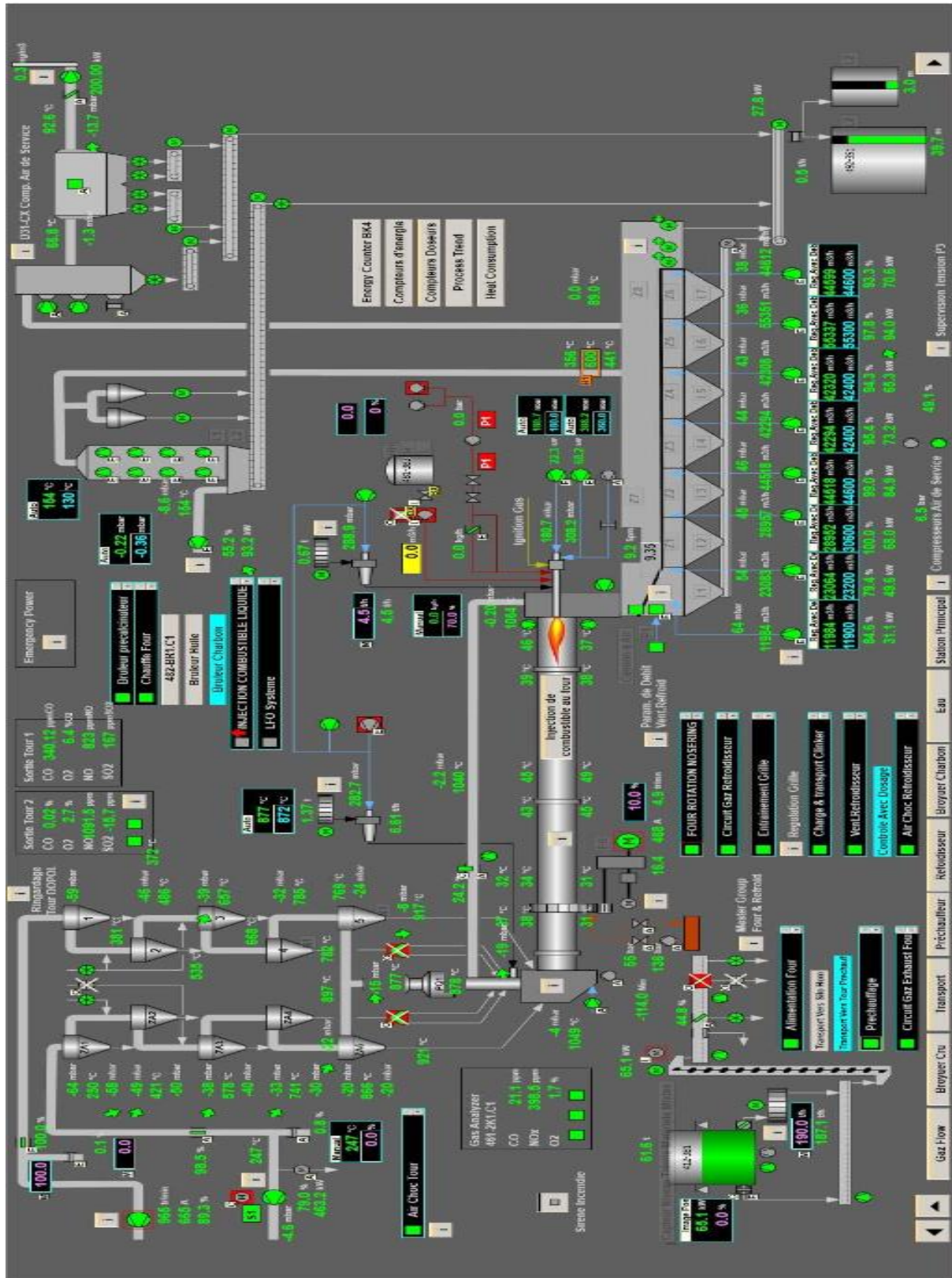


Figure 6: Processus de cuisson obtenu de la salle de contrôle à Holcim

3. Combustion

3.1. Définition

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison entre l'oxygène et une matière combustible. Cette réaction est globalement exothermique, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur.

Les combustibles sont multiples (gaz, pétrole, charbon, ...) mais ils ont un point commun : celui de contenir principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons multiples de carbones et d'hydrogènes. La composition des combustibles peut être représentées par la formule générique : $C H_y O_x$

Pour un atome de carbone (C), on trouve en moyenne "y" atomes d'hydrogène (H) et "x" atomes d'oxygène (O).

Combustible	Composition générique typique
Biomasse	$C H_{1.44} O_{0.66}$
Charbon (tourbe)	$C H_{1.2} O_{0.5}$
Charbon (anthracite)	$C H_{0.4} O_{0.02}$
Pétrole	$C H_{1.8}$
Gaz	$C H_{3.75} \dots C H_{3.95}$

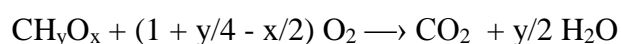
Tableau 2: Composition générique typique de quelques combustibles

Par exemple, le méthane (CH₄), est le constituant principal du gaz naturel (entre 83 % et 88 % en volume). Un litre de fuel, est, quant à lui, constitué d'environ 726 gr de carbone (C), 110 gr d'hydrogène (H) et 2 gr de soufre (S). De manière générale, on constate qu'il y a plus d'oxygène dans la biomasse que dans les combustibles fossiles.

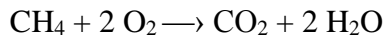
3.2. Produits de combustion

Deux produits principaux résulteront d'une combustion correcte : du dioxyde de carbone CO₂ et de l'eau H₂O.

En effet, si on considère la combustion "stoechiométrique" (c'est-à-dire contenant la quantité d'oxygène exacte pour faire réagir le combustible de manière parfaite), on obtient :



Par exemple, on obtient pour le méthane



C'est le CO₂ qui cause la pollution atmosphérique et le réchauffement de la planète. Il est principalement lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique.

Quelques ordres de grandeur du CO₂ produit.

Production de CO₂ lors de la combustion de	
1 m ³ de gaz	2 kg CO ₂ /m ³
1 litre de fuel	2,7 kg CO ₂ /litre

Tableau 3: Production de CO₂ Lors de la combustion du gaz et du fuel

Les fumées en sortie de la cheminée contiendront également de la vapeur d'eau (H₂O).

Production de H₂O lors de la combustion de	
1 m ³ de gaz	1,68 kg/m ³
1 litre de fuel	0,9 kg/litre

Tableau 4: Production de H₂O lors de la combustion du gaz et du fuel

L'oxygène provient de l'air atmosphérique et celui-ci contient également de l'azote (N), qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées. Cependant, sous certaines conditions de combustion, cela n'est pas le cas. En effet, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote NO, NO₂, N₂O, ... rassemblés sous la dénomination **NO_x**. Ceux-ci sont en partie responsables des pluies acides.

Les combustibles contiennent également des traces d'autres éléments dont la combustion est nocive pour l'environnement. Le principal est le soufre dont l'oxydation fournit du SO₂ et du SO₃. Ce dernier formera de l'acide sulfurique par combinaison avec de l'eau (par exemple, lors du contact entre les fumées et les nuages). C'est ce qui entraîne aussi la formation des pluies acides.

Si le gaz naturel ne contient pratiquement pas de soufre, le mazout et le charbon sont à ce niveau assez polluants et la réglementation vise à abaisser la teneur en soufre maximale autorisée.

En résumé, les produits de la combustion sont principalement constitués de CO_2 , H_2O , NO_x et de SO_x .

3.3. Quantité d'air nécessaire

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1 m^3 ou 1 litre de combustible dépend des caractéristiques de celui-ci. Mais il est bon d'avoir en tête un ordre de grandeur.

"La combustion 1 m^3 de gaz naturel ou d'1 litre de fuel requiert environ 10 m^3 d'air à 15°C "

A cette quantité "stoechiométrique", c'est-à-dire requise par l'équation chimique de la combustion, s'ajoute un léger excès d'air pour s'assurer que toutes les molécules de combustible soient bien en contact avec l'oxygène. En effet, il faut prévoir que certaines molécules d'oxygène vont traverser le foyer sans se lier au combustible. Dit autrement, il faut éviter d'avoir des zones, des poches, où le processus de combustion viendrait à manquer localement d'oxygène.

On travaille donc avec un excès d'air comburant qui s'élève par exemple pour la combustion du fuel à environ 20 %. Il faut donc prévoir 12 m^3 d'air pour brûler 1 litre de fuel. [3]

4. 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. [4]

4.1. Types de combustibles

4.1.1. Combustibles fossiles traditionnels

Les combustibles fossiles se composent de dépôts d'organismes vivants. La matière organique prend des siècles pour se former. Les combustibles fossiles se composent principalement de liaison carbone et hydrogène, ce sont des hydrocarbures. Il existe trois types de combustibles fossiles qui peuvent tous être utilisés pour fournir de l'énergie : charbon, huile et gaz naturel.

- Charbon

C'est un combustible fossile solide formé depuis des millions d'années par la décomposition de végétation. Quand les couches sont compactes et chauffées, les dépôts se transforment en charbon. Le charbon est assez abondant en comparaison des deux autres types de combustibles fossiles. Les ressources actuelles de charbon peuvent durer encore plus de 200 ans. Le charbon est généralement extrait des mines. Depuis le milieu du vingtième siècle, l'utilisation de charbon a doublé. Depuis 1996, ses applications ont encore diminué. Beaucoup de pays en développement dépendent du charbon pour la production d'énergie parce qu'ils n'ont pas assez de moyen pour le pétrole ou le gaz naturel. La chine et l'Inde sont les deux utilisateurs majeurs du charbon pour la production d'énergie.



Figure 7: Charbon

- Pétrole

C'est un combustible fossile liquide qui est formé des restes de microorganismes marins déposés dans les fonds marins. Après des millions d'années, les dépôts ont terminé dans les roches et les sédiments où le pétrole est emprisonné dans des petits espaces. Il peut être extrait part des plateformes de forage. Le pétrole est le combustible fossile le plus utilisé. Le pétrole

brut se compose de nombreux différents composés organiques qui sont transformés dans les procédés de raffinage.



Figure 8: Installation du raffinage du pétrole

- Gaz naturel

C'est un combustible fossile gazeux qui est polyvalent, abondant et relativement propre en comparaison au charbon et au pétrole. Comme le pétrole, il est formé par les restes de microorganismes marins. C'est un nouveau type de source d'énergie. La consommation en gaz naturel a maintenant dépassé celle du charbon dans les pays développés. Cependant, comme pour le pétrole, les gens ont peur que les approvisionnements en gaz naturel s'épuisent. Certains scientifiques ont prédit que ceci peut arriver vers le milieu du 21^{ème} siècle. Le gaz naturel se compose principalement de méthane (CH_4). [5]



Figure 9: Installation pour gaz naturel

4.1.2. Combustibles de substitution ou AFR

Le recyclage des déchets d'autres industries est facilité par les réactions chimiques qui se produisent entre les composants minéraux de ces déchets et les composants minéraux de la farine. Le clinker retient les éléments nocifs sous une forme combinée et solide.

Lors de l'utilisation de matériaux de substitution, des précautions particulières doivent être prises pour la protection de l'environnement au niveau des fumées. Une attention particulière doit aussi être portée à la qualité du clinker qui se charge en métaux lourds.

L'utilisation de matériaux de substitution nécessite la mise en place d'un procédé de contrôle particulier pour gérer l'introduction des métaux lourds dans les matières premières et leur distribution dans les fumées, les poussières et le clinker produit par le four. Le four de cimenterie est un incinérateur performant des déchets organiques tandis que les métaux lourds sont englobés dans les minéraux du clinker et encapsulés dans les hydrates produits dans les bétons. [6]

- Petcoke

Également connu sous le nom de coke de pétrole, le petcoke est obtenu à partir d'un processus de raffinage du pétrole et contient une teneur élevée de carbone. Il s'agit d'une forme de charbon solide produit par sa décomposition thermique et la polymérisation d'hydrocarbures liquides lourds dérivés du raffinage du pétrole brut. Il existe plusieurs variétés commerciales du coke de pétrole qui diffèrent par leurs caractéristiques physiques et chimiques, étant utilisées dans diverses applications industrielles, selon la méthode de production industrielle employée pour son obtention. [7]



Figure 10: Petcoke

- Grignons d'olives

Le grignon d'olive est un sous-produit de la production de l'huile d'olive, composé de morceaux de peau, pulpe et noyaux d'olive (40-45 % environ). Dépendant de la phase de pressage, le grignon dispose d'un taux d'huile plus ou moins élevé ou réduit. Il est disponible

en grandes quantités pendant toute l'année et sert de matière première pour l'extraction du noyau d'olive concassé.

Grâce à son aptitude pour la combustion, de plus en plus de sociétés (opérateurs de centrales électriques et thermiques, usines industrielles, cimenteries, etc.) ont décidé de l'utiliser comme combustible alternatif et soutenable. [8]



Figure 11: Grignons d'olives

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

4.2. Broyeur combustible

Afin d'avoir une énergie pour alimenter le four, le broyeur charbon sert à broyer le Petcoke et les grignons d'olives. On commence par vider Le Petcoke dans un stock, puis dans une trémie dont il sera fusionné avec les grignons d'olives.

Cette installation contient aussi un préchauffeur qui assure le chauffage des gaz qui aideront ensuite à préchauffer le coke du pétrole avant d'entrer dans le broyeur. Après le broyage, le combustible passe par un séparateur qui donne l'accès aux particules du combustible de finesse désirée et renvoie les particules moins fines afin de les broyer à nouveau. Par la suite, on stocke les combustibles broyés dans deux trémies, l'un sert comme alimentation au four et l'autre pour la combustion à l'aide des manches. Le broyeur charbon est muni d'un filtre pour les gaz et les renvoie au préchauffeur pour réchauffer le Petcoke.

5. Consommation calorifique

La consommation calorifique du four est l'énergie requise pour fabriquer du clinker, c'est la quantité de combustible introduite multiplié par son pouvoir calorifique inférieur et divisé par la quantité du clinker produite.

$$CCF (Mcal/T) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{PCI (Mcal/T)} * \text{Quantité de chaque combustible (T/h)}}{\text{Quantité de ck produite T/h}}$$

Pouvoir calorifique d'un combustible

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la chaleur que peut dégager la combustion complète d'une unité de combustible. Dans le milieu scientifique, on l'exprime souvent en kJ/kg de combustible. Néanmoins, suivant le domaine d'application, on peut l'exprimer dans d'autres unités plus pratiques, par exemple, en kWh/m³ pour le gaz ou kWh/litre pour le fuel.

Dans notre travail, nous allons exprimer la consommation calorifique en Mcal.

Dans les produits de la combustion, il y a de la vapeur d'eau, issue de la réaction de l'hydrogène du combustible. Dans certains appareils de combustion, l'eau reste à l'état de vapeur et s'échappe dans cet état vers la cheminée. La chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau est donc perdue. Au contraire, certains appareils permettent de condenser l'eau et de récupérer l'énergie dégagée par l'eau pendant son changement de phase. On pense typiquement aux chaudières dites à condensation qui utilisent ce procédé pour augmenter leur rendement.

Sur base de cette distinction, on définit deux pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI ou Hi), mesuré en conservant l'eau à l'état vapeur,
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS ou Hs), mesuré après avoir récupéré la chaleur de condensation de l'eau. [3]

Le pouvoir calorifique inférieur des combustibles (sans condensation):

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

Tableau 5: Exemples des pouvoirs calorifiques des combustibles

La comparaison de la consommation calorifique (en MJoules / Tck) entre 2014 et 2015 :

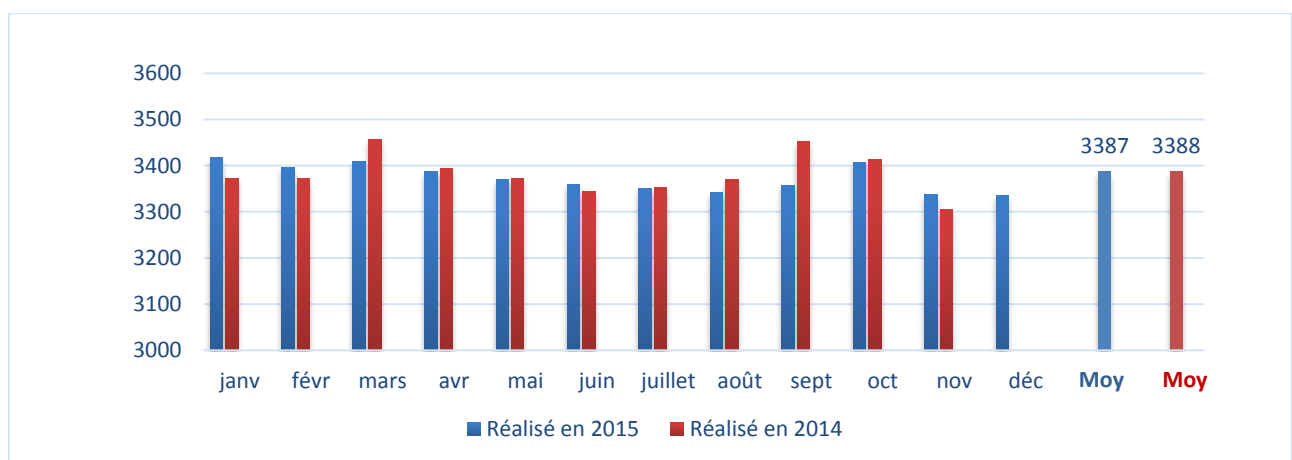


Figure 12: Graphe montrant la différence de la consommation calorifique entre 2014 et 2015

6. Paramètres à améliorer

Les paramètres sur lesquels nous allons baser notre étude sont les suivants :

- Nature du Petcoke : On étudie l'influence de chacun du Petcoke à basse teneur en soufre et celui à haute teneur en soufre sur la consommation calorifique.
- Finesse de combustible : Une finesse non maîtrisée nous donne des granulats de grande taille, ce qui diminue la surface de contact entre l'oxygène et le combustible, on a donc une combustion incomplète.
- Composition chimique du cru : Les matières premières pour fabriquer le ciment sont principalement le calcaire, ainsi que les oxydes de Fer, d'Aluminium et de silice. Les oxydes de Fer et d'aluminium constituent la phase liquide dans le cru, alors que l'oxyde de silice constitue la phase solide. Cette phase est difficile à cuire, du coup on doit agir de façon à optimiser le taux de SiO₂ dans le cru.

Les modules LSF, MS et MAF et PL.

- Qualité du broyage du Cru : La farine crue doit sortir du broyeur avec une finesse de 90 μm , si la taille des grains dépasse cette valeur, elle consomme plus d'énergie calorifique pour sa cuisson.
- Taux de la fluorine : La fluorine facilite la cuisson des matières premières, mais elle peut provoquer un collage de la matière si elle dépasse une valeur de 0,15%.
- Réglage de la tuyère :
 - Air primaire : L'air de transport des combustibles (liq et sol) influence la longueur et la largeur de la flamme.
 - Impulsion : L'impulsion est la quantité de mouvement axial apportée par l'air primaire. Une impulsion maîtrisée permet un raccourcissement de la flamme, un pincement de la flamme, une flamme plus dure et un meilleur mélange de l'air secondaire avec le combustible.
- Airs faux : Les airs faux sont des airs parasites qui se développent pendant la cuisson. L'objectif donc est de les minimiser afin d'augmenter la capacité calorifique du four, éviter le refroidissement des gaz dans la tour de préchauffage pour bien préchauffer la matière première.
- Isolant thermique : L'emplacement d'un isolant thermique peut diminuer les pertes de chaleur au niveau des parois du four.
- KilnMaster : La stabilité du four est un objectif visé par chaque cimenterie. Afin de réaliser ce but, on propose de mettre en travail un nouvel outil de contrôle de stabilité du four appelé KilnMaster.

7. Diagramme d'ishikawa

Le Diagramme d'Ishikawa, ou diagramme de causes et effets, ou diagramme en arêtes de poisson ou encore 5M, est un outil servant à résumer tous les causes aboutissant à un effet. A l'aide de cet outil, nous avons pu résumer tous les paramètres qui influencent sur la consommation calorifique, et ceci sous cinq aspects différents : Matière, main d'œuvre, méthode, matériel ou milieu.

La figure 13 présente le diagramme d'Ishikawa que nous avons réalisé.

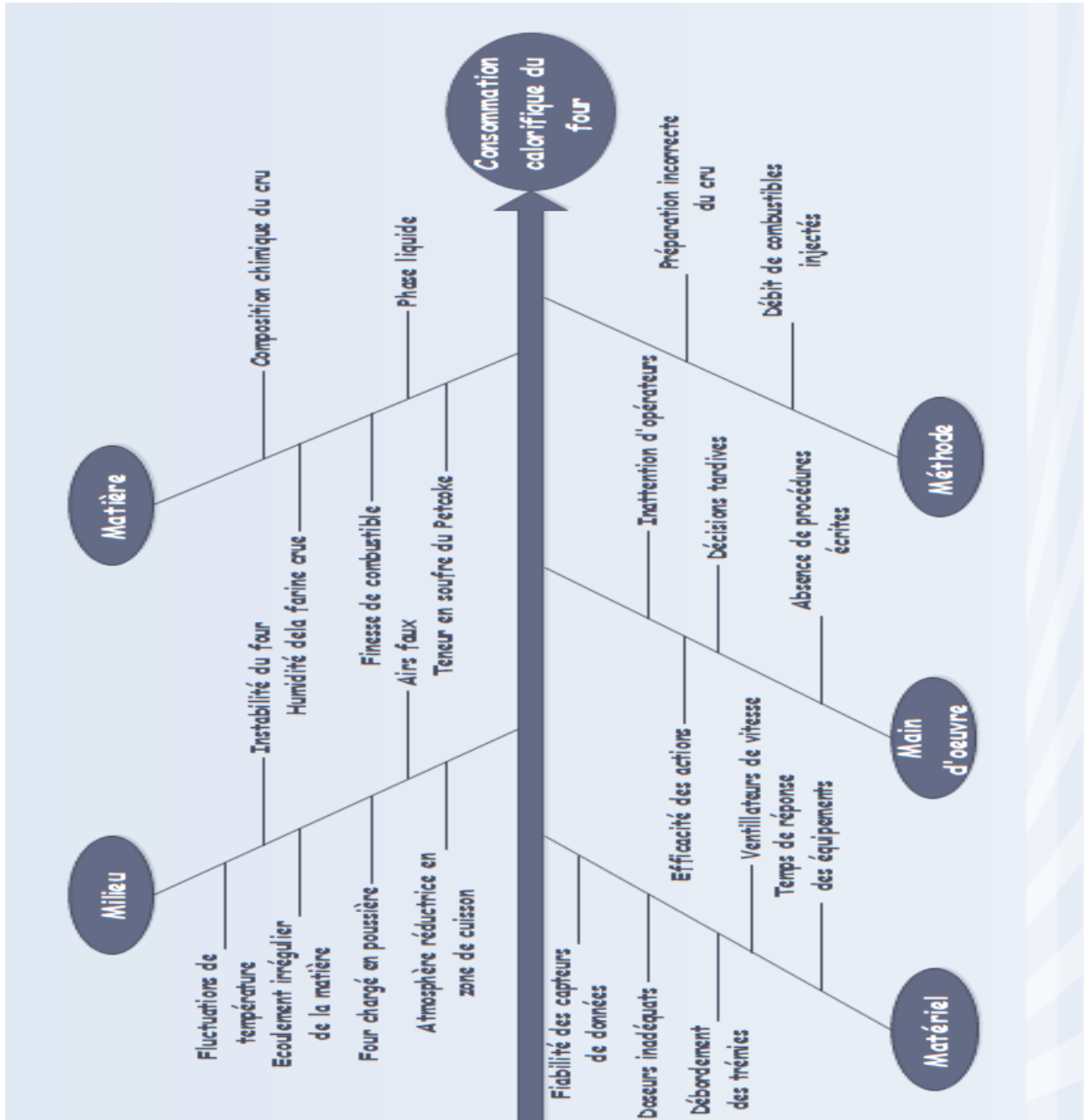


Figure 13: Diagramme Ishikawa

Chapitre 3

Résultats et Discussion

1. Combustible

1.1. Petcoke HTS/ Petcoke BTS

Le Petcoke est un sous-produit du raffinage du pétrole. Il est composé essentiellement de carbone et généralement de 2 à 7 % de soufre, de 5 à 15 % de matières volatiles et des métaux lourds. Il est utilisé comme combustible dans les cimenteries parce qu'il est moins coûteux et dispose d'un pouvoir calorifique plus élevé que celui du charbon.

Composition du petcoke

- Humidité totale : 10 %
- Cendre : 0,8 % max
- Matières volatiles : 8-14 %
- Souffre : 2-7 %
- Carbone fixé : 80 % min
- Pouvoir calorifique KJ/Kg : 7800-8300
- Pouvoir calorifique Kcal/Kg : 1866-1985
- HGI (Indice de broyabilité hardgrove) : 30-90

En raison de l'environnement thermique sévère dans lequel le petcoke est formé, sa teneur en matières volatiles est faible par rapport au charbon et d'autres combustibles fossiles, ceci le rend plus difficile à broyer et à entretenir pour la combustion.

On va étudier l'influence du petcoke à haute teneur en soufre (HTS) et celui à basse teneur en soufre (BTS) sur la consommation calorifique du four.

La figure n^o 14 présente une corrélation entre le Petcoke à BTS ainsi que celui à HTS avec la consommation calorifique en fonction des jours.

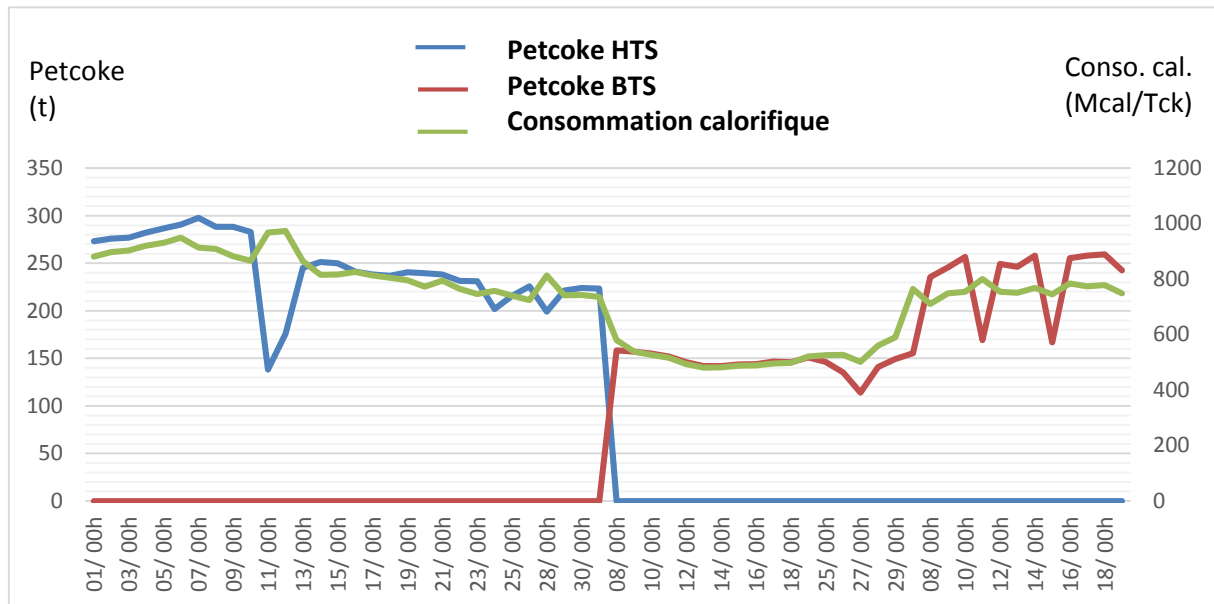


Figure 14: Influence de la quantité du soufre dans le Petcoke sur la consommation calorifique

Interprétation

D'après la figure ci-dessus, on assiste à une diminution de la consommation calorifique dès qu'on commence à utiliser le Petcoke à basse teneur en soufre comme combustible au lieu du Petcoke à haute teneur en soufre.

Pour mieux comprendre cette influence, on décide de comparer la composition chimique de deux échantillons du Petcoke, dont l'un est à haute teneur en soufre et l'autre à basse teneur en soufre.

Les tableaux n^o 6 et n^o 7 présentent des analyses effectuées sur des échantillons d'un Petcoke à BTS et d'un autre à HTS pour comparer leurs caractéristiques chimiques et calorifiques.

Analyses de Petcoke BTS		Petcoke reçu	Petcoke sec
Analyses primitives	% Humidité	7,02	---.---
	% Cendres	0,45	0,48
	% Matières volatiles	10,13	10,89
	% Carbone fixé	82,40	88,63
Analyses additionnelles	% Soufre	5,25	5,65
	Valeur calorifique Kcal/Kg	7823	8413
	Indice de broyabilité	38	

Tableau 6: Caractéristiques du Petcoke à basse teneur en soufre

Analyses de Petcoke HTS		Petcoke reçu	Petcoke sec
Analyses primitives	% Humidité	10,13	---.---
	% Cendres	0,43	0,48
	% Matières volatiles	9,14	10,17
	% Carbone fixé	80,30	89,35
Analyses additionnelles	% Soufre	5,85	6,51
	Valeur calorifique Kcal/Kg	7472	8314
	Indice de broyabilité	33	

Tableau 7: Caractéristiques du Petcoke à haute teneur en soufre

On note que la valeur calorifique du Petcoke BTS est plus élevée que celle du Petcoke à HTS. Ceci est due à la différence de pourcentage de carbone fixé entre ces deux types de Petcoke. La présence du soufre équivaut à la diminution de la teneur en carbone. Cette dernière est responsable sur le pouvoir calorifique d'un combustible. L'utilisation du Petcoke à BTS permet une diminution de la consommation calorifique du four avec une diminution de la consommation en combustible.

Toutefois, on doit vérifier que cette diminution en consommation calorifique n'influence pas la production en clinker. En autres termes, on doit s'assurer qu'une utilisation plus faible en combustible permet de conserver la même quantité de production en clinker.

La figure n° 15 présente une corrélation entre la consommation calorifique et la production du clinker.

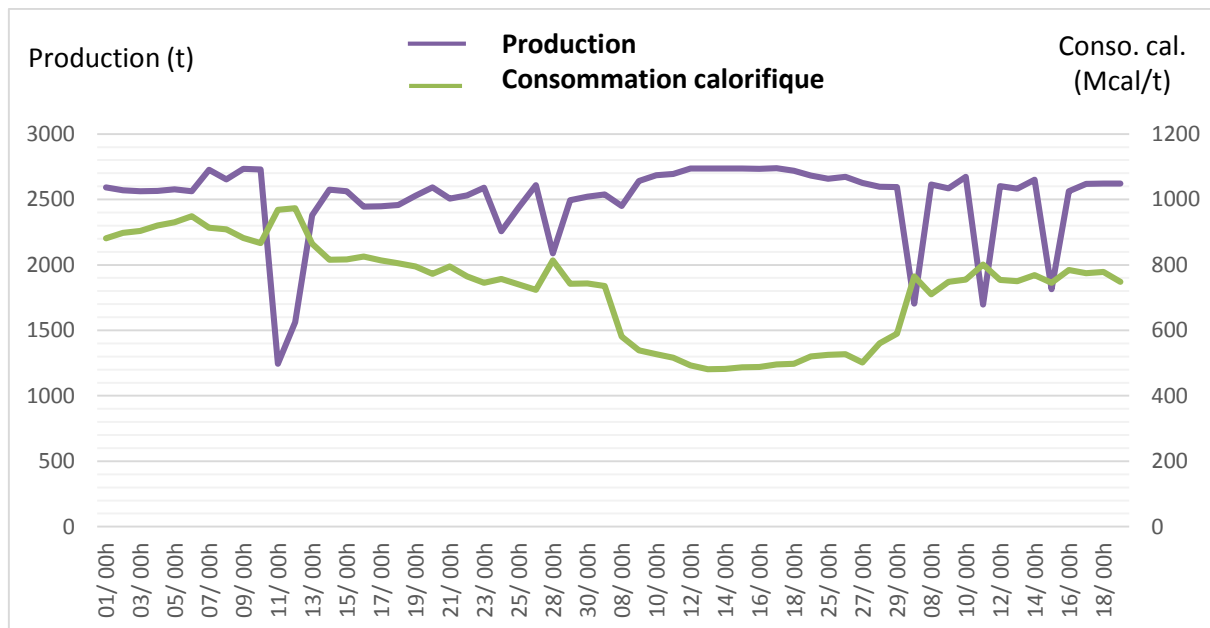


Figure 15: Effet de la diminution de la consommation calorifique sur la production en clinker

Interprétation

On remarque qu'on peut produire une même quantité du clinker voir même plus, en utilisant une quantité du petcoke BTS inférieure à celle du petcoke HTS. Donc la consommation en Petcoke dépend de la teneur en soufre dans le Petcoke.

Ce qui prouve que cette permutation du petcoke à haute teneur en soufre à celle à basse teneur en soufre nous permet de consommer moins de combustible et de diminuer la consommation calorifique du four.

1.2. Finesse du combustible

Les combustibles sont broyés à l'aide d'un broyeur horizontal à boulets. Holcim exige que les granulats des combustibles soient d'une taille de 90 µm. Si le broyage du combustible est non maîtrisé, on a donc des grains de grande taille ce qui diminue la surface de contact entre l'oxygène et le combustible alors une combustion incomplète.

Une combustion incomplète influe la quantité produite du clinker. La chaux ne peut être saturée et reste sous forme de chaux non combinée ou chaux libre qui est un paramètre essentiel pour juger la qualité et le degré de cuisson du clinker.

Une combustion incomplète influence aussi la stabilité du procédé de cuisson.

C'est un problème fréquemment rencontré qui cause le bouchage de la partie amont du four et de la partie inférieure du préchauffeur. Ce phénomène s'explique par la volatilisation en zone de cuisson des sulfates alcalins, suivie d'une ré-condensation en amont du four et en partie basse du préchauffeur qui conduit à des concrétions importantes et par la suite à un arrêt de four. Une amélioration de la combustion est nécessaire en ayant une finesse optimale du combustible.

La figure n^o 16 présente une corrélation entre la finesse de petcoke et la consommation calorifique.

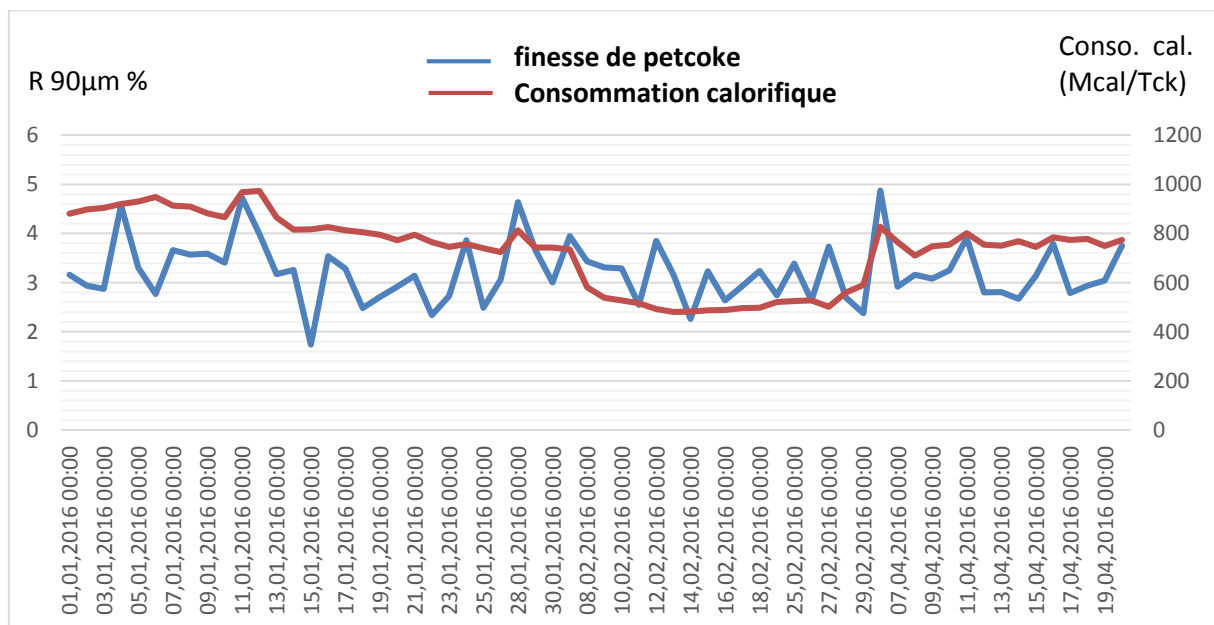


Figure 16: Influence de la finesse du petcoke sur la consommation calorifique

Interprétation

On remarque d'après la figure ci-dessus que la consommation calorifique augmente avec l'augmentation de la finesse du combustible. Une grande finesse du combustible diminue la surface de contact entre l'oxygène de l'air de combustion et les grains du combustible. Ce qui fait que les besoins calorifiques en combustible nécessaire pour la cuisson du clinker augmentent.

Il faut s'assurer d'un bon broyage de combustibles en approvisionnant un bon fonctionnement des séparateurs de vitesse à l'intérieur du broyeur de combustible, car ils

contrôlent le passage des grains de combustibles broyés ayant la finesse visée. Il faut aussi veiller à contrôler le tirage du combustible par les ventilateurs.

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

2. Composition chimique du cru

2.1. Modules du cru

2.1.1. Facteur de saturation en chaux -FSC-

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

$$FSC = \frac{\% \text{ CaO}}{2,8 * \% \text{ SiO}_2 + 1,18 * \% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,6 * \% \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

- Le F.S.C idéal est de 100 (avec petcoke comme combustible)

- Si le F.S.C est élevé (>> 100), on a :
 - Consommation calorifique élevée (cuisson difficile),
 - Consommation des briques
 - Augmentation de la teneur en chaux libre,
 - C₃S augmente (par conséquent résistance du ciment),
 - Chaleur d'hydratation augmente (Si C₃A augmente).

- Si le F.S.C est faible (<< 100), on obtient :
 - Cru facile à cuire
 - Faible consommation calorifique
 - Faible teneur en chaux libre (en raison de l'excès de la phase liquide dans la zone de cuisson)
 - Le croutage est lavé
 - Baisse de C₃S et augmentation de C₂S. Il y'a tendance à formation des boulets du clinker dans le four

- Clinker moins réactif

La figure n^o 17 présente une corrélation entre le module de facteur de saturation en chaux et la consommation calorifique du four.

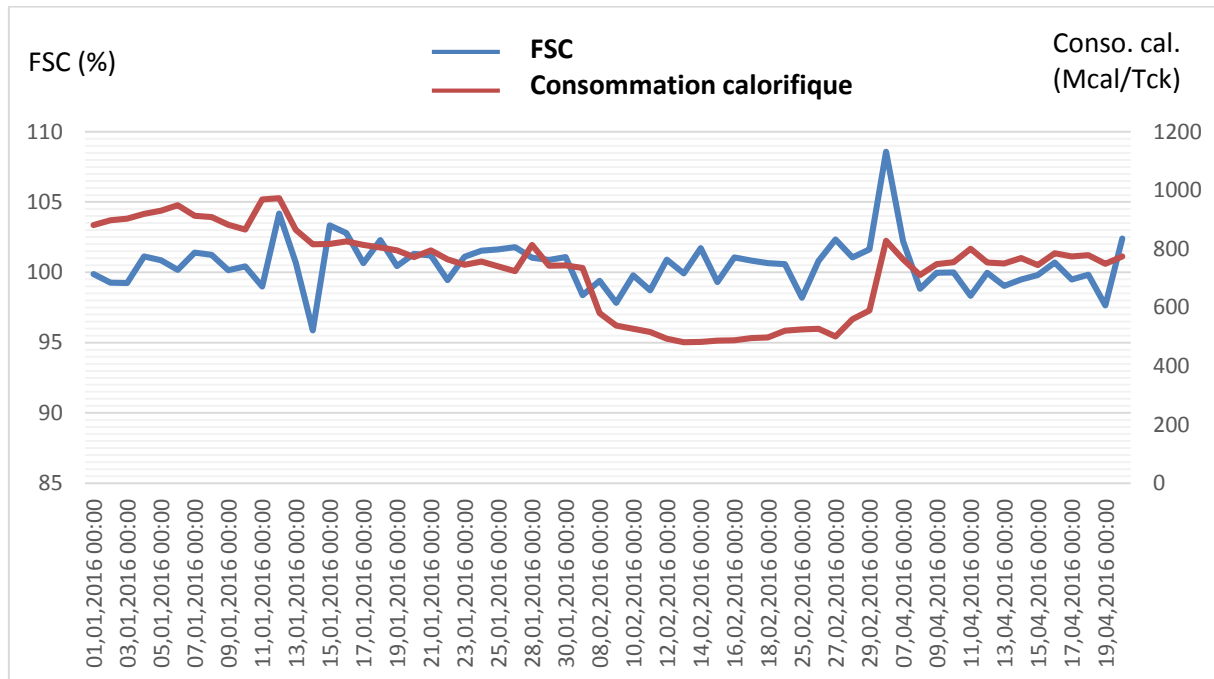


Figure 17: Influence du facteur de saturation en chaux sur la consommation calorifique

Interprétation

D'après la figure, lorsque le FSC dépasse la valeur de 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.

Il faut veiller à un dosage adéquat du calcaire dans le mélange pour ne pas dépasser la valeur optimale du facteur de saturation en chaux. Ce qui favorise les réactions chimiques entre la chaux et les oxydes de silice, d'aluminium et du fer.

2.1.2. Module silicique -MS-

Le module silicique mesure le taux de silice par rapport au taux d'oxydes de fer et d'aluminium ensemble.

Fe_2O_3 et Al_2O_3 sont des agents de fusion, c'est eux qui initient la formation de la phase liquide. Si leur taux est faible, le MS est élevé et la cuisson est difficile.

La silice passe surtout, lors de la clinkérisation dans les phases solides (alite et bélite), tandis que l'alumine et l'oxyde de fer passent dans la phase fondue.

$$MS = \frac{\% SiO_2}{\% Al_2O_3 + \% Fe_2O_3}$$

La figure n° 18 présente une corrélation entre le module silicique et la consommation calorifique.

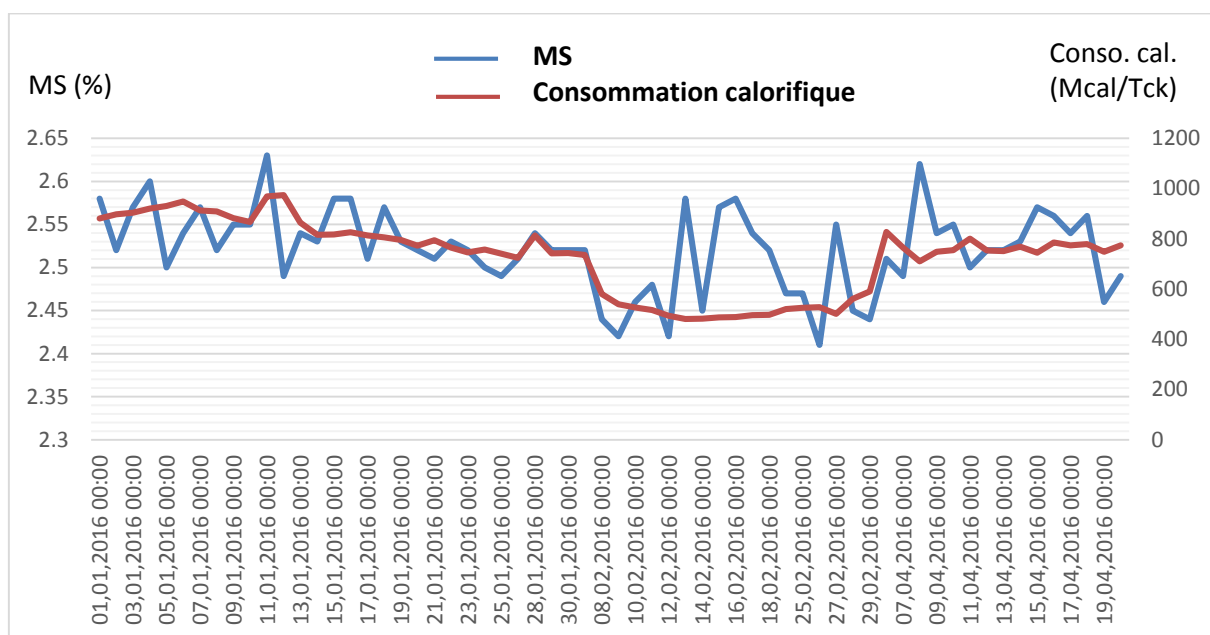


Figure 18: Influence du module silicique sur la consommation calorifique

Interprétation :

On assiste à une augmentation de la consommation calorifique du four lorsque le module silicique augmente. Un module silicique élevé indique que le taux de silice est élevé par rapport à celui d'oxydes d'aluminium et du fer. Ceci guidera à une difficulté de la cuisson de la silice supplémentaire et donc une augmentation de l'énergie thermique nécessaire pour la cuisson.

Il faut veiller à un dosage adéquat des matières premières ainsi que celui des matières de correction avant le broyage.

2.1.3. Module aluminoferrique -MAF-

Sa valeur caractérise la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Quand MAF augmente, la viscosité de la phase fluide augmente aussi, par conséquent, une difficulté à la cuisson d'où une grande consommation d'énergie.

$$MAF = \frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3}$$

- Quand A/F est faible, la viscosité de la phase fluide diminue ;
- Pour les A/F < 1.65 il ne se forme plus de phase C_3A ;
- Plus A/F est élevé Plus la proportion d'aluminate est grande plus la phase liquide est visqueuse et plus la température de clinkérisation sera élevée ;
- Les ciments ne contenant pas de C_3A possèdent une forte résistance chimique aux sulfates.

La figure n°= 19 présente une corrélation entre le module aluminoferrique et la consommation calorifique.

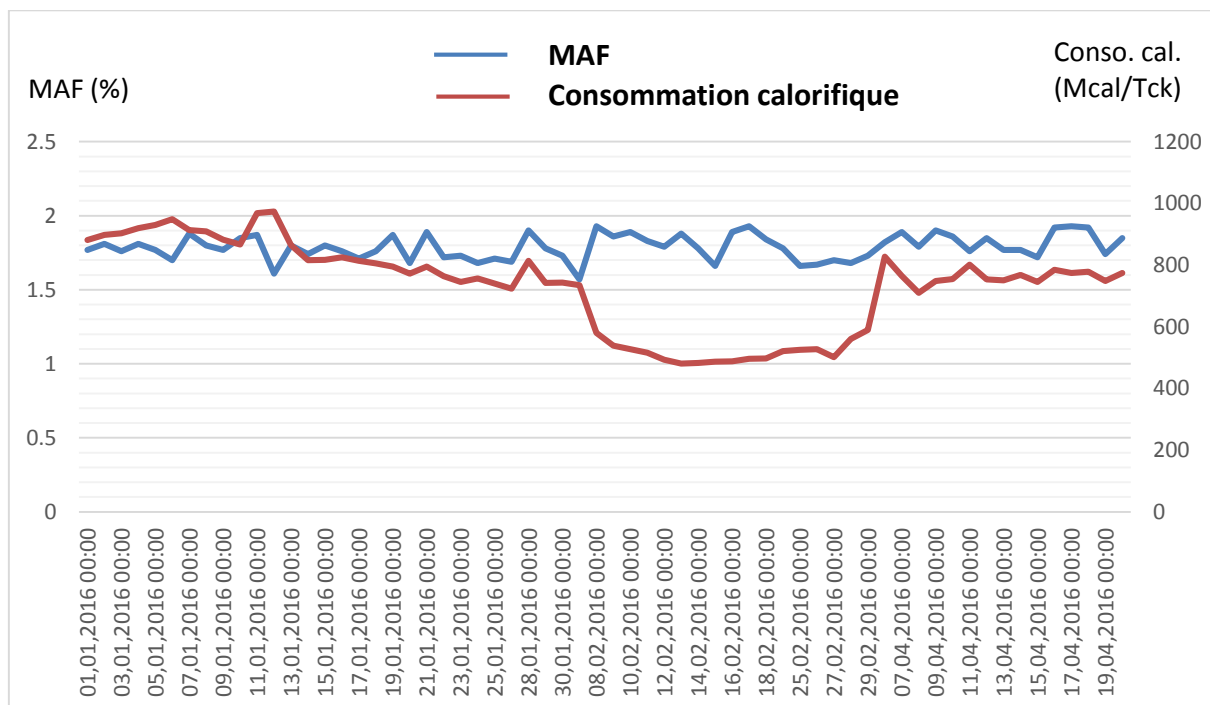


Figure 19: Influence du module aluminoferrique sur la consommation calorifique

Interprétation

D'après la figure, on remarque que le module alumino-ferrique est respecté. Du coup il n'a pas d'influence sur la consommation calorifique.

2.2. Finesse du cru

La matière première est réduite à l'aide d'un broyeur à galets pour obtenir la finesse souhaitée. La matière est broyée et séchée par des gaz qui l'emmènent vers un séparateur qui assure l'extraction de la matière suffisamment broyée.

On va évaluer l'influence de la finesse du cru sur la consommation calorifique.

La figure n° 20 présente une corrélation entre la finesse du cru et la consommation calorifique.

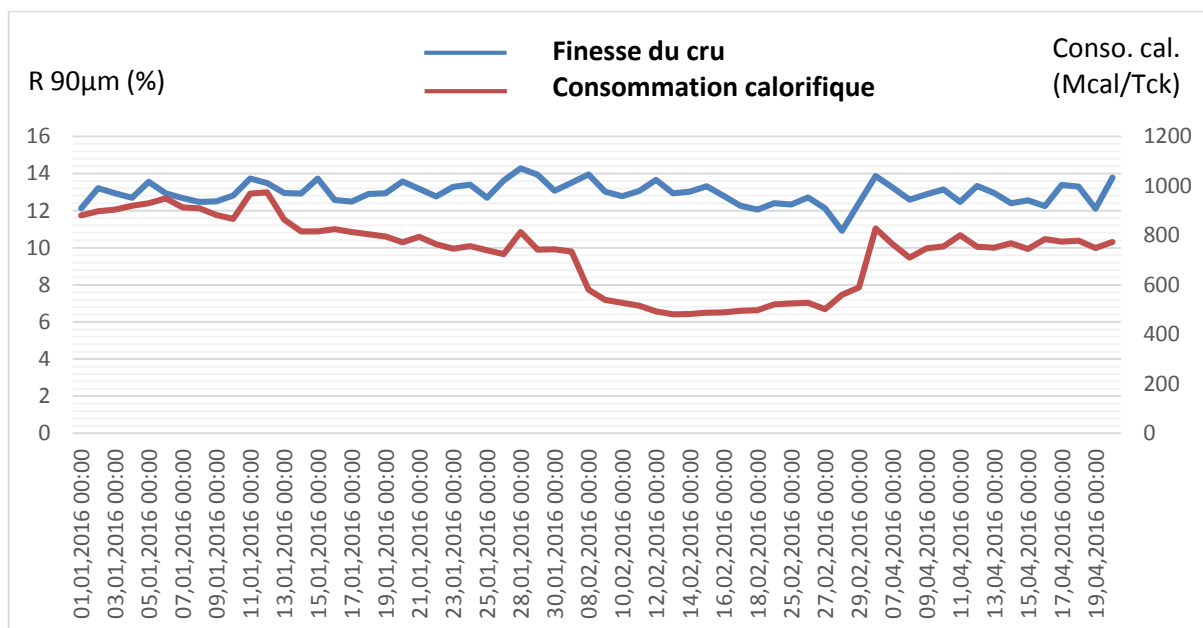


Figure 20: Influence de la finesse du cru sur la consommation calorifique

Interprétation

On remarque d'après la figure qu'il n'y a pas de fluctuation de la finesse du cru. On peut dire que ce paramètre est respecté et que le broyage du cru est adéquat.

2.3. Phase liquide

La phase liquide est formée essentiellement d'oxyde de fer et d'aluminium et d'autres composés chimiques à faibles quantités.

Quand le C_2S achève son développement vers environ $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, les sels de calcium de l'aluminium et du fer atteignent un degré de fusion. Au cœur de la zone de cuisson, 20 à 30 % du clinker sera sous forme liquide.

Dans ce magma liquide, le C_2S réagit avec la chaux résiduelle pour former du C_3S . C'est une réaction exothermique.

La farine commence à s'agglomérer et forme des boulettes avec la rotation du four dans la zone de cuisson, il y a une fusion partielle qui provoque aussi le croûtage. Cette fusion donne « la phase liquide ».

La formule pour calculer le pourcentage de la phase liquide est la suivante :

$$PL = 3 \text{ AL}_2\text{O}_3 + 2,25 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$$

- Si les fondants (Al_2O_3 et Fe_2O_3) sont insuffisants, la phase liquide l'est aussi, le clinker se forme difficilement, le croûtage aussi.
- Si les fondants sont élevés, le clinker et le croûtage se forment facilement, mais le MS sera faible.

La valeur du taux de la phase liquide doit être comprise entre 23 et 27%.

- Si $PL < 23$: Le four devient instable et le clinker tend à devenir pulvérulent, ce qui rend difficile la vision dans la zone de cuisson.
- Si $PL > 27$: L'excès de la phase liquide de faible viscosité et de densité élevée attaque les réfractaires, la charge semi-fondue glisse sur les réfractaires et détruit le croûtage. Le C_3S formé peut se décomposer diminuant ainsi la résistance du clinker.

La figure n°= 21 présente une corrélation entre la phase liquide et la consommation calorifique.

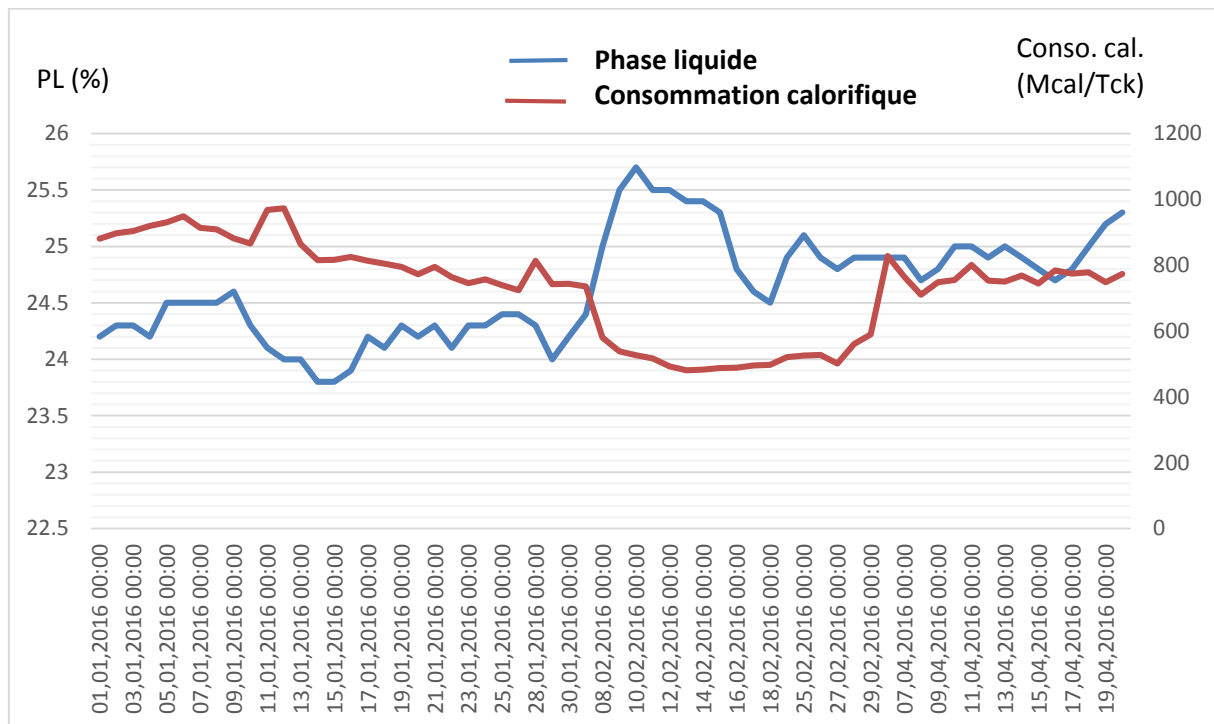


Figure 21: Effet du taux de la phase liquide sur la consommation calorifique

Interprétation

D'après la figure ci-dessus, on assiste à une diminution remarquable de la consommation calorifique du four dès l'augmentation du pourcentage de la phase liquide.

2.4. Relation entre le module silicique et la phase liquide

D'après les figures précédentes, on remarque qu'il y a une grande relation entre le taux de la phase solide du mélange (Silice) et celle de la phase liquide (Alumine et Oxyde de Fer).

On étudie la relation entre le module silicique et la phase liquide pour déceler l'influence de chacune sur l'autre.

La figure n°= 22 est une corrélation entre ces deux paramètres.

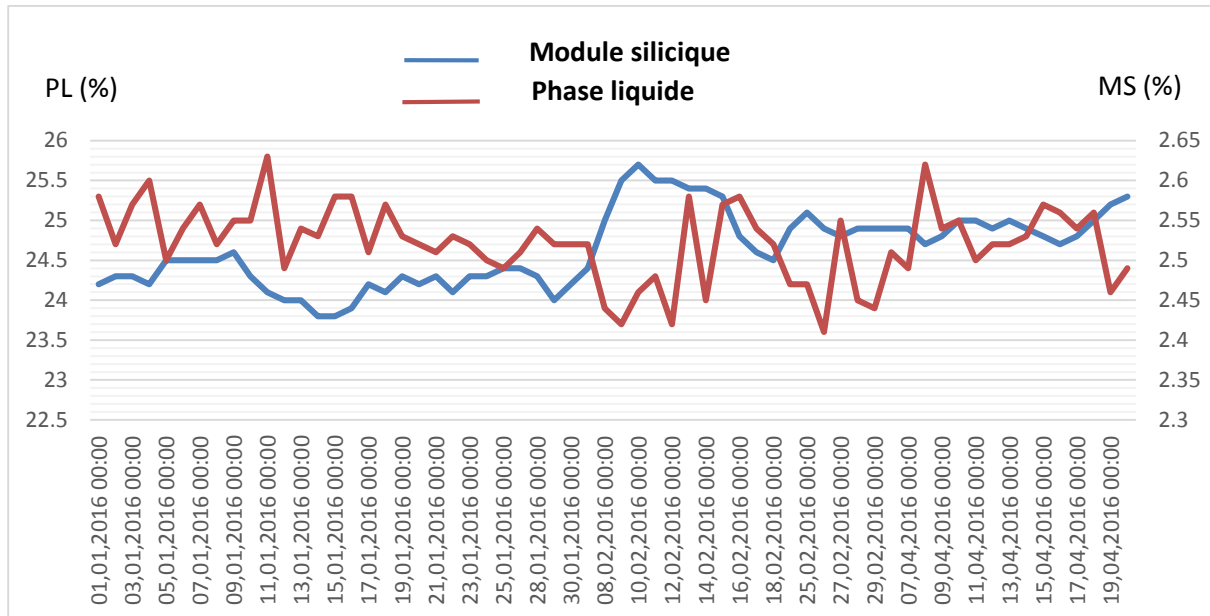


Figure 22: Effet du taux de la phase liquide sur le module silicique

Interprétation

La figure ci-dessus montre qu'il y a un impact inverse du module silicique sur la phase liquide. On remarque que l'augmentation de la phase liquide mène à une diminution du module silicique. Alors il faut trouver le réglage adéquat de ces deux paramètres afin d'assurer un bon processus de cuisson ainsi qu'une consommation calorifique optimale.

D'après la figure, la valeur de la phase liquide doit être aux alentours de 25%, alors que celle du module silicique doit être proche de 2,5.

3. Fluorine

La fluorine CaF_2 joue le rôle d'un minéralisateur. Elle facilite la cuisson du cru ce qui permet d'alléger la consommation calorifique du four de cuisson.

Le dosage de la fluorine doit être de 0,15%.

- Lorsque le taux de la fluorine n'atteint pas 0,15%, on assiste à une cuisson difficile du cru ainsi qu'une volatilisation des sulfates alcalins et des chlorures, ceci cause un collage au niveau des cyclones ce qui peut mener à un arrêt du four.
- Lorsque le taux de la fluorine dépasse 0,15%, la consommation diminue certes grâce à la facilité de cuisson du cru, mais il y a un collage de la matière sur les réfractaires du four.

On doit optimiser le taux de la fluorine pour son prix élevé et pour ne pas nuire au processus de cuisson. Plusieurs arrêts du four sont causés par le collage de la matière à cause de la fluorine sur les parois des cyclones.

On évalue la variation de la consommation calorifique en fonction du taux de la fluorine pour déterminer le taux optimal à ajouter.

La figure n°= 23 est une corrélation entre la consommation calorifique et le taux de fluorine.

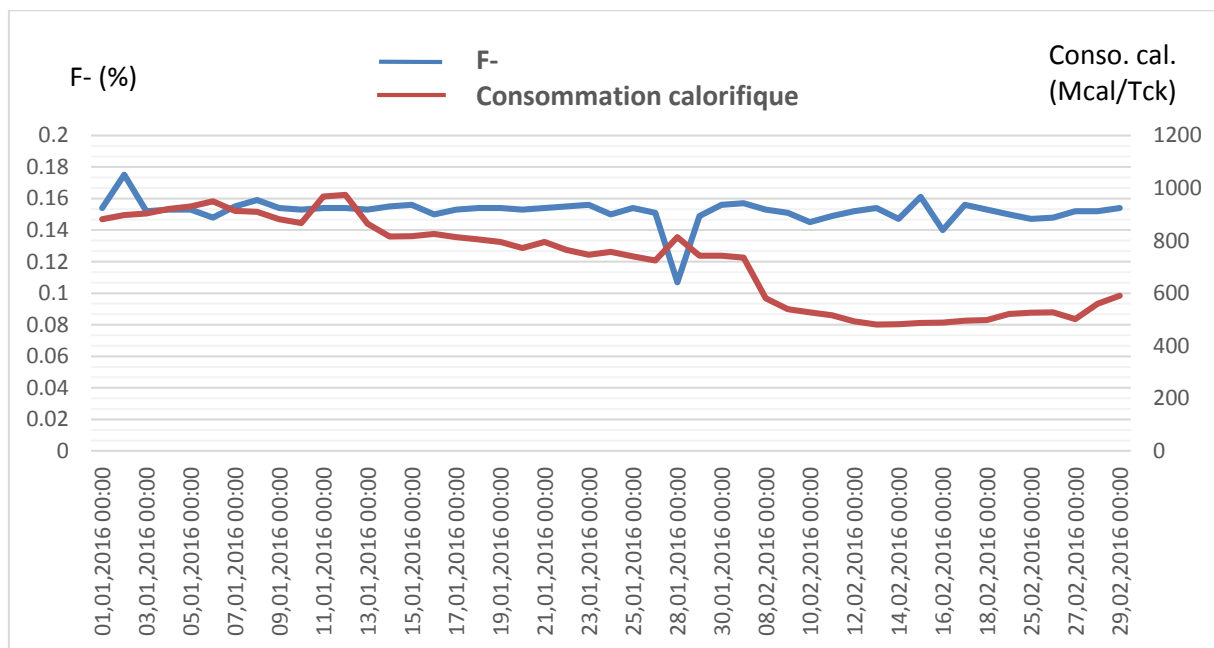


Figure 23: Effet de la fluorine sur la consommation calorifique

Interprétation

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la consommation calorifique a légèrement augmenté quand le taux de la fluorine était de 0,107%. On doit veiller à un dosage régulier de la fluorine pour garder une consommation calorifique optimale.

4. Airs faux

Les airs faux sont les infiltrations d'air dans les installations d'une cimenterie. Généralement, on détecte la présence d'airs faux quand la consommation en énergie pour chauffer les gaz dans les conduites est augmentée, ainsi quand la puissance des ventilateurs est grande et lorsque le taux d'oxygène calculée par l'équipe du laboratoire publique d'essais et d'études dépasse les valeurs standards.

En ce qui concerne le taux d'oxygène :

Intervalle du bon fonctionnement : $2,5\% < O_2 < 4\%$

- Si le taux de O_2 dépasse 4%, c'est une indication d'une présence de fuites dans les conduites qui laissent passer l'air faux.

L'augmentation du taux d'oxygène nécessite plus d'énergie calorifique pour assurer la combustion. Ceci est une perte de combustibles pour Holcim.

- Si le taux de O_2 est inférieur à 2,5%, il y aura une insuffisance de comburant pour assurer une combustion complète.

Afin d'éviter ce problème, il faut veiller à régler l'étanchéité des équipements tel que les cyclones de la tour du préchauffage, les portes de visite, et les joints des conduites.

Une fois on assiste à une présence d'airs faux, on soude les trous où il y a des fuites d'air, on change les joints ou bien on bouche les entrées d'air par du béton.

5. Réglage de la tuyère

5.1. Air axial

Permet d'obtenir une flamme dure à forte impulsion. La section du passage des rainures améliore la pénétration de l'air secondaire dans la flamme alors que la section du passage annulaire permet de limiter la divergence de la flamme. La proportion entre la section des rainures et la section annulaire est ajustée par la modification de la position de l'embout axial.

Réglage de l'air axial

L'axial peut être réglé en déplaçant le tube intérieur du circuit axial d'environ 20 mm au maximum. Le réglage de la position axiale modifie le profil de température de flamme grâce à la variation du débit de l'air axial.

- En position ouvert (position de l'indicateur sur 0) : La section annulaire de l'embout est à son minimum, le débit axial est notablement réduit et la pénétration de l'air secondaire dans la flamme est augmentée entraînant une racine de flamme plus chaude.
- En position fermé (position de l'indicateur sur 35) : La section annulaire de l'embout est à son maximum, le débit d'air primaire est maximum et le diamètre de la flamme à son minimum, pour un réglage donné de l'embout radial.

Ces réglages permettent d'obtenir une racine de flamme plus chaude ou plus froide tout en gardant une pression d'air sensiblement constante à l'entrée du brûleur dans le cas d'un fonctionnement avec un ventilateur centrifuge d'air primaire. La vanne d'air axial est toujours ouverte.

- Un réglage de la pression d'air primaire trop faible (en fermant la vanne d'air axial) va générer une flamme longue et molle qui est habituellement inadaptée à un bon fonctionnement du four.
- Une racine de flamme trop chaude (embout axial totalement avancé, un broyage trop fin du combustible solide pulvérisé, une température d'air secondaire trop chaude ...) réduit la durée de vie des embouts de la tuyère.

5.2. Air radial

Permet la modification de la composante rotationnelle (swirl). Avec un rotationnel plus grand, la flamme devient plus large et le mélange entre le combustible et l'air plus rapide.

Réglage de l'air radial

L'air radial contrôle l'effet rotationnel de la flamme ou Swirl. Quand l'air radial est réduit, l'effet rotationnel est réduit et la flamme devient plus mince. Quand l'air radial (débit et/ou pression) augmente, l'effet rotationnel augmente et la flamme devient plus large.

L'effet rotationnel peut être réglé :

- Soit en agissant sur la pression d'air radial (faire baisser la pression fera baisser le débit et la vitesse d'injection). La pression d'air radial peut être baissée jusqu'à 80 mbar en utilisant la vanne d'air radial.
- En modifiant la section de l'embout radial en avançant ou en reculant le tube intérieur radial (réduire la section va faire décroître le débit à pression constante). A l'inverse de l'embout axial, l'embout radial est fermé (section min) en position 20 et ouvert (section maxi) en position 0.

Les formes de la flamme selon les réglages de la tuyère

Cas usuel

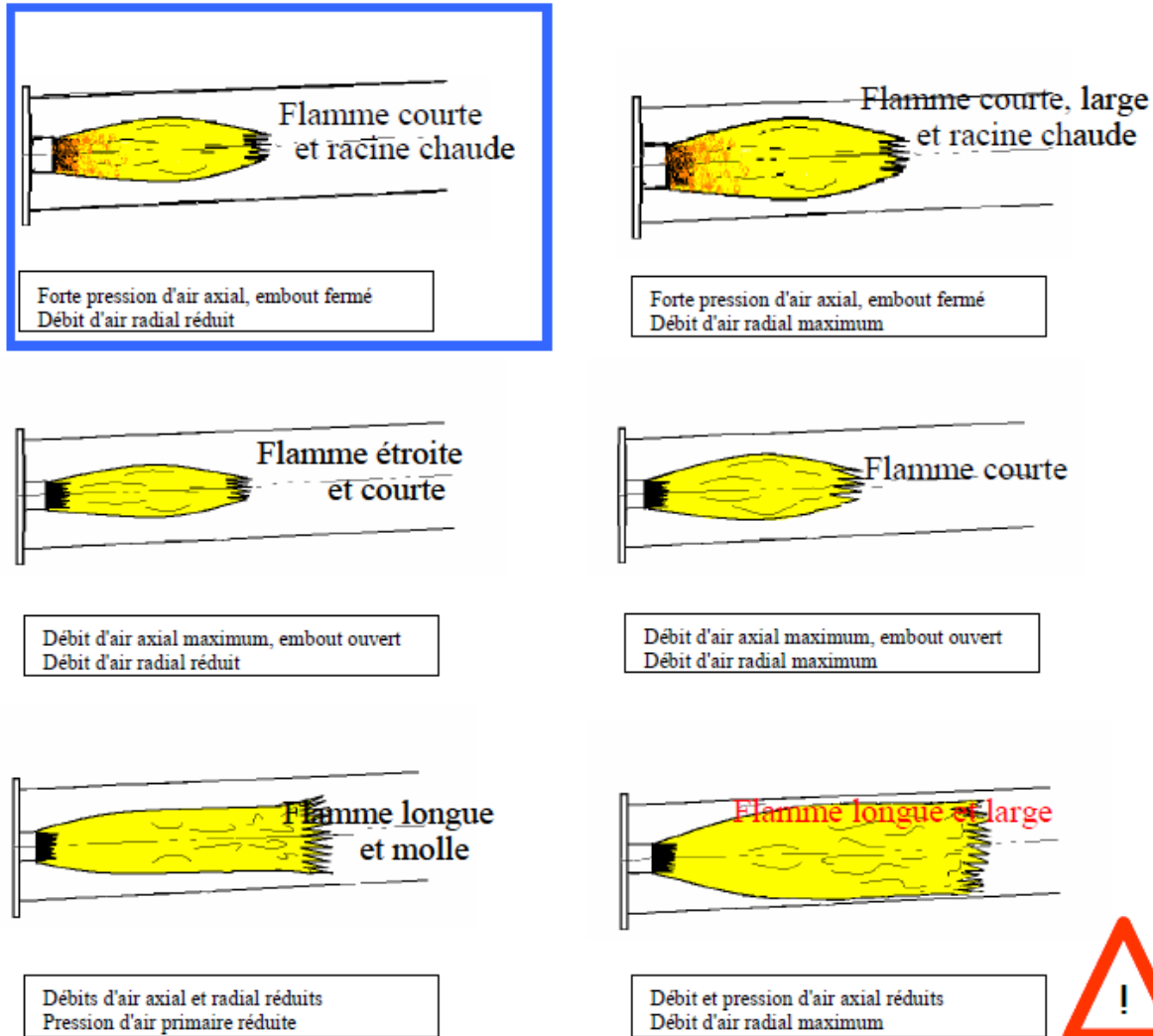


Figure 24: Formes de flamme selon le réglage de la tuyère

Les paramètres de la tuyère sont :

- Débit de l'air axial : 3547 Nm³/h
- Débit de l'air radial : 1670 Nm³/h
- Débit de l'air central : 745 Nm³/h
- Impulsion : 12,5 N/MW
- Pourcentage d'air primaire : 17,3%

Notre objectif est d'avoir une impulsion de 11 N/MW, et un pourcentage d'air primaire compris entre 13 et 15%.

On propose de diminuer le débit de l'air primaire de 15 % :

- Débit de l'air axial : 3015 Nm³/h
- Débit de l'air radial : 1419,5 Nm³/h
- Débit de l'air central : 633,25 Nm³/h
- Impulsion : 10,6 N/MW
- Pourcentage d'air primaire : 14,76 %

6. Isolant thermique

Il existe des pertes de chaleur au niveau du four soit par conduction ou par convection. Alors on se propose de trouver un matériau qui supporte une température élevée et qui peut fléchir une grande quantité de chaleur vers l'intérieur du four.

Considérée comme étant plutôt bon marché, elle est inoffensive pour l'Homme. La laine de verre reste très utilisée dans le domaine du bâtiment et permet par ailleurs de lutter contre les incendies puisqu'elle est incombustible. Poreuse et très élastique, elle est disponible sous plusieurs formes (panneaux, rouleaux) et peut être employée pour isoler certaines pièces de la maison et ce du sol au plafond.

La laine de verre est parmi les meilleurs des isolants thermiques qui a un coefficient de conduction $\lambda_{LV} = 0,04 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$. L'épaisseur de l'isolant thermique joue un rôle important dans la diminution des pertes thermiques, lorsque on augmente l'épaisseur on diminuera automatiquement plus des pertes. La laine de verre peut supporter des températures allant jusqu'à 600 °C d'environ.

On propose de mettre cet isolant thermique entre l'acier et les briques réfractaires.



Figure 25: Laine de verre

7. KilnMaster

Le KilnMaster est un outil conçu pour le génie de procédés afin de garder un fonctionnement normalisé, stable et optimisé du four. Il permet de suivre une stratégie simple du fonctionnement du four, tout en maintenant :

- Des températures d'air tertiaire et d'air secondaire plus élevées et plus stables
- Des fluctuations de la température du précalcinateur inférieures
- Une faible consommation thermique
- Une variabilité inférieure de la chaux libre

Les gains du KilnMaster sont réparties sur les différentes étapes du processus de cuisson.

7.1. Précalcinateur

- On doit contrôler :
 - Un degré de calcination stable : Température d'air secondaire et tertiaire, énergie de combustion, alimentation du four et le débit de gaz
 - Indicateurs à court terme : Température du gaz du dernier cyclone et la température du cru
 - Alimentation du coke : Calibre et vitesse régulière
 - Dosage d'AFR
 - Mesure de la température des cyclones
 - Stabilité du précalcinateur : Température du précalcinateur, teneur en chaux libre

- Le KilnMaster permet d'assurer :
 - Une meilleure stabilité du précalcinateur ce qui permet de maintenir une stabilité du four
 - Fiabilité de mesures de température
 - Dosage adéquat du fuel
 - Diminution de la consommation calorifique

7.2. Refroidisseur

Le refroidisseur doit être capable de récupérer le maximum d'énergie thermique à partir du clinker chaud et de refroidir le clinker à une température de 100 °C pour assurer une facilité du stockage et du broyage de ce dernier.

- On doit contrôler :
 - La stabilité du clinker sur les pistes
 - La distribution égale d'air de refroidissement
 - La hauteur du lit du clinker
 - Le débit d'air de refroidissement (Pression, température, et vitesse)
 - La pression du capot de four
 - Les pertes d'air du ventilateur du refroidissement
 - Récupération d'air stable
- Le KilnMaster permet de :
 - Diminuer la consommation calorifique
 - Un temps de refroidissement stable
 - Récupération d'énergie stable (Rapport d'air/ck stable)
 - Diminuer les pertes d'air de refroidissement
 - Moins d'émissions de poussière

7.3. La zone de cuisson

- Il faut contrôler :
 - La température de la zone de cuisson BZT
 - La température du four
 - Le pourcentage de phase liquide
 - La vitesse de rotation du four
 - Les émissions du four NOx

- Le temps résiduel de la matière : Précalcinateur 20-35 minutes et Préchauffage 35 à 60 minutes, degré du remplissage 4-8 %
- La combustion et la cuisson
 - L'état de la flamme
- Le transport de combustibles
- La qualité du clinker
- La quantité d'air primaire
- Le KilnMaster permet de maintenir :
 - Une température stable de la flamme pour minimiser les émissions NOx, la volatilité du fuel et du CO
 - Une vitesse stable du four : Transfert de chaleur exact au sein du four, une bonne réactivité du clinker et moins de volatilité du SO₃
 - Une diminution le taux de chaux libre
 - Une combustion complète
 - Pas de formation d'anneaux
 - Une augmentation la durée de vie de briques réfractaires
 - Une meilleure qualité du clinker
 - Une stabilité et forme idéale de la flamme (Chaude, stable, symétrique, étroite, courte)
 - Un meilleur broyage du Petcoke

Synthèse

Action	Optimisation de l'énergie calorifique de la ligne du cuisson
Etape du processus	Four de cuisson du clinker
Problématique	Consommation calorifique
Bénéfices	Economie en énergie calorifique du four
Description	On a réalisé une étude de chaque paramètre à optimiser et sa relation avec l'énergie calorifique, une étude sur les airs faux et le réglage de la tuyère, l'effet du KilnMaster sur le contrôle du processus et l'influence d'un isolant thermique sur la diminution des pertes au niveau du four.
Procédure	<p>Assurer une bonne combustion :</p> <ul style="list-style-type: none">- Une granulométrie fine du combustible permet un meilleur contact entre l'oxygène et le combustible, les combustibles brûlent plus rapidement dans l'air.- Une permutation du Petcoke à HTS par un Petcoke à BTS ayant un pouvoir calorifique plus élevé assure une meilleure combustion.- Il faut régler le débit d'alimentation du combustible pour régulariser le taux de combustible introduit.- Réglage de la tuyère adéquat pour avoir une forme idéale de la flamme de combustion. <p>Une bonne préparation du cru :</p> <ul style="list-style-type: none">- Elle nécessite un dosage bien déterminé de la matière première, un bon broyage et un bon préchauffage dans la tour EVS.- Un contrôle régulier de la composition de la matière par le calcul de modules du cru. <p>Détection des airs faux :</p> <ul style="list-style-type: none">- Un suivi du taux de l'oxygène présent dans le four, et supervision des conduites pour déceler la présence de fuites.

	<p>Diminuer les pertes au niveau du four :</p> <ul style="list-style-type: none">- Proposer un isolant thermique permettant de diminuer les pertes et gagner au niveau de la consommation calorifique.
Résultats obtenus	<ul style="list-style-type: none">- Facilité de cuisson à l'aide de l'augmentation de la phase liquide dans le mélange- Stabilité du four grâce à KilnMaster qui permet de minimiser les arrêts du four- Moins de collage au niveau des cyclones dû à l'introduction d'un petcoke à BTS qui a une faible teneur en matières volatiles.- Diminution de l'énergie calorifique à une valeur de 775 Mcal/Tck

Conclusion générale

Notre travail a pu mettre en évidence l'influence des caractéristiques chimiques de la matière première sur la consommation énergétique à travers l'analyse des données pendant la période du stage, ce qui nous a permis de confirmer une corrélation entre les modules du cru LSF et MS, une corrélation entre la finesse du cru et la consommation calorifique. Ainsi qu'une influence de la composition chimique du combustible et de sa finesse sur cette dernière. Nous constatons aussi une diminution de la consommation calorifique en augmentant le taux de la phase liquide.

Le réglage de la tuyère influant sur la forme de la flamme de combustion a un impact non négligeable sur la consommation calorifique ainsi que l'impact des entrées de l'air faux. L'emplacement d'un isolant thermique permet une diminution des pertes de chaleur au niveau des parois du four ce qui mène à une diminution de la consommation calorifique.

L'outil de contrôle du processus du four KilnMaster joue un rôle important pour assurer la stabilité du four et éviter tout arrêt possible. Il permet aussi de veiller à la régularité des paramètres de chaque étape du processus de cuisson, commençant par la tour de préchauffage jusqu'au refroidisseur.

Références

- [1] Claude Augé, Paul Augé, Larousse Universel 2, 1949.
- [2] Cristophe Charron, L'industrie du ciment-Données générales, 2008.
- [3] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10981>
- [4] <http://www.scaek.dz/documents/14.pdf>
- [5] Mckinney, M.L. and Schoch, R.M., Environmental Science, Systems and Solutions. Troisième édition, University of tennessee, Knoxville USA 2003.
- [6] <http://www.scaek.dz/documents/16.pdf>
- [7] <http://www.garciamunte.com/fr/product/petcoke/>
- [8] http://www.biomass-center.com/grignon_olive.htm



Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Name : HALHOUSSINE Chaimae

Title: Optimizing the calorific consumption of the kiln at Holcim

Abstract

The concern of any cement plant is to optimize its heat energy consumption. Indeed, making clinker temperature is very high (1450 ° C), which requires a very large amount of energy and which is very expensive for cement plants. Several parameters influence the caloric consumption: The sulfur content of petcoke, its finesse, quality of raw grinding and its chemical composition, the setting of the burner controlling the shape of the combustion flame, false air entrance as well as the heat loss through the kiln walls. Other problems exist, which urges the stuff to stop the kiln and that requires a lot of heat energy when restarting it. We must therefore maintain optimum cooking parameters while preserving a good quality of the final product and reducing energy costs.

After examining each of the above parameters, we find that the use of petcoke with low sulfur content decreases remarkably caloric consumption. Otherwise, a failure of a mastered grinding fuel increases this consumption. The composition of the raw's alumina and iron oxide (liquid phase) decreases caloric consumption. We also suggest reducing the false air ratio by welding leaks in pipes with concrete, and by decreasing the primary air flow designed for combustion. The location of an insulating material "glass wool" between the kiln's steel and refractory bricks can reduce heat loss in the kiln's walls and finally the installation of the cooking process control tool "KilnMaster" ensures a more stable kiln which reduces its frequent stops.

Keywords: Calorific consumption, making clinker, petcoke, raw, liquid phase, false air, burner, glass wool, KilnMaster.





Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom : HALHOUSSINE Chaimae

Titre : Optimisation de l'énergie calorifique du four de la cuisson

Résumé

Le souci de toute cimenterie est d'optimiser sa consommation en énergie calorifique. En effet, la température de cuisson du clinker est très haute (1450 °C), ce qui demande une quantité d'énergie très importante et coûte cher aux cimenteries. Plusieurs paramètres influencent la consommation calorifique : La teneur en soufre du petcoke, sa finesse, la qualité du broyage du cru et sa composition chimique, le réglage de la tuyère contrôlant la forme de la flamme de combustion, les entrées d'air faux et les pertes de chaleur au niveau des parois du four. D'autres problèmes existent, causant des arrêts du four et coûtant énormément d'énergie calorifique lors du redémarrage du four. Il faut donc maintenir les paramètres de cuisson optimums en préservant une bonne qualité du produit final et en allégeant la facture énergétique.

Après l'examen de chacun des paramètres précédents, on trouve que l'utilisation du petcoke à basse teneur en soufre diminue remarquablement la consommation calorifique. Le broyage non maîtrisé du combustible augmente cette consommation. La composition du cru en alumine et oxyde de fer (phase liquide) diminue la consommation calorifique. On propose aussi de diminuer les entrées des airs faux par un soudage des fuites dans les conduites, ainsi qu'une diminution du débit d'air primaire conçu pour la combustion. L'emplacement d'un isolant thermique « laine de verre » entre l'acier du four et les briques réfractaires peut diminuer les pertes de chaleur au niveau des parois du four et finalement l'installation de l'outil de contrôle du processus de cuisson « KilnMaster » assure un fonctionnement plus stable du four, donc réduit les arrêts fréquents de ce dernier.

Mots clés : Consommation calorifique, cuisson, petcoke, cru, phase liquide, airs faux, réglage de la tuyère, laine de verre, KilnMaster.

