

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

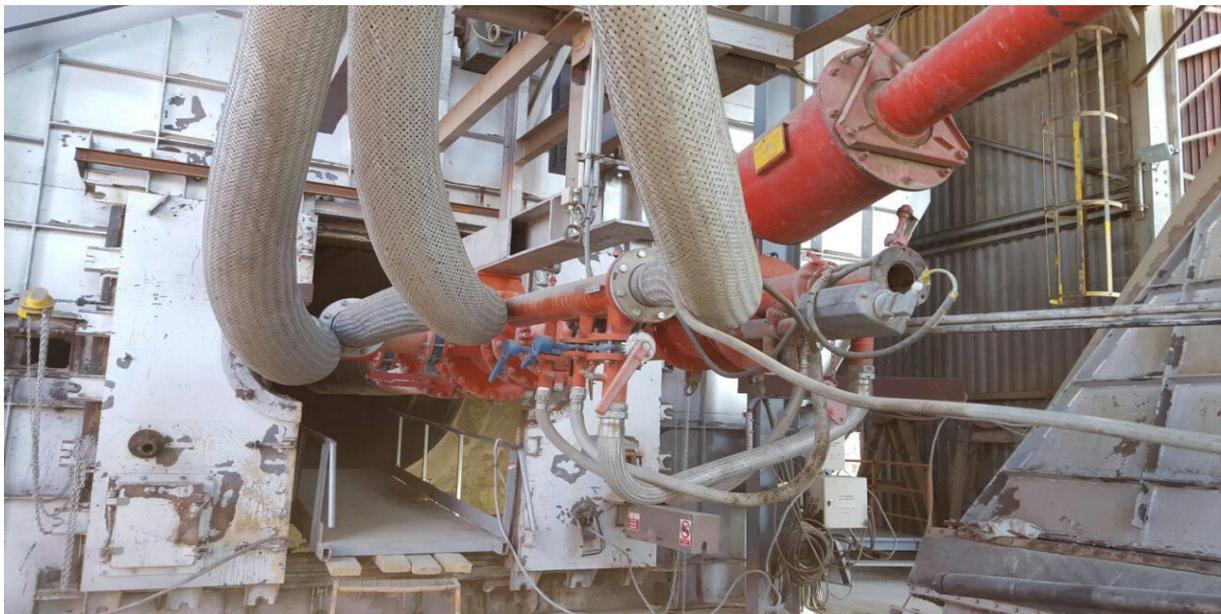


Figure 5: Tuyère de combustion d'Holcim Ras El Ma

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.

$\text{CaCO}_3 \text{ ----> CaO} + \text{CO}_2$ 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]

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	$C H_{3.75} \dots C H_{3.95}$

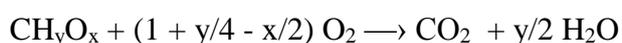
Tableau 2: Composition générique typique de quelques combustibles

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.

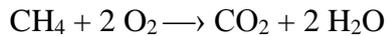
3.2. Produits de combustion

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 :

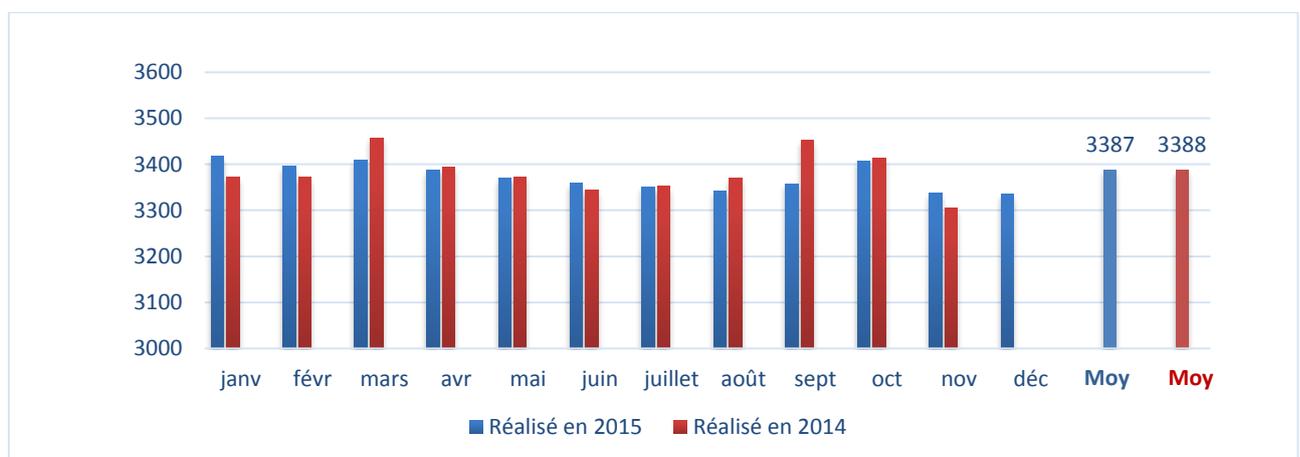


Figure 12: Graphe montrant la différence de la consommation calorifique entre 2014 et 2015

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.

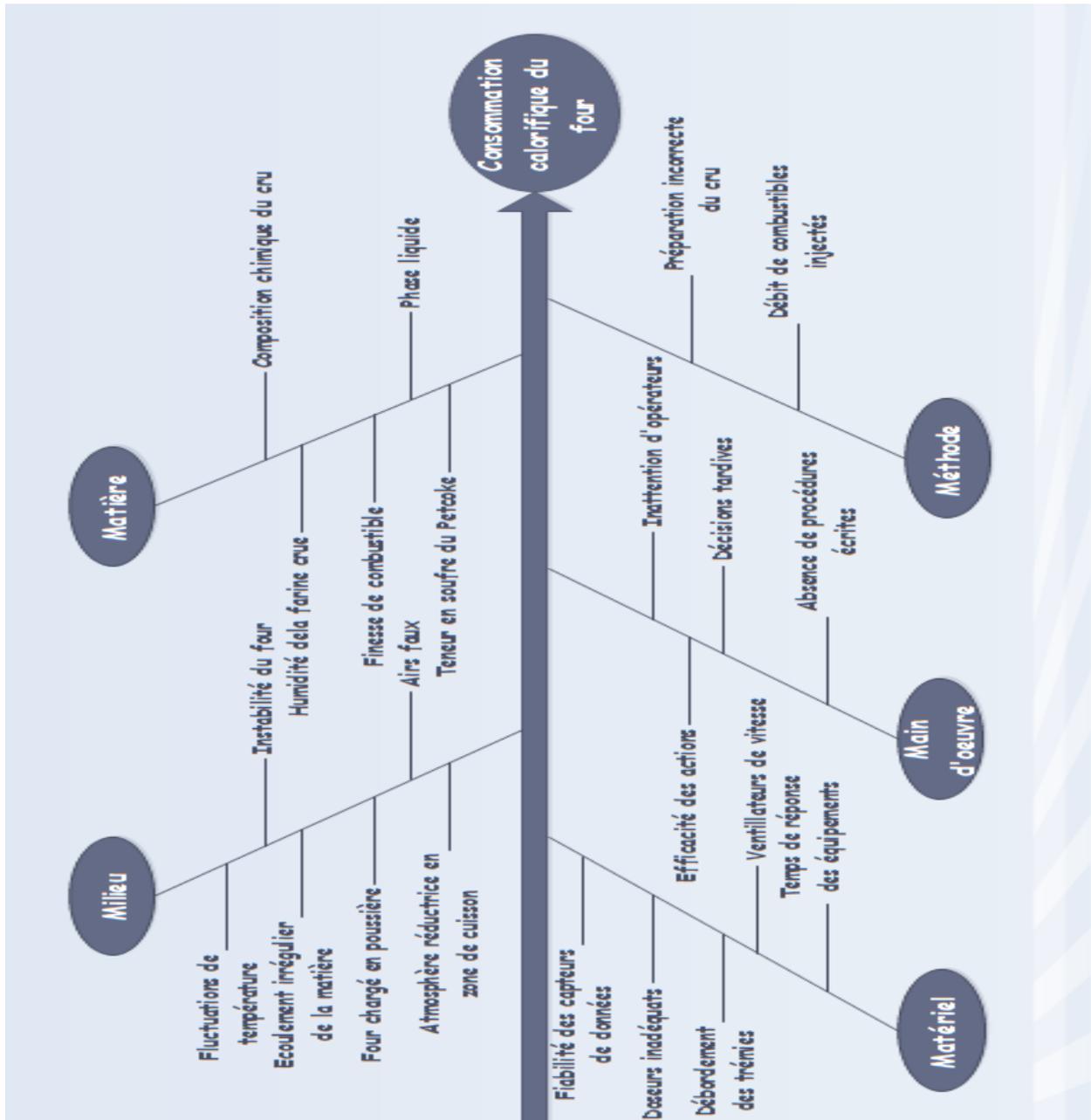


Figure 13: Diagramme Ishikawa