

## Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil.....	3
I.Présentation de LafargeHolcim MAROC .....	4
I.1. Historique de LafargeHolcim Maroc .....	4
I.2. Localisation.....	5
I.3. Cadre juridique.....	5
I.4. Présentation de LafargeHolcim Ras El MA .....	6
I.5. Situation géographique et accessibilité .....	7
I.6. Activité.....	7
I.7. Organigramme .....	8
Chapitre II : Processus de fabrication du ciment.....	9
Introduction .....	10
I. Généralités sur le ciment.....	10
I.1. Définition .....	10
I.2. Procédé de fabrication du ciment.....	10
I.3. Extraction des matières premières .....	11
I.4. Concassage.....	11
I.5. Séchage et broyage.....	12
I.6. Dépoussiérage .....	12
I.7. Homogénéisation .....	12
I.8. Cuisson.....	13
I.9. Du clinker aux ciments.....	14
I.10. Expéditions.....	15
I.11. Salle de contrôle.....	15
I.12. Contrôle de qualité .....	15
II.Présentation de la ligne de cuisson .....	17
II.1. Tour de préchauffage .....	17
II.2. Four rotatif .....	17
II.3. Tuyère .....	18
II.4. Refroidisseur.....	20
1. Processus de cuisson .....	20
Chapitre III : Etude de l'installation actuelle de dosage.....	24
I. Combustibles.....	25
I.1. Petcoke .....	25
I.2. Présentation des AFR.....	26
• I.2.1. Types d'AFR.....	27

*Master Génie des matériaux et procédés*  
*Projet de fin d'études*

---

I.2.1.1. Pneus usagés .....	27
I.2.1.2. Grignons d'olives .....	28
I.2.1.3. Fluffs .....	29
I.2.2 Effet des AFR sur la qualité du clinker .....	30
I.2.4. Effet de la composition chimique des AFR sur le procédé .....	30
I.3. Broyeur combustible .....	32
II. Etude de l'installation actuelle.....	32
II.1. Extracteur.....	32
II.2. Doseur à bande .....	33
II.3. Trémie SINEX .....	34
II.4. Bande transporteuse.....	35
II.5. Double clapet et shut off gate .....	35
II.6. Précalcinateur .....	36
III. Problématique.....	37
III.1. Etat des lieux (petcoke seul), établissement des scénarios et comparaison avec l'approche actuelle .....	39
III.2. Utilisation FMO .....	39
III.3. Comparaison de la consommation spécifique d'énergie thermique (STEC) des 4 scénarios .....	40
III.4. Comparaison de l'impact des 3 scénarios sur la consommation calorifique .....	41
III.5. Evaluation financière des configurations proposées : estimation du coût en MAD/GJ et MAD/t ck.....	42
III.6. Comparaison des émission en gaz.....	43
IV. Paramètres à améliorer .....	45
IV.1. Modules du cru.....	46
IV.2. Finesse du cru.....	47
IV.3. Phase liquide .....	48
IV.4. Fluorine .....	49
IV.5. Airs faux.....	49
IV.6. Précalcinateur.....	50
IV.7. Refroidisseur .....	50
IV.8. Amélioration du circuit des AFR.....	51
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	53

## Liste des figures

Figure 1: Localisation des différentes sociétés LafargeHolcim dans le monde .....	5
Figure 2: Usine LafargeHolcim de Ras El Ma .....	7
Figure 3: Organigramme de LafargeHolcim Ras El Ma .....	8
Figure 4: Processus de concassage .....	12
Figure 5: Préparation du cru .....	13
Figure 6: Procédé de la cuisson de la farine .....	14
Figure 7: Procédé du broyage du clinker.....	15
Figure 8: Expédition.....	15
Figure 9: Schéma des différentes étapes de fabrication du ciment.....	16
Figure 10: Processus de cuisson obtenu par la salle de contrôle à LafargeHolcim.....	23
Figure 11: Structure d'un pneu .....	28
Figure 12: Influence du chlore et du soufre sur le procédé .....	31
Figure 13: Schéma de l'extracteur .....	33
Figure 14: Schéma du doseur à bande.....	34
Figure 15: Schéma de l'installation SINEX.....	35
Figure 16 : Modification du circuit par remplacement du double clapet par un sas rotatif .....	51
Figure 17 : Les deux types de sas rotatifs.....	52

## Liste des tableaux

Tableau 1: Composition chimique des pneus.....	28
Tableau 2: Caractéristiques des grignons d'olives.....	29
Tableau 3: Caractéristiques des fluffs .....	30
Tableau 4: Ratio matière de chaque élément et la consommation calorifique de chaque scénario .....	40
Tableau 5: Impact des combustibles sur la consommation calorifique .....	42
Tableau 6: Coût des combustibles injectés au cours de la ligne de cuisson estimé par l'outil FMO.....	43
Tableau 7: Comparaison des émissions en gaz des trois scénarios comparés au petcoke seul .....	44

## Liste des abréviations

**AFR** : Alternative Fuel and Raw material ou Combustible Alternatif et Matières premières.

**CIMA** : Cimenterie Maghrébine.

**ODI** : L'Office pour le Développement Industriel.

**SNMC** : Société Nationale des Matériaux de Construction.

**CIOR** : Cimenterie de l'Oriental.

**BPE** : Béton Prêt à l'Emploi.

**NF** : Norme Française.

**CPJ** : Ciment Portland composé avec Ajouts.

**CPA** : Ciment Portland Artificiel.

**PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieure.

**T Ck** : Tonne de Clinker

**PAF** : Perte Au Feu.

**BZT** : Température de zone de cuisson.

**BET** : Température amont four.

**PC** : Pouvoir Calorifique.

**FSC** : Facteur de Saturation en Chaux.

**MS** : Module Silicique.

**MAF** : Module Alumino Ferrique.

**STEC** : Specific Thermal Energy Consumption ou Consommation Spécifique d'Énergie Thermique.

**PL** : Phase Liquide.

## *Introduction générale*

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

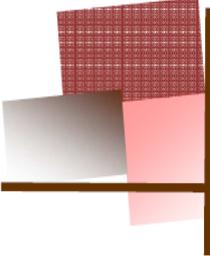
L'industrie cimentière s'est engagée au cours de ces dernières années dans un important investissement ayant pour but d'augmenter et diversifier la production afin de satisfaire la demande croissante du marché. Pour répondre à cette demande qui est en augmentation continue, il est indispensable de maîtriser le processus de fabrication du ciment et d'adopter les nouvelles technologies dans ce domaine pour mieux se positionner dans un marché en perpétuelle concurrence.

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 émis par le 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 1450 °C environ), les minerais fondent partiellement et réagissent pour former le clinker, qui deviendra ensuite du ciment en additionnant des ajouts correctifs.

C'est dans ce cadre, que s'inscrit ce projet ayant lieu au département de production de la société LafargeHolcim-REM et qui a pour objectif principal, l'optimisation du mélange de combustibles à injecter dans le four de cuisson. Cette étape présente une étape fondamentale dans le processus de fabrication du ciment

Notre rapport est subdivisé selon le plan suivant :

- Aperçu sur la société LafargeHolcim
- Présentation du procédé de fabrication
- Etude de l'installation de co-Processing des AFR
- Problématique
- Solutions et propositions
- Conclusion



Chapitre I : Présentation de l'organisme  
d'accueil

---

## **I. Présentation de LafargeHolcimMAROC**

LafargeHolcim est un groupe suisse fondé en 1912, il occupe la position de leader dans les produits des matériaux de construction pour un usage plus varié. Présent dans 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats, tels que le sable et graviers, ainsi que du béton, il compte 90000 employés à travers le monde.

LafargeHolcim a été créé en 1976 par l'office du développement industriel (ODI) avec le concours de la banque Islamique sous le nom de CIOR (les ciments de l'oriental). Sa première cimenterie a été construite à OUJDA et elle a démarré en 1979 avec une capacité de production de 12 millions de tonnes par an.

En 1993, LafargeHolcim a mis en service sa deuxième cimenterie à Ras El Ma dans la région de Fès, lieu du stage, avec une capacité de production 60000 t/ans pour répondre aux besoins croissants du marché national. En outre, deux centres de broyage et de distribution ont été ouverts à Fès et à Casablanca dont la capacité totale est de 800000 t/ans.

Le 15 avril 2002 CIOR devient HOLCIM (Maroc), ce changement affirme son apparence au groupe International HOLCIM, groupe suisse leader dans le domaine de fabrication du ciment, du béton et du granulat. La nouvelle vision adoptée par la société permet de tenir ses engagements vis-à-vis de ses clients, de développer le système de formation de ses collaborations et de prendre en considération les problèmes liés à l'environnement.

LafargeHolcim 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.

### **I.1. Historique de LafargeHolcim Maroc**

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

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

**1979** : Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.

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

**1993** : Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an.

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

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

**2004** : Extension de la cimenterie de Fès.

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

**2008** : Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès.

**2010** : Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settât et de la plateforme de traitement de déchets d'Ecoval

**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.

## I.2. Localisation

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

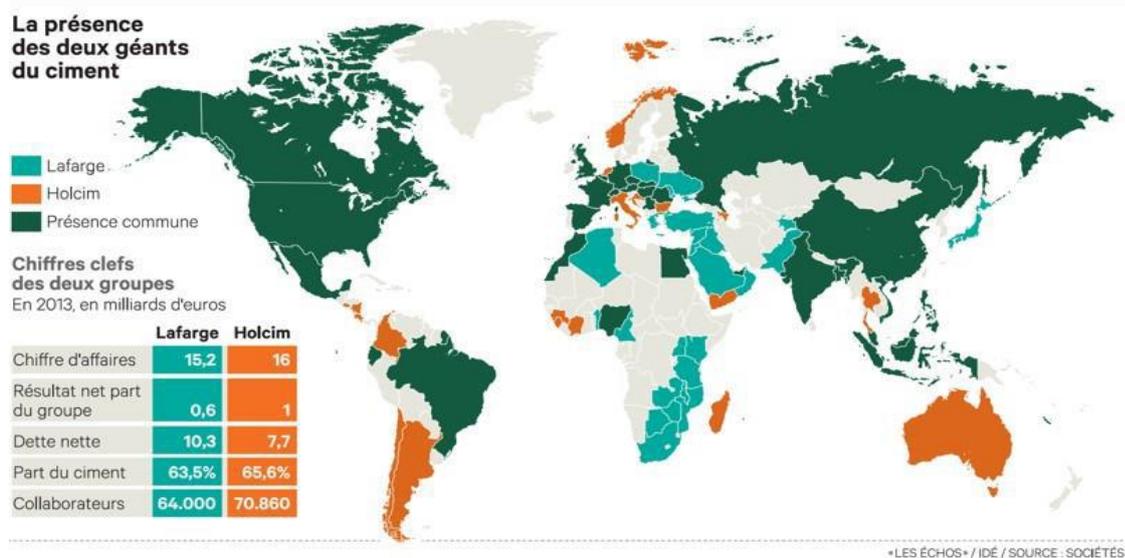


Figure 1: Localisation des différentes sociétés LafargeHolcim dans le monde

## I.3. Cadre juridique

- Dénomination : LafargeHolcim Maroc
- Forme juridique : société anonyme de droit Privé.
- Date de création : 1976 pour une durée de 99 ans.
- Date d'introduction en bourse 21 décembre 1993.
- Activité : production et Commercialisation du Ciment.
- Capital social au 31 Août 2008 : 421 000 000 Dhs, entièrement libéré, composé de 4

210 000 actions d'une valeur nominale de 100 Dhs, dont 2 727 010 actions portent des droits de votes doubles.

- Registre commercial : 24713.
- N° de production fiscale : 512367.
- Affiliation à la CNSS : 1515123.
- Capacité de production : 2000000t/an.
- Effectif : 770
- Actionnaires : - Holderbank 51% - Personnels 1.5%

#### **I.4. Présentation de LafargeHolcim Ras El MA**

Cette unité avait démarré en mois d'avril 1993. Elle est installée sur un terrain en propriété de la CIOR. Le gisement de calcaire est à proximité de l'usine et compte plus de deux siècles de réserves exploitables en calcaire de bonne qualité.

Cette usine est construite selon les technologies les plus nouvelles en matière d'industrie de ciment ce qui lui permet de produire, actuellement 2800 t/j.

Ce site a été choisi pour plusieurs raisons :

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



*Figure 2: Usine LafargeHolcim de Ras El Ma*

### **I.5. Situation géographique et accessibilité**

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

La liaison routière avec les autres régions du Royaume se fait à partir de l'autoroute reliant Casablanca et Oujda, tandis que l'accès à la ville de Fès se fait directement via les localités de Ben souda et de Zlillig. L'usine est raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

### **I.6. Activité**

Créée en 1976, LafargeHolcim (Maroc) est un groupe spécialisé dans la production et la commercialisation de tous les liants hydrauliques employés dans la construction et les travaux publics, notamment le clinker (produit semi-fini du ciment), le ciment, le béton et les granulats.

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

L'unité de production de Fès - Ras El Ma utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale. Elle comprend des ateliers de concassage, de broyage, d'homogénéisation et de stockage de la farine, de cuisson et stockage du clinker, de broyage du ciment et d'ensachage et expédition du ciment.

La production s'effectue à partir de matières premières extraites de la carrière de calcaire et de la carrière de schiste, d'où la première se situe à proximité de l'usine, la carrière de schiste se situe à 45 km de l'usine exactement près d'Immouzar.

LafargeHolcim 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 calcaire 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 calcaire 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

## I.7. Organigramme

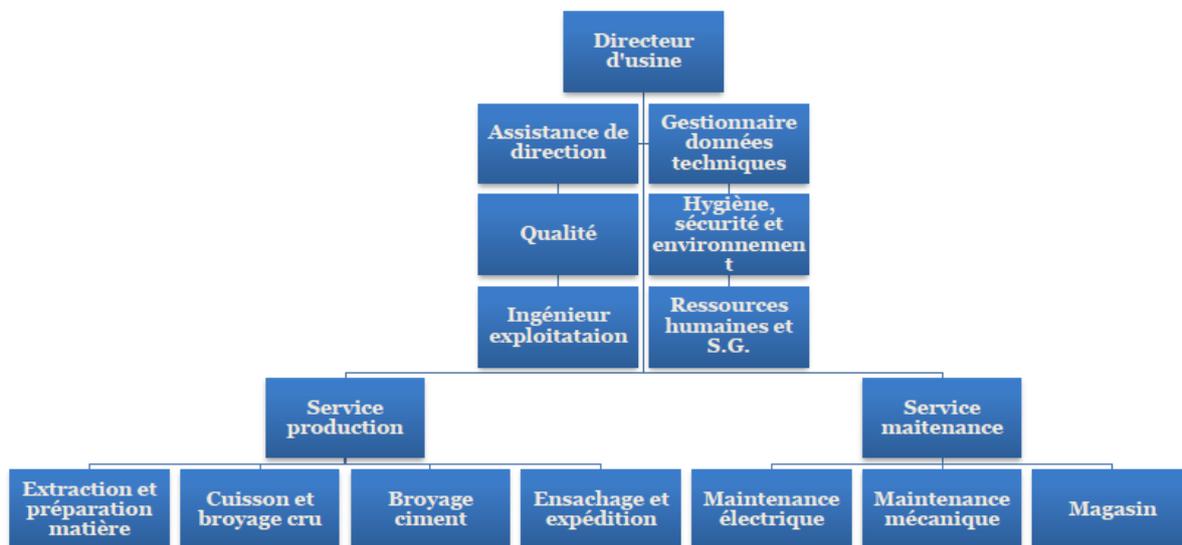
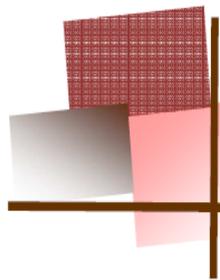


Figure 3: Organigramme de LafargeHolcim Ras El Ma



Chapitre II : Processus de fabrication  
du ciment

---

## **Introduction**

La fabrication du ciment est un processus très complexe dans lequel les matières premières subissent des transformations physico-chimiques successives jusqu'à l'obtention du produit fini. Ce procédé comprend deux phases essentielles :

- La première phase du procédé comprend la fabrication du clinker suite à la cuisson d'un mélange cru (ou farine). Cette farine est composée en grande proportion de calcaire, sable, de schiste et de minerai de fer. Le clinker constitue en quelque sorte le ciment dans son état pur.
- La deuxième phase est le broyage du clinker mélangé avec des matières de corrections (ajouts) constitués, dans le cas de l'unité de Ras El Ma, de gypse et calcaire. Suivant les qualités du ciment souhaité, le clinker est plus ou moins dilué.

## **I. Généralités sur le ciment**

### **I.1. Définition**

Poudre minérale, le ciment est un liant hydraulique utilisé dans différents domaines, principalement comme matériel de construction. Il est fabriqué à partir de la cuisson, le mélange et le broyage de différentes matières premières. Tout d'abord, il y a le mélange du calcaire et des additifs tels que le minerai de fer, le schiste, le sable et la fluorine. Ce mélange est broyé et porté à haute température (~1450°C) dans un four cylindrique. Les transformations physico-chimiques provoquent la création d'un produit appelé clinker. Suite à l'ajout de différents éléments additifs tels que le gypse et le calcaire, le ciment est obtenu.

### **I.2. Procédé de fabrication du ciment**

Le processus de fabrication du ciment est un processus complexe et graduel par voie sèche, dans lequel la matière subit à partir de la carrière des transformations successives jusqu'au produit fini.

La fabrication du ciment est un procédé qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

La production du ciment s'opère selon un processus en 8 étapes :

### I.3. Extraction 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. Même 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83 %
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14 %
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3 %

### I.4. Concassage

L'atelier de concassage est situé à 50 m de la carrière calcaire. Il comprend un concasseur à marteau à double rotor, qui convient pour le concassage de toutes matières friables ou semi-dures.

La marche du concasseur est entièrement automatisée. Lui conférant un fonctionnement optimum et très sécurisé.

Le concasseur de débit 1500 t/h peut concasser des blocs de dimensions maximales 1,3m. La granulométrie des produits à la sortie du concasseur est à 99% inférieure à 100mm. Le concassage se déroule par poste de 8h par jour du lundi au samedi.

Les matières premières extraites sous forme de blocs de grosses dimensions, sont concassées afin de faciliter leur manutention pour les étapes postérieures. Les concasseurs utilisés dans les usines de LafargeHolcim (Maroc) sont à impact à battoirs ou marteaux.



Figure 4: Processus de concassage

### I.5. Séchage et broyage

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques  $\mu\text{m}$ ) 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, LafargeHolcim-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.

### I.6. Dépoussiérage

Le dépoussiérage de l'atelier de concassage, par un filtre à manches, permet la récupération des matières très fines pour les remettre dans le circuit.

Le transport de la farine du cru par des aéroglisteurs risque de générer des poussières. Le système de dépoussiérage consiste à éliminer les émissions des poussières par l'utilisation d'un filtre à manches ou d'électrofiltre pour une meilleure protection de l'environnement.

### I.7. Homogénéisation

A la sortie du broyeur cru, le mélange des matières broyées, appelé farine crue est stocké dans un ou plusieurs silos de stockage et d'homogénéisation.

Dans ces silos, la farine crue est homogénéisée par soufflage d'air sur-pressé. Cette opération permet d'améliorer la régularité des caractéristiques de la farine crue afin d'obtenir ensuite un clinker de qualité régulière.

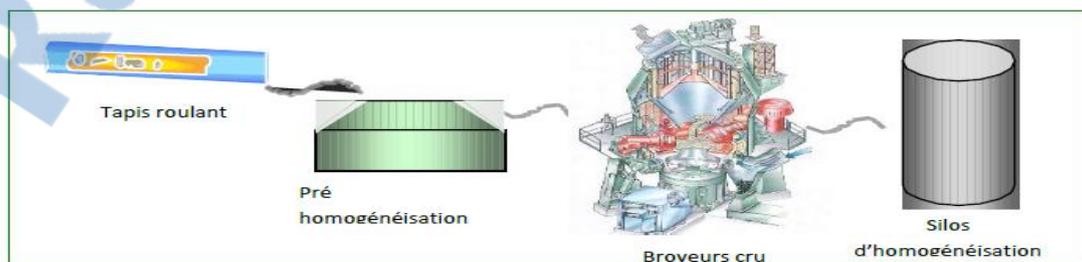


Figure 5: Procédé de préparation du cru

## I.8. Cuisson

La cuisson se fait à une température voisine de 1450 °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/t ck.

Pour améliorer le bilan thermique, on utilise en amont du four un échangeur thermique qui préchauffe le cru à environ 900 °C. Puisque LafargeHolcim 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.

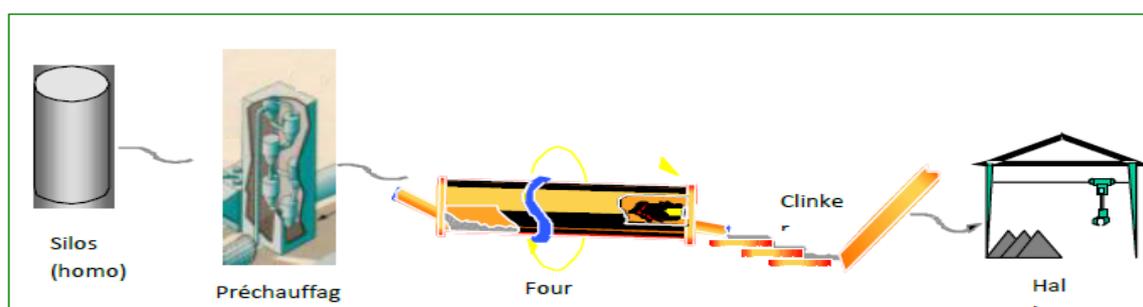


Figure 6: Procédé de cuisson de la farine

## I.9. 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  $\mu\text{m}$ . 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.

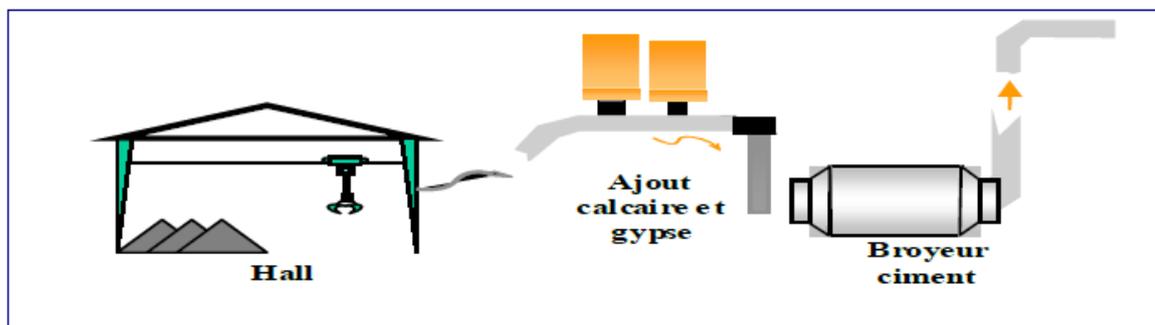


Figure 7: Procédé du broyage du clinker

## I.10. 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.

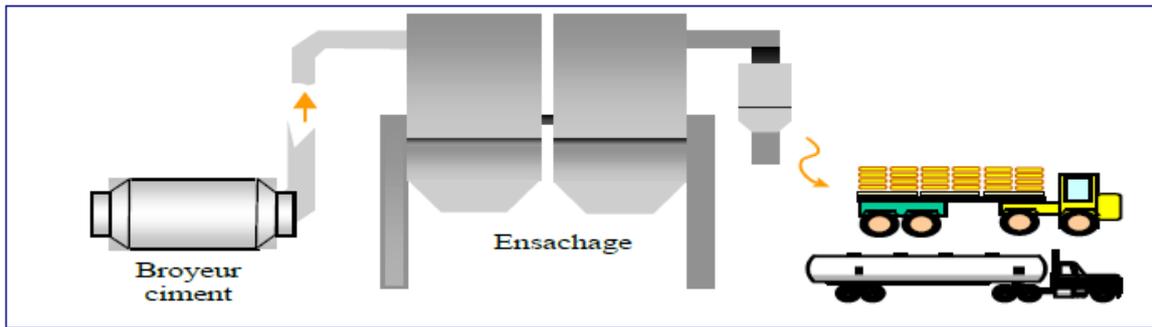


Figure 8: Expédition

### I.11. 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)

### I.12. Contrôle de 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 LafargeHolcim a depuis longtemps mis en place des procédures de contrôle rigoureuses qui lui permettent de garantir un produit de qualité.

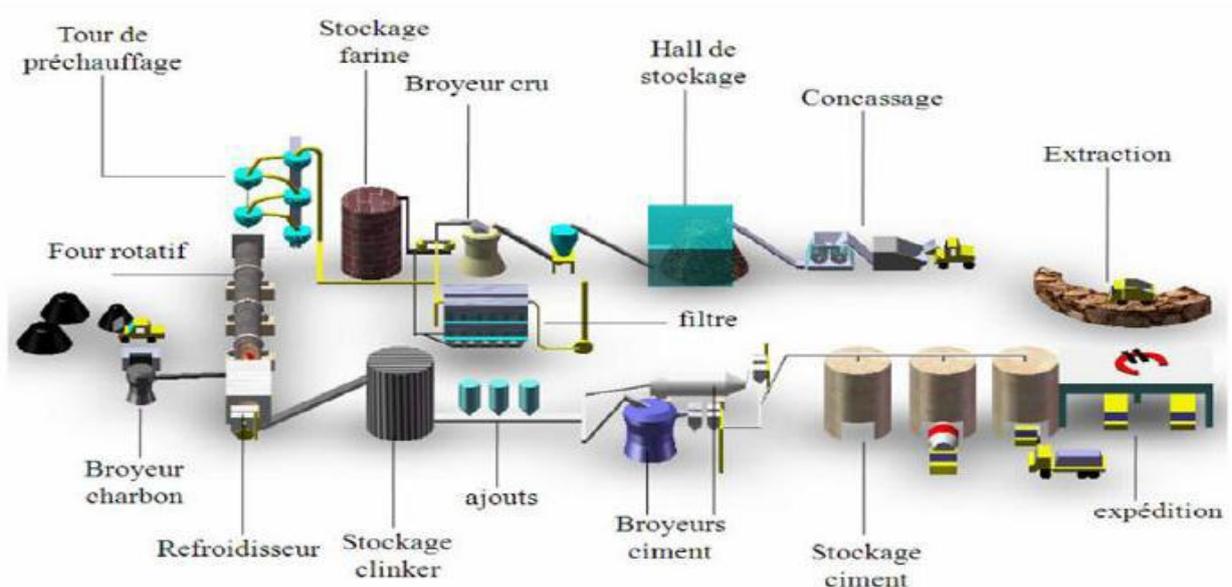


Figure 9: Schéma des différentes étapes de fabrication du ciment

## **II. 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 SiO<sub>2</sub> (silice), A pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumine) et F pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxyde de fer).

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

### **II.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.

### **II.2. Four rotatif**

C'est un four rotatif cylindrique d'une longueur de 62 m, 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 :  $L1 = 62$  m
- Vitesse de rotation : 5,2 tours/minute
- Inclinaison : 3 %
- Le rayon intérieur du four :  $r1 = 1.7$  m
- Le rayon extérieur du four :  $r2 = 1.94$  m
- Epaisseur d'acier :  $e2 = 40$  mm
- Epaisseur du brique :  $e1 = 200$  mm

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 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.

### **II.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 LafargeHolcim est de type Multi-channels 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 à 11m
- Poids unitaire approximatif avec béton réfractaire : 8000 Kg
- Revêtement réfractaire, épaisseur conseillée : 80mm
- Débit d'air de combustion : 60500 Nm<sup>3</sup>/h
- Débit d'air primaire : 7200 Nm<sup>3</sup>/h
- Débit maximum charbon : 9000 kg/h
- Débit d'air de transport : 2000 Nm<sup>3</sup>/h
- Débit diesel : 1000 Kg/h

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 naturel ;
- Produits pétroliers liquide (fioul, gasoil ...)

- Combustibles alternatifs liquides ou solides ;
- Mélange de combustibles dans toutes les proportions

## **II.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 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.

### **1. Processus de cuisson**

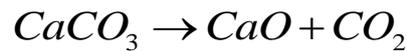
Dans une voie sèche, le four est relativement court (de l'ordre de 60 mètres). La farine est introduite dans les cyclones en haut de la tour, elle se réchauffe au contact des gaz de combustion.

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.

#### 1ère 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.



À une température comprise entre 900 et 1000°C (Réaction fortement exothermique).

Pour 1 tonne de CaCO<sub>3</sub>, on évacue à la cheminée 440 kg de CO<sub>2</sub>, du simple fait de la décarbonatation.

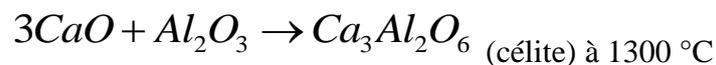
### 2ème étape : Phase de transition

Combinaison de CaO avec :

- SiO<sub>2</sub>, pour former du C<sub>2</sub>S (silicate bicalcique)



- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pour former C<sub>3</sub>A, une solution solide d'aluminate tricalcique



- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour former C<sub>4</sub>AF (Aluminoferrite tricalcique)



Les réactions ont eu lieu à l'état solide.

La réaction de formation du C<sub>2</sub>S est endothermique.

### 3ème 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<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) : à partir de 1300°C, le C<sub>2</sub>S se transforme en C<sub>3</sub>S en réagissant avec une partie de CaO non combinée. La réaction est exothermique.



4ème étape : Trempe

Le cru est refroidi brusquement de 1450 °C environ à 100 °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  $C_2S + CaO$ ).

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.

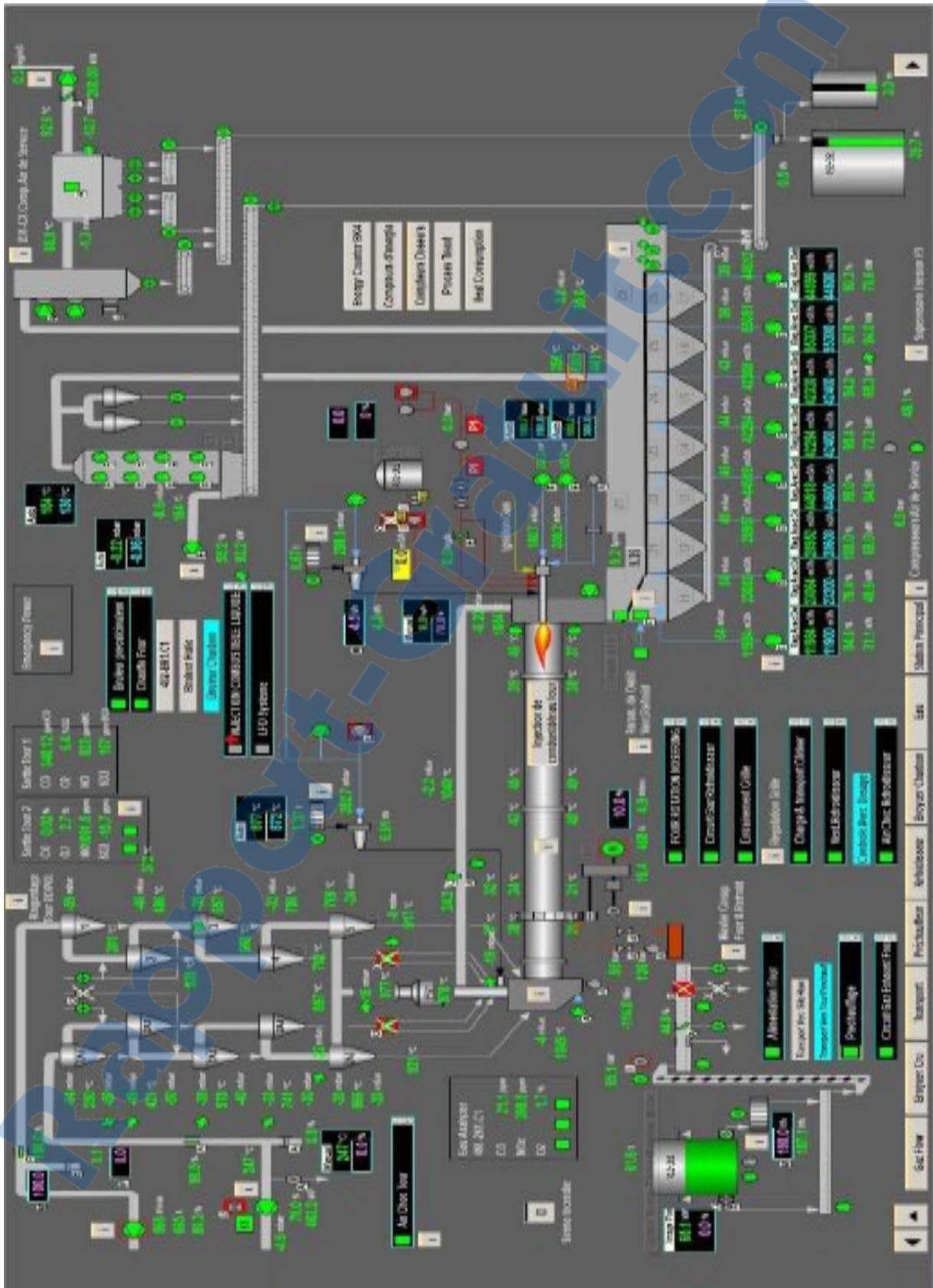
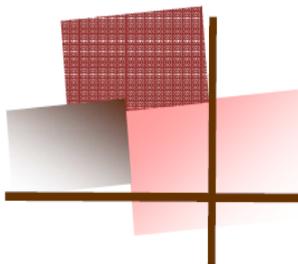


Figure 10: Processus de cuisson obtenu par la salle de contrôle à LafargeHolcim



Chapitre III : Etude de l'installation  
actuelle de dosage

---

Dans le cadre de l'augmentation du taux de substitution du combustible, LafargeHolcim a mis au point toute une installation pour la manutention, le dosage et l'exploitation des AFR.

L'étude de cette installation consistera à présenter les différentes spécifications de ses composants, à souligner leurs avantages et leurs inconvénients.

Tout d'abord, il s'avère nécessaire de définir les AFR, présenter leurs avantages ainsi que leurs effets sur le procédé.

## **I. Combustibles**

Les combustibles constituent une famille particulière des matières premières utilisables pour assurer la cuisson, et qui sont injectés à la tuyère du four et au précalcinateur. 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 (Le Soufre 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 des calories qui participent à la cuisson et à la formation du clinker et des cendres riches en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui réagissent dans le four avec les autres constituants

### **I.1. Petcoke**

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.

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.

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

## **I.2. Présentation des AFR**

Les AFR (Alternative Fuels and Raw Material) ou combustibles alternatifs de substitution sont généralement des déchets solides et liquides, des matériaux usés qui ont l'avantage d'avoir des caractéristiques thermiques intéressantes, leur permettant ainsi de remplacer de manière efficace les combustibles nobles tels le petcoke, le charbon et le gaz naturel.

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.

Les avantages de l'utilisation des AFR portent sur trois aspects :

- Energie : réduction de la consommation en combustibles fossiles.
- Environnement : réduction des émissions
- Ressources naturelles : préservation de ces ressources.

### I.2.1. Types d'AFR

LafargeHolcim REM reçoit différents types d'AFR soit de sa filiale de traitement de déchets « ECOVAL », soit d'autres fournisseurs de pneus ou des huiles usagées.

LafargeHolcim exploite plusieurs types d'AFR :

- Pneus usagés ;
- Les grignons d'olives ;
- Fluffs (déchets traités par Ecoval) ;
- Huiles usagées ;
- Autres (déchets de bois, déchets contenant la biomasse ...)

Dans cette étude, nous nous limiterons aux trois combustibles majeurs :

- Pneus usagés ;
- Fluffs.
- Grignons d'olives (G.O)

#### I.2.1.1. Pneus usagés

Les pneus usagés sont des pneus qui ne sont plus adaptés à leur usage prévu en raison des dommages qui ont atteint leur structure ou pour leur fragilité. Ils comprennent du caoutchouc naturel, du caoutchouc synthétique, le noir de carbone, de l'huile et d'autres éléments.

Les pneus usagés non réutilisables, quant à eux, peuvent être valorisés de plusieurs façons, entiers, en morceaux ou broyés comme étant des combustibles et matières premières pour les cimenteries.

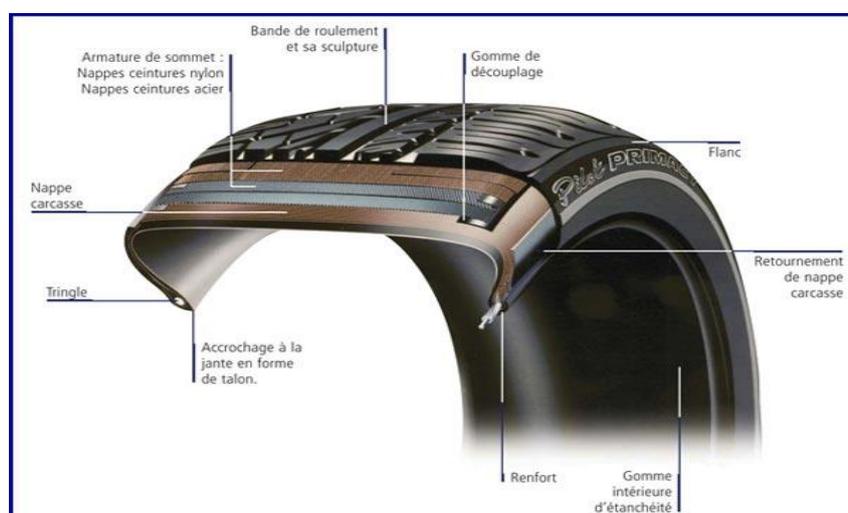


Figure 11: Structure d'un pneu

En raison de la diversité de la composition d'un pneu à un autre, nous nous sommes basés sur un échantillon ayant les caractéristiques moyennes suivantes :

Tableau 1: composition chimique d'un pneu

Elément	Masse (g/kg de pneus)
Carbone	670
Hydrogène	80
Soufre	19
Azote	11
Oxygène	40
Fer	150
Zinc	8,5
Chlore	0,6

### I.2.1.2. Grignons d'olives

Les grignons d'olive sont un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive composé des peaux, des résidus de la pulpe et des fragments des noyaux. Les grignons sont les résidus solides résultant de l'extraction d'huile, alors que les résidus liquides sont dénommés margines

Actuellement sont disponibles des machines pour le traitement des grignons, qui séparent la pulpe et les fragments de noyaux. Ce traitement permet d'optimiser l'emploi du sous-produit, notamment en vue de l'utilisation comme combustible pour les fragments de noyaux, constitués de bois très dur à haut pouvoir calorifique.

Les grignons purs se présentent comme un très bon combustible, d'emploi facile et doté d'un pouvoir calorifique élevé.

Tableau 2: Caractéristiques des grignons d'olives

Caractéristiques	%H	pH	PCS Cal/g	PCI Cal/g	%Cl	%MS	%SO <sub>3</sub>
Moyenne	0,36	6,5	8201,17	7981,17	0,33	96,64	2,86

### I.2.1.3. Fluffs

Les fluffs sont des déchets industriels ou ménagers, souvent à l'état déchiqueté, tels que le plastique, le tissu, le papier, le cuir, etc.

Ce type de déchets est fourni par la société « Ecoval », qui se charge du traitement et de l'homogénéisation de ces déchets afin d'obtenir un matériau uniforme.

Il n'existe pas de composition chimique standard pour les fluffs vu qu'ils proviennent de déchets divers.

L'échantillon pris a les caractéristiques suivantes :

Tableau 3: Caractéristiques des fluffs

Eléments	Masse (g/kg de fluffs)
Soufre	0,5
Chlore	8,2
Emissions du dioxyde de carbone	80 kg de CO <sub>2</sub> /GJ
Eau	100

### I.2.2 Effet des AFR sur la qualité du clinker

L'utilisation des pneus, de grignons d'olives et des fluffs comme combustibles de substitution dans la production influence le fonctionnement du four à ciment et la composition du clinker à cause de la présence des éléments suivants :

- Le fer ;
- Le zinc ;
- Le chlore ;
- Le soufre.

Afin de pouvoir dimensionner les équipements nécessaires à la résolution de la problématique posée, il serait judicieux de choisir le débit des AFR adéquat.

Cependant, le choix de ce débit est limité par la contrainte de la composition chimique des AFR. Nous allons, d'une part, évoquer en détail l'influence de ces compositions sur le procédé et la limitation de l'utilisation des AFR, d'autre part, justifier les débits des AFR choisis.

## **I.2.4. Effet de la composition chimique des AFR sur le procédé**

### Cas des pneus :

La limitation d'utilisation des pneus dans le co-processing est due aux éléments suivants :

- Le zinc, à grande teneur, affecte la qualité du clinker. Il augmente la réactivité du  $C_3A$ , ainsi que sa déstabilisation. La teneur maximale de cet élément est de 520ppm.
- Le fer affecte aussi la qualité du clinker. Une grande concentration de ce composé implique une mauvaise cuisson.
- Lors de leur introduction dans le précalcinateur, les pneus risquent de tomber dans la chambre liée au four, où le taux d'oxygène est faible, causant ainsi un collage de la matière.

### Cas des fluffs :

Le majeur problème qui limite l'utilisation des fluffs est leur teneur en chlore. Ce dernier, à son introduction dans le précalcinateur, est absorbé par la farine sous différentes formes ( $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ).

Une fois arrivées à la zone du four où règne la température de  $1450^\circ C$ , les chlorures contenus dans la farine se vaporisent et prennent le chemin des gaz jusqu'à atteindre l'entrée du four. A la température de  $1000^\circ C$ , les chlorures gazeux se condensent et suivent encore le chemin de la matière.

De plus, l'existence du chlore est limitée par le soufre. En effet, si le taux de chlore dépasse la limite, il y aura formation de concrétions dans le four, chose qui va se répercuter sur le bon fonctionnement du procédé.

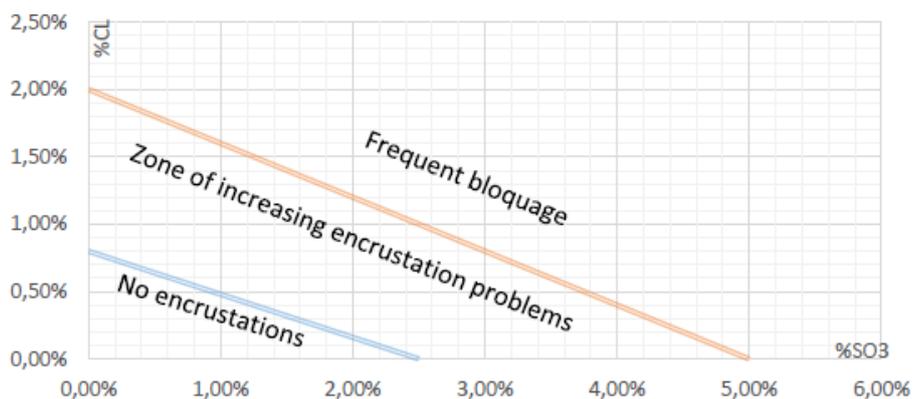


Figure 12: influence du chlore et du soufre sur le procédé

### I.3. Broyeur combustible

Afin d'avoir une énergie pour alimenter le four, le broyeur charbon sert à broyer le petcoke et les autres combustibles de substitution (Fluffs, grignons d'olives et pneus).

On commence par vider le petcoke dans un stock, puis dans une trémie dont il sera fusionné avec les grignons d'olives, fluffs et pneus.

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 est muni d'un filtre pour les gaz et les renvoie au préchauffeur pour réchauffer le petcoke.

Cependant, le choix de ce débit est limité par la contrainte de la composition chimique des AFR.

L'étude de ces effets sur le procédé sera détaillée par la suite

Dans ce qui suit, vu l'impact qu'ont ces AFR sur le procédé, nous allons décrire tout le circuit des AFR et leurs parcours dans la ligne de cuisson.

## II. Etude de l'installation actuelle

L'installation de dosage des AFR à l'usine LafargeHolcim REM comporte des éléments suivants :

- Un Extracteur ;
- Un Doseur à bande ;
- Une Trémie SINEX ;
- Un Bande transporteuse ;
- Un Alimentateur vibrant ;
- Un Convoyeur à bande ;
- Un Double clapet et un shut off gate ;
- Un Précalcinateur (siège de combustion) ;

## II.1. Extracteur

L'extracteur se compose de :

- Une trémie ;
- Un tablier métallique : une chaîne à galets porteurs, en maillons d'aciers ;
- Un écrêteur.

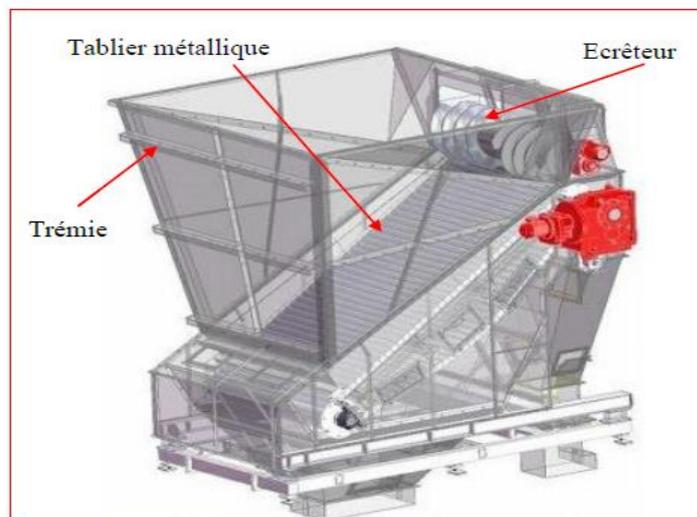


Figure 13: Schéma de l'extracteur

La position de l'écrêteur sera ajustée de façon à obtenir une couche constante de produit à la sortie d'extracteur selon la densité et le débit du produit

L'avantage de cette machine est sa grande flexibilité : Le système de régulation ajustera la vitesse du tablier métallique de façon à obtenir un débit constant et un dosage précis (+/- 1%) par rapport à la consigne. En plus elle peut extraire une large gamme de produit avec des

granulométries comprises entre 5 et 500mm et des densités variant de 0,1 à 1,5t/m<sup>3</sup> comme, par exemple, les pneus déchiquetés, les boues, les fluffs, etc...

Le chargement de l'extracteur s'effectue manuellement au moyen d'une chargeuse.

## II.2. Doseur à bande

Dans le doseur à bande, les AFR sont approvisionnés en continu sur la bande de transport, par l'extracteur vu auparavant. Le pont de pesage situé sous la bande mesure, en continu, la masse des AFR.

Le dispositif de commande compare, en continu, le poids réel avec le poids de consigne et ajuste automatiquement le régime du moteur, soit pour augmenter, soit pour réduire la vitesse de la bande, afin de maintenir un débit constant. Toute variation de la densité de la matière est reflétée comme un changement de la charge de la bande. Ce dernier est compensé par un ajustement de la vitesse de la bande.

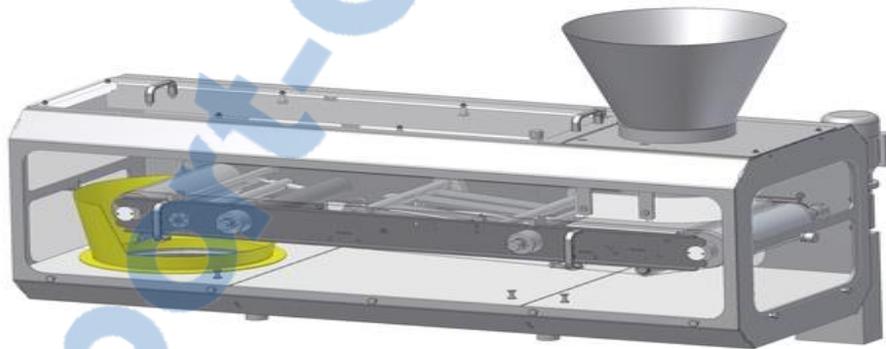


Figure 14: Schéma du doseur à bande

## II.3. Trémie SINEX

Les matériaux ou produits pulvérulents stockés dans les silos ou trémies ont très souvent tendance à colmater les conduites. Il en résulte la formation de cheminées qui a pour effet de provoquer :

- Une réduction de la capacité de stockage ;
- Des irrégularités très importantes de débit à la sortie de la trémie pouvant aller jusqu'à l'arrêt complet de l'écoulement.

SINEX préconise une technique de décolmatage par vibration externe, en utilisant des vibreurs rotatifs, électromagnétiques ou pneumatiques dont les effets provoquent le décolmatage des silos et trémies métalliques de petite et moyenne contenance

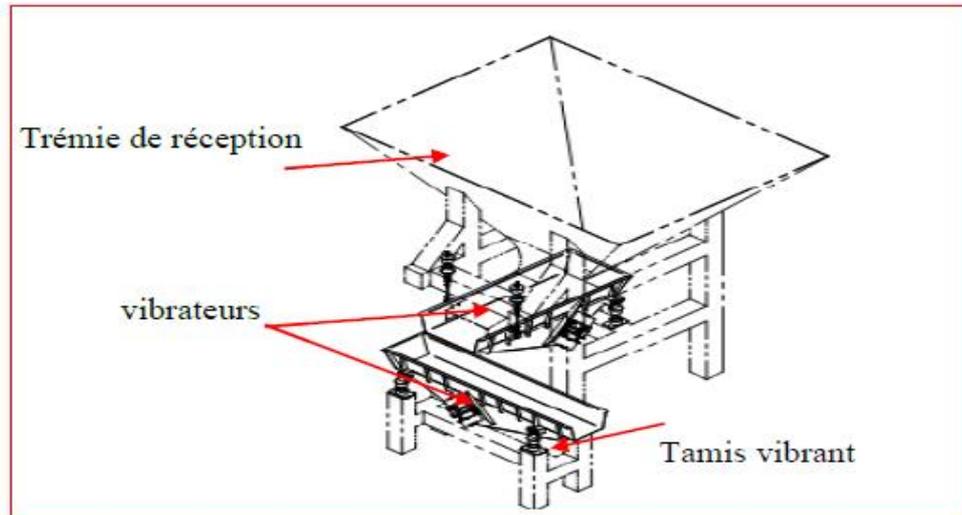


Figure 15: Schéma de l'installation SINEX

#### II.4. Bande transporteuse

Cette bande a été conçue pour transporter les AFR jusqu'à l'alimentateur vibrant. L'avantage de cette bande est qu'elle est robuste, fiable, a une longue durée de vie et n'exige pas d'entretien.

#### II. 5. Double clapet et shut off gate

Le double clapet et le shut off gate est un système qui a été mis avant le précalcinateur pour alimenter la chambre de combustion par les AFR. Il est constitué des éléments suivants :

- Un corps en acier inoxydable.
- Deux clapets : Ce sont deux déflecteurs en aciers inoxydables, montés l'un sur l'autre et activés de manière alternée par gravité avec une commande à contre-poids.
- Un shut off gate : Une porte glissante équipée d'un détecteur de flamme. Lors de la détection d'une température de flamme dépassant la consigne, la porte se ferme automatiquement afin de protéger les équipements en amont.

Lors de l'ouverture des clapets pour l'alimentation de la matière, l'entrée des AFR laisse pénétrer l'air ambiant. Cet air parasite a un effet sur les installations ainsi que sur le procédé.

- Impact de l'air faux :
- Emission de monoxyde de carbone (CO).

- Formation des anneaux et dépôts solides.
- Augmentation de la vitesse de tirage, et par conséquent l'augmentation de consommation électrique.
- Augmentation de la consommation en carburant.

## II.7. Précalcinateur

Comme nous l'avons déjà cité, le précalcinateur est le réacteur de décarbonatation de la farine crue entrant dans le système.

La réaction de décarbonatation concerne les carbonates de calcium et de magnésium :



Cette précalcination doit être contrôlée afin de déterminer la qualité de la farine entrant dans le four.

Les conditions d'une bonne précalcination sont appréciées à travers les indicateurs suivants :

- Perte au feu (décarbonatation) ;
- Température de sortie du précalcinateur ;
- Taux du CO dégagé du précalcinateur (nature de la combustion).

L'avantage du précalcinateur utilisé à l'usine LafargeHolcim REM est qu'il peut être alimenté avec de grands débits d'AFR quel que soit leur pouvoir calorifique tout en assurant de manière efficace leur incinération.

### **III. Problématique**

Les cimenteries sont de gros consommateurs d'énergies thermique et électrique. L'énergie dans la fabrication du ciment représente 40 à 50% du prix de revient. Selon l'entreprise LafargeHolcim, l'énergie thermique utilisée dans la fabrication du ciment s'élève de 3.2 à 5.5 GJ/T clinker d'où les efforts déployés pour optimiser le rendement énergétique et développer les combustibles alternatifs.

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 LafargeHolcim d'immenses dépenses énergétiques. Le grand souci de cette cimenterie devient donc l'amélioration de la production d'énergie et la diminution de la consommation calorifique.

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. Le plus grand problème à éviter est l'arrêt inattendu du four.

La société LafargeHolcim REM donne une grande importance au suivi de l'énergie thermique du four vu l'importance des coûts des combustibles utilisés et cherche toujours à diminuer la consommation calorifique de la production. Son suivi joue un rôle principal permettant la comparaison des coûts au fil des années.

Pour cette fin, LafargeHolcim 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 ainsi que les grignons d'olives, les fluffs et les pneus déchiquetés. Ces combustibles sont nommés des combustibles de substitution ou AFR.

La nécessité de diminuer cette consommation calorifique demeure donc un volet primordial dans la stratégie de la société qui cherche toujours l'optimisation de ses coûts de production en respectant la qualité exigée par les normes afin de satisfaire ses clients et aboutir au bénéfice souhaité par la direction.

Donc l'objectif du projet était de faire de trouver une configuration qui soit à la fois peu consommatrice d'énergie et de coût peu élevé. Le travail a commencé d'abord par la définition et à l'analyse de l'état des lieux (petcoke seul). Des scénarios ont été ensuite établit et leur impact a été estimé sur les domaines énergétiques, financiers et environnementaux.

### **III.1. Etat des lieux (petcoke seul), établissement des scénarios et comparaison avec l'approche actuelle**

L'outil FMO (fuel mix optimizer) est utilisé afin de quantifier les impacts économiques et techniques des mélanges de combustibles.

FMO a pour rôle d'évaluer :

- La faisabilité technique et l'impact économique des changements de mélange de carburant
- Le mélange de combustibles chaque année pour le plan budgétaire
- Le mélange de carburant sur une base hebdomadaire / mensuelle à des fins opérationnelles

La valeur ajoutée de cet outil est l'évaluation de la faisabilité technique et des avantages économiques (coût de l'énergie thermique) des carburants alternatifs (AF) et d'autres carburants à faible teneur (par exemple, charbon à faible teneur en pétrole), compte tenu des impacts sur la consommation de chaleur, le taux de production de clinker et les émissions.

### **III.2. Utilisation FMO**

FMO comprend au minimum deux feuilles, qui sont « Baseline » et « Simulation » :

A/ Baseline : La fiche de base est utilisée pour définir la base de référence pour les calculs, qui pourrait être une situation actuelle

B/ Simulation : est utilisée pour simuler une situation future (pour comparaison avec la ligne de base actuelle) ou la situation actuelle

Selon l'exigence, des feuilles supplémentaires de "simulation" peuvent être générées, par ex. Simulation2, Simulation3, etc. Toutes les feuilles de « Simulation » se réfèrent à la feuille « Baseline » pour les calculs. En d'autres termes, la base de toutes les simulations reste la même.

Donc dans une perspective d'évaluation du mix fuel, nous avons choisi 3 scénarios différents réalisés au sein de l'usine qui sont :

S1: Petcoke + grignons d'olives

S2: Petcoke + pneus

S3 : Petcoke + fluffs

Les 3 scénarios comportent le petcoke, les grignons d'olive, les pneus et les fluffs. Pour évaluer le mix fuel, nous avons choisi chaque scénario sur la base de l'élément majoritaire. Ces scénarios seront comparés à celui du petcoke seul comme étant un état de référence.

### III.3. Comparaison de la consommation spécifique d'énergie thermique«STEC» des 4 scénarios

L'objectif du présent travail est d'optimiser le mélange de combustibles à injecter afin de diminuer les coûts relatifs aux combustibles utilisés, tout en respectant l'environnement concernant les émissions des gaz à effet de serre.

Le tableau ci-dessous résume le ratio matière de chaque élément ainsi que la consommation calorifique réalisée pour chaque scénario.

Tableau 4: Ratio matière de chaque élément et la consommation calorifique de chaque scénario

%	Petcoke	G. O	Fluffs	Pneus	STEC
S1	75,10%	12,18%	6,70%	5,70%	3371
S2	65,25%	16,00%	15,17%	3,26%	3390
S3	66,68%	19,44%	12,80%	0,59%	3406
S0	100%	0%	0%	0%	3360

La société LafargeHolcim REM donne une grande importance au suivi de l'énergie thermique du four vu l'importance des coûts des combustibles utilisés, et cherche toujours à diminuer la consommation calorifique de la production.

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.

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

$$\text{Consommation Calorifique} = \frac{\text{Energie calorifique}}{\text{Production}} = \frac{\sum_i^n m_i * \text{PCI}}{\text{Production clinker}}$$

Avec :

$m_i$  : la masse du combustible en Kg.

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

Production clinker : la quantité produite du clinker en Kg.

D'après les résultats du tableau 4, nous constatons une variation de la consommation calorifique qui est impacté par la difficulté d'adaptation du processus à l'injection des AFR et la présence des deux éléments pénalisant les chlorures, la teneur en soufre ainsi que l'humidité.

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

Certes, l'injection du petcoke seul reste la meilleure consommation calorifique, mais il s'avère judicieux d'évaluer également l'aspect coût pour les 3 scénarios comparé à celui du S0, sans oublier l'évaluation de l'impact des AFR sur la STEC qui est dû principalement à la teneur en soufre et à l'humidité du constituant.

#### **III.4. Comparaison de l'impact des 3 scénarios sur la consommation calorifique**

Au cours de la combustion des solides pulvérisés, il y a diminution de la masse de solide par dégagement de matières volatiles et oxydation du résidu carboné. La masse résiduelle en fin de combustion est celle des cendres qui sont inertes.

Après compilation sur l'outil FMO, nous obtenons une visibilité assez claire sur l'impact de tous les combustibles. Le tableau (5) suivant résume les résultats obtenus :

Tableau 5: Impact des combustibles sur la consommation calorifique

Configuration	S0	Pneus	Fluffs	G.O.
Impact petcoke (MJ/t ck)	38	23	18	18
Impact AFR (MJ/t ck)	0	29	33	43
Total (MJ/t ck)	38	52	51	61

D'après les résultats obtenus, nous constatons une augmentation de la valeur de la consommation calorifique avec l'utilisation des combustibles de substitution qui était d'une valeur de 38MJ/t ck pour le petcoke seul. En utilisant les pneus et les fluffs elle atteint des valeurs de 52 et 51 MJ/t ck. Cette consommation atteint une valeur maximale avec l'utilisation des grignons d'olives qui est de 61MJ/t ck.

Cette variation est due à la teneur élevée d'eau dans les grignons d'olives provenant lors du procédé d'extraction des huiles. En effet, une grande partie de l'énergie est dépensée pour l'élimination des teneurs en eaux pour obtenir des grignons secs prêts pour fournir de l'énergie.

### **III.5. Evaluation financière des configurations proposées : estimation du coût en MAD/GJ et MAD/t ck**

Afin d'optimiser la facture énergétique, il est nécessaire d'établir la meilleure configuration de combustibles utilisés pour la clinkérisation de la farine crue.

Pour ce faire, l'outil FMO a été utilisé pour estimer le coût des combustibles par GJ et par tonne de clinker produit. Le tableau suivant illustre les résultats des prix de combustibles injectés.

Tableau 6: Coût des combustibles injectés au cours de la ligne de cuisson estimé par l'outil FMO

Configuration	Petcoke seul	Petcoke+Pneus	Petcoke+G.O.	Petcoke+Fluffs
Prix MAD/GJ	32,9	30,6	29,2	29
Prix MAD/t ck	110,6	103,4	99	98

D'après le tableau, nous constatons que le scénario consistant à maximiser la quantité de fluffs représente un gain de 4 MAD/GJ.

Sur la base de 3,4 GJ/t ck et une production annuelle de 600 000 tonnes de clinker (données usine), nous pouvons estimer un gain de 7 MMAD/an par rapport au petcoke seul, et un gain de 400 000 MAD/an par rapport au scénario utilisant les grignons d'olives.

### III.6. Comparaison des émissions en gaz

L'industrie cimentière est fortement émettrice de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), provenant des besoins en énergie thermique, mais aussi du procédé de fabrication du ciment.

Dans le domaine de l'industrie du ciment, la réduction des émissions polluantes est devenue une priorité, afin de satisfaire les normes mondiales, mais aussi comme un sérieux argument de vente. Diverses techniques sont appliquées aux fours de cimenterie, selon les solutions imaginées, cependant, une solution ne peut être efficace que si elle est appuyée par une bonne analyse qualitative et quantitative.

Généralement, les débits des AFR trouvés n'ont aucune influence sur la qualité du clinker recommandée. L'augmentation des débits concernant les pneus, les grignons d'olives ou les fluffs reste toujours bénéfique.

Tableau 7: Comparaison des émissions en gaz des trois scénarios comparés au petcoke seul

	CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )
Petcoke seul	9918	202,95
Petcoke+pneus	9792,43	118,64
Petcoke+G.O	9874,56	119,51
Petcoke+Fluffs	10124,37	84,98

Pour sa production, l'usine n'a d'autre choix que d'utiliser des combustibles, comme le coke de pétrole par exemple, nécessaire à la cuisson des matières premières à 1450 degrés, ce qui génère des rejets de gaz polluants dans l'atmosphère.

Nous remarquons à la lumière des résultats obtenus tableau (7) que :

L'utilisation des fluffs a permis une limitation des émissions en gaz. En effet, elle a permis une réduction des émissions de NO<sub>2</sub> d'un pourcentage de 58,12%. Or, l'utilisation des autres AFR a permis de réduire les émissions en NO<sub>2</sub> de 41,54% dans le cas des pneus et de 41,11% dans le cas des grignons. Notons ici, que l'utilisation des combustibles génère une émission en NO<sub>x</sub> qui ne dépasse pas la valeur limite d'émission réglementaire, soit de 800 mg /Nm<sup>3</sup> de gaz rejeté à la cheminée. Ceci montre l'engagement de la cimenterie LafargeHolcim dans une stratégie de protection environnementale et les efforts déployés pour limiter l'effet de ces émissions sur la planète. En effet, la société est équipée d'un système DeNox en utilisant un dispositif qui permet de limiter les émissions d'oxyde d'azote. Ce système consiste en une réduction sélective non catalytique par injection de l'ammoniac (ou un dérivé comme l'urée) pour réduire les oxydes d'azote en azote moléculaire.

La substitution du petcoke seul par les autres combustibles n'a pas permis de réduire significativement les émissions en CO<sub>2</sub>. En fait, de faibles pourcentages de réduction de ces émissions ont été estimés, soient de 2% en utilisant les pneus et 1% en utilisant les grignons.

Les NO<sub>x</sub> émis sont produits par deux différents mécanismes :

- Les NO<sub>x</sub> thermiques, formés par combinaison chimique de l'oxygène et de l'azote de l'air lors d'une combustion à haute température ;

- Les NOx combustibles, issus de l'oxydation de l'azote lié de façon organique dans les combustibles ;

Tandis que le CO<sub>2</sub> provient de deux sources complémentaires :

- La dépense d'énergie liée à la nécessité de produire de très hautes températures pour réaliser le processus physicochimique.
- Le phénomène de transformation du calcaire (CaCO<sub>3</sub>) sous l'effet de la chaleur en chaux (CaO) et en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Plus de 60 % des émissions de CO<sub>2</sub> lors de la fabrication de ciment proviennent de cette « décarbonatation ».

Certifiée ISO 14 001 et ISO 9 001, la cimenterie de Ras El Ma travaille dans le plus strict respect des exigences environnementales, notamment par la mise en place de systèmes de dépoussiérage performants, d'un réseau d'assainissement moderne et d'un dispositif renforcé de prévention et de lutte contre les incendies.

La gestion de l'environnement de l'usine est assurée par une équipe professionnelle qui s'appuie sur les outils suivants :

- Équipements de dépoussiérage et de protection de l'environnement.
- Appareillage de contrôle des émissions.
- Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de l'usine.
- Formation continue et sensibilisation des collaborateurs et des sous-traitants.

Le volet protection de l'environnement se matérialise également par l'installation d'équipements portant la capacité de traitement des déchets de 24 000 tonnes grâce aux technologies de traitement des déchets qui sont mises en place.

La limitation de ces émissions par l'utilisation des fluffs pourrait contribuer à :

- Eviter leur impact négatif sur les êtres humains, animaux, plantes aussi bien que sur l'environnement.
- Se conformer aux limites locales d'émissions.
- Eviter une perte de crédibilité et de représentation en cas de fortes émissions.

- Eviter des réductions de production ou même des arrêts d'équipements pour dépassement des limites.

A l'issu de ces analyses, et d'après les études de faisabilité technique et financière l'amélioration de quelques paramètres est jugée cruciale.

#### IV. Paramètres à améliorer

Après avoir déterminé la configuration optimale du mélange de combustibles à injecter en se basant sur les résultats obtenus à partir de notre étude, et en déduisant que l'utilisation de petcoke et des fluffs comme étant des éléments majoritaires donne les meilleurs résultats en termes de consommation calorifique, des émissions et de coûts.

Les paramètres qui influencent cette consommation calorifique seront définis, ainsi des actions d'améliorations sur ces paramètres seront recommandées afin de mettre en œuvre une installation de dosage permettant d'atteindre notre objectif.

##### IV. 1. Modules du cru

###### A. 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),
  - Augmentation de la teneur en chaux libre,
  - C<sub>3</sub>S augmente (par conséquent résistance du ciment),

- Si le F.S.C est faible ( $\ll 100$ ), 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)
- Baisse de  $C_3S$  et augmentation de  $C_2S$ . Il y a tendance à formation des boulets du clinker dans le four

### **B. 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.

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

### **C. 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 MAF est faible, la viscosité de la phase fluide diminue ;
- Pour les  $MAF < 1.65$  il ne se forme plus de phase  $C_3A$  ;

- Plus MAF est élevé Plus la proportion d'aluminate est grande plus la phase liquide est visqueuse et plus la température de clinkérisation sera élevée ;

## **IV.2. Finesse du cru**

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.

## **IV.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  $1250\text{ }^{\circ}C$ , 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 :

$$PL = 3 AL_2O_3 + 2,25 Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O$$

\*Si les fondants ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 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  $\text{C}_3\text{S}$  formé peut se décomposer diminuant ainsi la résistance du clinker.

#### **IV.4. Fluorine**

La fluorine  $\text{CaF}_2$  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.

#### **IV.5. Airs faux**

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.

- Si le taux d'O<sub>2</sub> 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 LafargeHolcim.

- Si le taux d'O<sub>2</sub> 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.

#### **IV.6. Précalcinateur**

Il semble opportun de contrôler et maintenir :

- 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

#### **IV.7. 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)
- Les pertes d'air du ventilateur du refroidissement
- Récupération d'air stable

➤ **La zone de cuisson**

Il faut contrôler :

- La température de la zone de cuisson - La température du four
- Le pourcentage de phase liquide
- La vitesse de rotation du four
- Les émissions du four NOx
- La combustion et la cuisson
- L'état de la flamme
- Le transport de combustibles
- La qualité du clinker

#### **IV.8. Amélioration du circuit des AFR**

Comme nous l'avons précité, la tombée des AFR dans le double clapet engendrera deux problèmes :

- L'infiltration de l'air faux avec la matière entrante.
- Le bouchage causé par la matière.

Nous recommandons de :

- Remplacer le double clapet par une simple goulotte avec deux déflecteurs et un sas rotatif (figure).
- Augmenter les performances du doseur à bande.

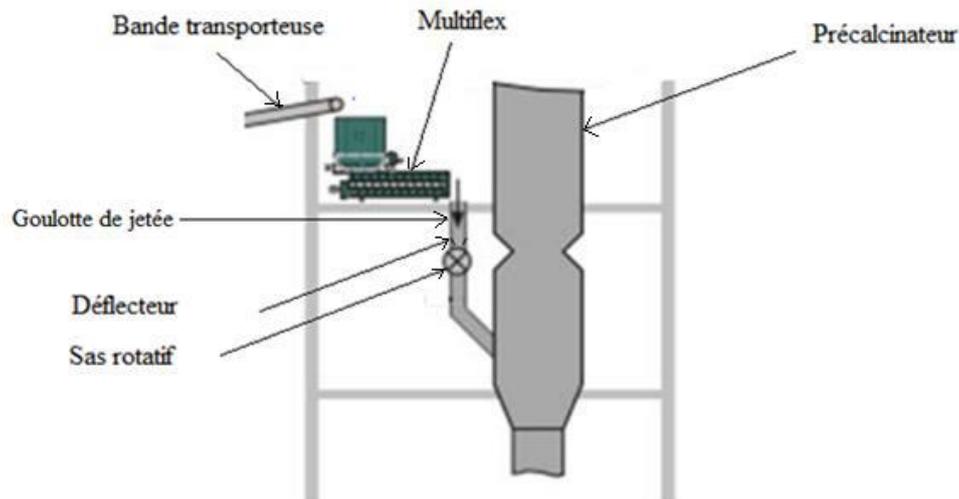


Figure 16: Modification du circuit par remplacement du double clapet par un sas rotatif

### - Sas rotatif

Le sas rotatif est un dispositif mécanique compact conçu pour la décharge de la matière en continu grâce à ses aubes.

Le sas rotatif offre les avantages suivants :

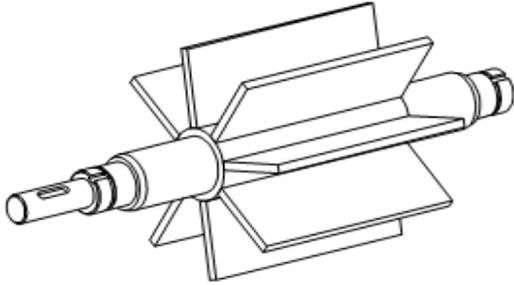
- Une utilisation simple.
- Un contrôle du débit
- Une excellente étanchéité.

Cependant, un sas rotatif doit néanmoins surmonter quelques limitations qui peuvent affecter son efficacité :

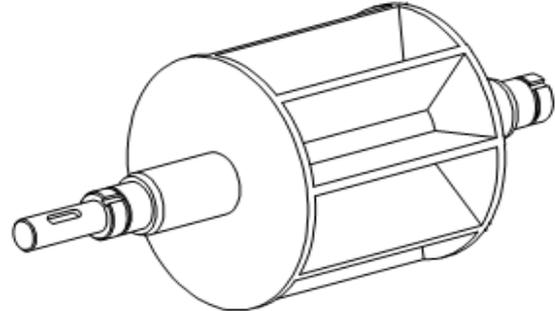
- La vitesse de rotation doit être assez petite dans l'ordre de 10-30 tr/min.
- La matière ne doit pas s'accrocher aux aubes par crainte de blocage.
- Le sas rotatif doit assurer une bonne marche malgré les contraintes imposées par le produit.
- Le matériau employé pour la construction du sas doit résister au régime dynamique à une température de 850°C (température régnante dans le précalcinateur).
- Un jeu fonctionnel doit être présent pour que la dilatation n'empêche pas la rotation du sas.

Il existe deux types de sas : ouvert et fermé (figure).

Type ouvert



Type fermé



*Figure 17: les deux types de sas rotatifs*

D'après le présent travail, il serait recommandé d'utiliser le type ouvert car un rotor de type fermé a une surface de contact limitée et causera sans doute des blocages lors de l'utilisation des pneus.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'optimisation le mélange de combustibles dans le four de la cimenterie LafargeHolcim-Fès, a commencé par une analyse de la problématique du projet tout en décrivant les différents combustibles utilisés dans l'usine le coke de pétrole, les grignons d'olive, les pneus et les fluffs.

Etant donné que la diminution de la consommation calorifique et la réduction des coûts d'énergie étaient le grand souci de la société LafargeHolcim ; ce travail avait pour but d'optimiser le mélange de combustibles et de trouver la meilleure configuration qu'elle soit performante et peu coûteuse engendrant une moindre émission en gaz à effet de serre.

Suite à l'étude générale des différents constituants de l'installation de dosage des AFR et à l'aide de l'outil FMO,3 scénarios différents ont été établis, contenant l'un des AFR majoritairement. L'impact de ces scénarios sur le cout de production, l'efficacité énergétique et sur l'environnement a été comparé à celui du petcoke seul étant le combustible utilisé actuellement.

A l'issu des résultats obtenus, des recommandations ont été proposées afin de réduire la facture et d'améliorer l'efficacité énergétique et qui consistent en:

- L'optimisation de mélange de combustibles ;
- L'analyse des différents éléments influençant la consommation calorifique et le coût énergétique ;
- Amélioration de circuit de dosage des combustibles alternatifs.

La réalisation de ce projet a montré que l'optimisation de la consommation d'énergie passe par un travail multidisciplinaire comportant les volets techniques, administratifs, et commerciaux constituant ainsi un véritable challenge concernant l'optimisation de la consommation énergétiques et ce pour assurer une meilleure rentabilité