

Faculté des Sciences et Techniques de Fès



Département de Génie Industriel



LST de Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes

Sujet:

**Optimisation du refroidisseur four 2 en terme
de récupération des gaz chauds et de
refroidissement du clinker**

Lieu : LAFARGE ciment ~ Meknès

Référence : 09/11GI

Préparé par :

- ~ Laâmarti Anas
- ~ Lakramti Aïman

Soutenu le 15 Juin 2011 devant le jury composé de :

- Pr. L'h. Hamedi (Encadrant FST)
- Pr. M. Cherkani (Encadrant FST)
- Pr. H. Bine el Ouidane (Examineur)
- Mr. O. Chaik (Encadrant Société)

Remerciement

Après nos louanges à Dieu, et au terme de notre stage de fin d'études, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à Monsieur CHOUAR, Directeur de Lafarge Ciments - Usine de Meknès et Monsieur ZOUAK, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques - Fès, pour nous avoir accordé l'opportunité d'approfondir nos connaissances professionnelles.

Nous présentons nos sincères remerciements à notre parrain de stage M. Omar CHAIK, d'avoir accepté, d'aussi bonne grâce, d'encadrer ce présent projet, et aussi pour la qualité de son encadrement, ses précieux conseils, ses fructueuses orientations et son soutien tout au long du déroulement de ce stage qui nous ont permis, grâce au sujet que nous avons développé, d'enrichir nos connaissances théoriques et pratiques.

Nos vifs remerciements vont aussi à notre encadrant à la FST-Fès Mr. L'h. HAMEDI, pour sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils, et l'intérêt manifesté à ce projet.

Notre profonde gratitude s'adresse également à Messieurs N.TAIBI et A. BOUCHAMA pour leurs conseils, leur patience et leur sympathie.

Merci également à tout le personnel de la société Lafarge - Usine de Meknès et tout ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à accomplir ce projet.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui nous ont honorés, ainsi qu'au corps administratif et professoral de la Faculté des Sciences et Techniques, Particulièrement le corps enseignant du département de Génie Industriel.

Sommaire

INTRODUCTION.....	07
PARTIE 1 : Présentation de LAFARGE.....	08
1.1 LAFARGE Groupe	09
1.2 LAFARGE Maroc	09
1.2.1 Historique	09
1.2.2 Organigramme LAFARGE Maroc.....	10
1.2.3 Usine de Meknès.....	10
1.3 Les qualités de ciment produit à Lafarge de Meknès	12
1.4 Sécurité et Environnement	12
1.5 Qualité.....	13
1.6 Le service Procédé.....	14
PARTIE 2 : Procédé de Fabrication.....	15
2.1 Carrière	17
2.2 Concassage	18
2.3 Pré-Homogénéisation	18
2.4 Broyage Cru	19
2.5 L'Homogénéisation	19
2.6 Cuisson	20
2.6.1 La Tour de préchauffage	20
2.6.2 Le Four rotatif	21
2.6.3 Le Refroidisseur	21
2.7 Broyage Cuit	22
2.8 Ensachage et Expédition	23
PARTIE 3 : Contexte et Problématique.....	24
3.1 Contexte :.....	25
3.1.1 Description du refroidisseur	25
3.1.2 Fonctionnement du Refroidisseur	27
3.1.3 Les Paramètres de marche du Refroidisseur	28
3.1.4 Matériels et Outillages de mesure.....	30
3.2 Problématique :.....	32
PARTIE 4 : Etude et Analyse de la Problématique.....	33
4.1 Introduction	34
4.2 Bilan Thermique	34
PARTIE 5 : Démarche de résolution	42
5.1 Proposition	43
5.2 Actions Appliquées	43
5.3 Résultats et Utilité.....	45
5.4 Suggestions	48
CONCLUSION.....	49

liste des figures

Figure 1 : Répartition du résultat d'exploitation par zone géographique.....	9
Figure 2 : Organigramme de LAFARGE Maroc.....	10
Figure 3 : Répartition des ventes en 2009.....	11
Figure 4 : Etapes de production du ciment.....	16
Figure 5 : Carrière.....	17
Figure 6 : Etapes de l'abattage et du transport.....	17
Figure 7 : Etapes de concassage, transport et stockage.....	18
Figure 8 : Hall de pré-homogénéisation	18
Figure 9 : Description du broyage du cru.....	19
Figure 10 : Silo d'homogénéisation.....	19
Figure 11 : Description de la ligne de cuisson.....	20
Figure 12 : Différents flux dans la tour de préchauffage.....	20
Figure 13 : Four rotatif.....	21
Figure 14 : Description du refroidisseur.....	22
Figure 15 : Etapes de broyage cuit.....	22
Figure 16 : Broyeur (broyage cuit).....	22
Figure 17 : Produit fini (sacs de ciment).....	23
Figure 18 : Expédition ciment.....	23
Figure 19 : Matières utilisées dans la production du ciment.....	23
Figure 20 : Description du refroidisseur.....	25

Figure 21 : Grille.....	25
Figure 22 : ventilateur.....	26
Figure 23 : fonctionnement du refroidisseur.....	27
Figure 24 : principe de refroidissement du clinker.....	27
Figure 25 : Tube de Pitot / tube de Berri (matériel de mesure).....	30
Figure 26 : Sonde de température (matériel de mesure).....	31
Figure 27 : Anémomètre (matériel de mesure).....	31
Figure 28 : différents paramètres du bilan thermique.....	35
Figure 29 : Graphe comparant (bilan - performance) les températures des différents paramètres.....	37
Figure 30 : Graphe comparant (bilan - performance) les rendements de récupération et de refroidissement	37
Figure 31 : Comparaison des débits de soufflage (mesures - valeurs nominales).....	39
Figure 32 : Comparaison des débits de soufflage (mesures - salle de contrôle)....	39
Figure 33 : Comparaison des pressions chambres (mesures- salle de contrôle).....	40
Figure 34 : Débits des ventilateurs avant et après action.....	44
Figure 35 : Schéma du registre air exhaure - ventilateur 3	45
Figure 36 : Amélioration des températures des paramètres du refroidisseur après actions.....	46
Figure 37 : Amélioration des rendements du refroidisseur après actions.....	46

liste des tableaux

Tableau 1 : fiche technique de LAFARGE Meknès.....	11
Tableau 2 : Les différents types de ciment produit par Lafarge Meknès.....	12
Tableau 3 : Différents paramètres du refroidisseur.....	36
Tableau 4 : Débits des cinq ventilateurs.....	38
Tableau 5 : Comparaison des pressions chambres (mesures- salle de contrôle).....	40
Tableau 6 : composition clinker.....	41
Tableau 7 : Débits des ventilateurs avant et après action.....	43
Tableau 8 : amélioration des paramètres du refroidisseur après actions.....	46

Introduction

L'industrie cimentière s'est engagée au cours de ces dernières années dans d'importants investissements de telle sorte à augmenter et diversifier la production afin de satisfaire le besoin croissant du marché et réduire l'impact de la forte concurrence.

Pour atteindre cet objectif le groupe LAFARGE a opté pour la mise en place des technologies rigoureuses et efficaces en se dotant des outils de dernière génération adaptés.

Le refroidisseur à grille utilisé dans l'industrie cimentière a pour fonction de refroidir le clinker d'une façon uniforme, en récupérant le maximum des gaz chauds. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'étude qui vise à examiner le fonctionnement du refroidisseur.

L'amélioration des performances du refroidisseur à grille exige un plan de travail, qui commence par une visite générale de l'usine afin de localiser dans quelle étape du procédé de fabrication s'inscrit notre projet, puis une étude détaillée du refroidisseur permettant de déterminer ses principaux paramètres, pour établir un bilan thermique (aéraulique) fondé sur des mesures prises sur site, dans le but de repérer les écarts (mesures - normes) et trouver les actions convenables à améliorer le rendement du refroidisseur.

PARTIE 1

PRÉSENTATION

DE

LAFARGE

1.1 LAFARGE Groupe :

LAFARGE est un leader mondial des matériaux de constructions, présent dans plus de 77 pays dans le monde et avec un chiffre d'affaire dépassant 17 Milliard d'Euro, LAFARGE possède plus de 67% du part de marché mondial. Le groupe inscrit sa croissance dans une stratégie de développement durable : son savoir-faire concilie l'efficacité industrielle, la création de valeur, la protection de l'environnement, le respect des hommes et des cultures et l'économie des ressources naturelles et de l'énergie. Les principaux produits sont le ciment, Granulats & Béton, et Plâtre.



Figure 1 : Répartition du résultat d'exploitation par zone géographique (31/12/2009)

1.2 LAFARGE Maroc :

1.2.1 Historique :

En 1995, LAFARGE s'est associé de façon paritaire avec la Société Nationale d'Investissement (SNI) afin de créer LAFARGE Maroc.

L'année 1996 a vu la réalisation d'un projet d'acquisition qui a permis à Lafarge Maroc de devenir le pôle fédérateur d'un groupe comportant 4 cimenteries: Cinouca à Bouskoura, Cadem à Meknès, Cimenterie Tanger et Cementos Marroquies de Tétouan.

Ensuite Cinouca et Cadem ont été fusionné pour devenir LAFARGE Ciments. Et en janvier 2000 les unités de Tanger et Tetouan ont été fusionné pour devenir Lafarge Cementos.

Nommé comme premier cimentier Marocain, Lafarge Maroc assure une capacité de production supérieure à 4,5 millions de tonnes par an et détient 40,6 % de part de marché en 2008 vers 41% en 2009 et les ventes ont progressé de 4,2%. Son chiffre d'affaires caracoler en hausse de 10,7% à 5,441 MDH et son résultat d'exploitation courant bondir de 19,3% à 2,734 MDH.

1.2.2 Organigramme LAFARGE Maroc

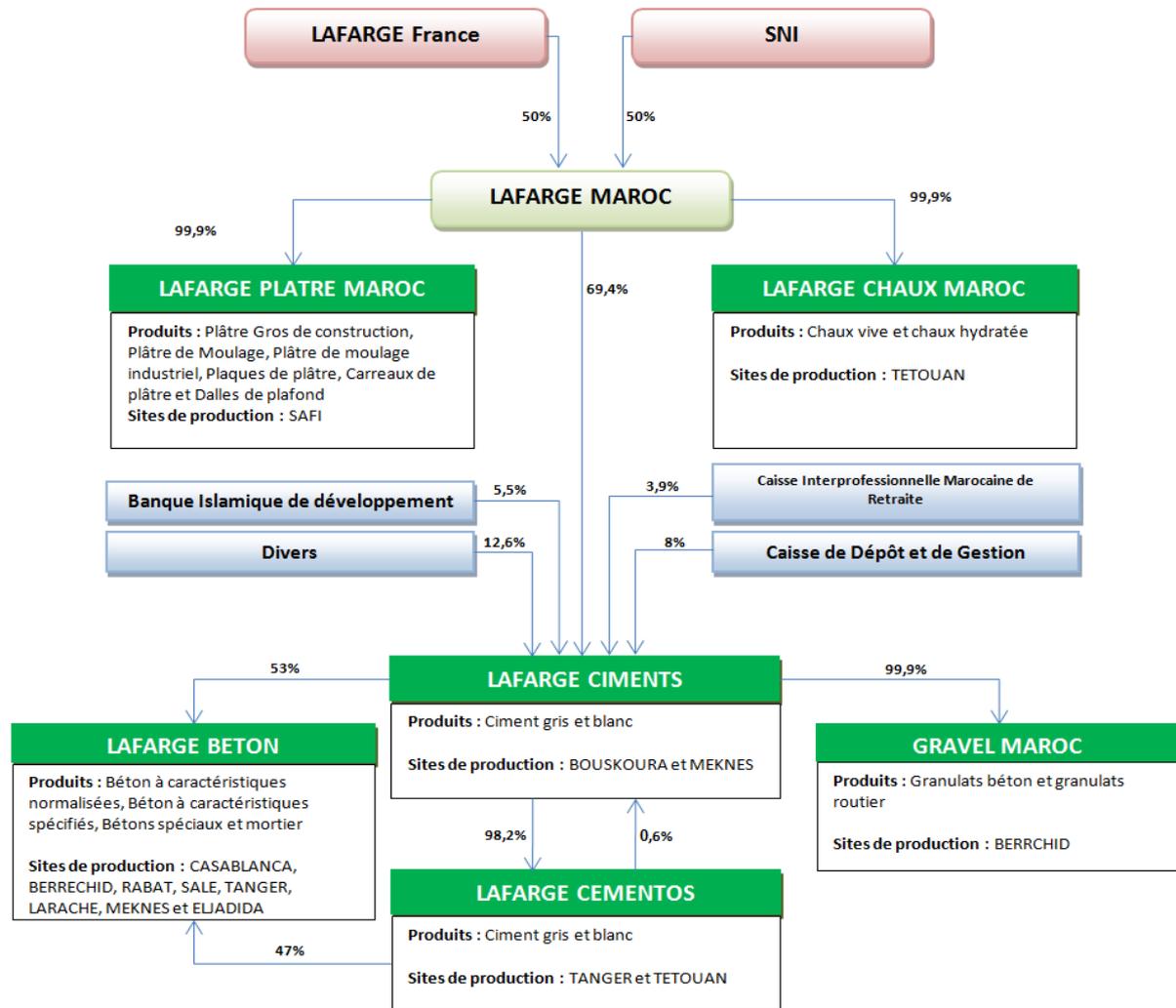


Figure 2 : Organigramme de LAFARGE Maroc

1.2.3 Usine de Meknès

La cimenterie à Meknès fut construite au début des années 50. En 1952, l'usine démarra la production de ciment au niveau du four 1 seulement, la capacité de ce four était de 400 t/j. Deux ateliers de broyage furent construits dans les années 70, puis un deuxième four en 1971, avec une capacité de 650 t/j.

La cimenterie devint une entreprise de Lafarge le 1^{er} janvier 1996. Dans les années 90 furent construites les deux tours E.V.S et le précalcinateur du four 1, ce qui eu pour effet d'augmenter la capacité de production des deux tours. En 2001, un nouveau broyeur fut construit. Enfin, depuis janvier 2004, l'usine a démarré l'utilisation d'un autre combustible : les pneus.

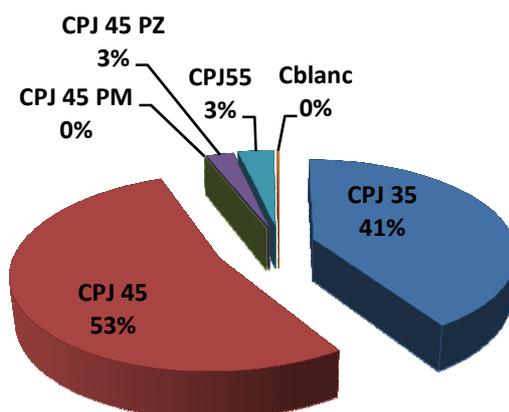


Figure 3 : Répartition des ventes en 2009

Dénomination	LAFARGE CIMENTS (Usine de Meknès)
Siège social	Km8, route de Fès, BP : 33 Meknès Standard : 52-26-44/45/46 Fax : direction usine : 54-92-94 Service technique : 54-93-07 Service commercial : 54-93-05
Nature Juridique	Société anonyme.
Capital social	476 430 500 DH
Répartition du capital	LAFARGE 50% ONA 50%
Produits fabriqués	Ciment portland avec ajouts CPJ45 en Sac et en Vrac. Ciment portland avec ajouts CPJ35 en Sac Ciment CPA 55
Effectif De Personnel	19 Cadres, 13 Agents de maîtrise supérieurs, 14 Agents de maîtrise moyens, 29 Agents de maîtrise simples, 23 Employés, 37 Chefs d'équipe, 119 Ouvriers qualifiés, 17 Manœuvres

Tableau 1 : Fiche technique de LAFARGE Meknès

1.3 Les qualités de ciment produit à Lafarge de Meknès :

Il existe trois catégories principales de ciment. Le 1^{er} étant le ciment portland artificiel CPJ55. Les deux autres types sont les ciments portland composés CPJ35 et CPJ45.

Comme on peut voir sur le tableau ci-dessous, les quatre types de ciment produit par Lafarge se différencient par les pourcentages et le type des ajouts au clinker.

	CPJ 35	CPJ 45 Pzz	CPJ 45	CPJ 55
Calcaire	35.60 %	8.5 %	24.00 %	0.00 %
Cendre volantes	3.21 %	0.00 %	6.25 %	0.00 %
Gypse	2.80 %	6.5 %	3.14 %	5.64 %
Pouzzolane	0.00 %	16.0 %	0.00 %	0.00 %
Clinker	58.39 %	69.0 %	66.34 %	94.36 %

Tableau 2 : Les différents types de ciment produit par Lafarge Meknès

1.4 Sécurité et environnement

La sécurité est une priorité absolue pour LAFARGE. Le groupe a mis en œuvre une politique drastique pour ses collaborateurs.

L'objectif de LAFARGE est d'être une entreprise parmi les plus sûres au monde grâce à sa nouvelle politique visant à atteindre zéro accident mortel. Pour atteindre cet objectif et limiter au maximum les arrêts de travail, LAFARGE :

- Informe et forme ses collaborateurs et sous-traitants aux risques liés à leur activité
- Veille à l'application systématique des standards de sécurité
- Identifie les bonnes pratiques, les communique et les généralise à tous les sites.

L'usine LAFARGE ciments de Meknès s'est engagée au cours de ces dernières années dans d'importants investissements dans le domaine de la protection de l'environnement. La volonté de croissance de ce groupe s'inscrit dans le cadre d'une stratégie de développement durable ayant pour but de réduire l'impact de ses activités sur l'environnement.

Les efforts de toute l'équipe de l'usine ont été couronnés, en août 2002, par la certification conjointe du système de management environnementale de l'usine NM ISO 14001 par l'AFAQ.

1.5 Qualité

LAFARGE a toujours fixé comme but d'être constamment en accord avec les exigences du marché et de continuer de mettre à disposition de ses clients des ciments de qualité élevée.

Le contrôle permanent par ordinateur de toutes les étapes de production dans l'usine permet de réagir par des réglages fins dès qu'une déviation même modeste, requiert une intervention. Grâce à l'optimisation constante des processus et à la mise en œuvre des nouvelles technologies, les ingénieurs et les techniciens peuvent assurer la régularité du processus de production, une condition pour garantir le niveau qualitatif élevé du produit.

Des échantillons prélevés sur les matières premières, les combustibles, la farine crue et le clinker permettent aux chimistes de contrôler l'ensemble du processus de production et de garantir aussi la qualité à la fois élevée et régulière du produit final.

L'usine LAFARGE Meknès possède des laboratoires d'essais physiques et chimiques. Ces essais portent sur :

- Les caractéristiques mécaniques : essais sur la résistance à la compression
- Les caractéristiques physiques : mesure de la finesse ainsi que d'autres grandeurs
- Les caractéristiques chimiques : évaluation du pourcentage de SO_3 , MgO , Cl , ...

Qualité d'un bon ciment

Pour produire le ciment avec des caractéristiques de haut niveau, il faut bel et bien s'intéresser aux différents facteurs, mesures, indicateurs et actions qui influent sur la qualité du produit final pendant le processus de production :

- Le cru doit être suffisamment fin pour réagir dans le four.
- La broyabilité du clinker dépend de la finesse du cru, de sa chimie, du mode de cuisson et de la vitesse de refroidissement.
- L'augmentation de C3S au détriment du C2S améliore la broyabilité du clinker.
- Zone de cuisson courte avec une température élevée conduit à un clinker plus facile à broyer.

1.6 Le service Procédé

La finalité recherchée par les ingénieurs et les techniciens est la stabilité des process, pour cela il est nécessaire de comprendre pourquoi un indicateur donné indique une variation quelconque. L'ensemble des process est réparti en atelier, les différents ateliers sont : BC1, BC2, BK3, BK4, BK5, LM17, F1, F2.

Le service procédé organise des réunions tous les matins, afin de rappeler les actions de la veille, ses rappels servent à analyser les résultats de la veille concernant le taux d'émission de la poussière, le rendement des fours ...

Ce service s'inspire souvent de la salle centrale qui assure le contrôle à distance de différents indicateurs (la température dans les fours, l'état des broyeurs, les ventilateurs) aidant à maintenir la production dans son état normal. En cas de détection d'un problème (arrêt d'un four, embauchage d'un cyclone ...) les ingénieurs et les techniciens sont menés à le résoudre.

Conclusion

Cette première partie nous a permis de présenter LAFARGE, et de décrire les rôles de quelques services de grande importance tels que la Qualité, l'Environnement, la Sécurité et le service procédé où on a effectué notre stage.

PARTIE 2

PROCÉDÉ

DE

FABRICATION

Afin d'aboutir au produit final (le ciment) les matières premières subissent plusieurs opérations de transport, de cuisson et de transformation chimique.

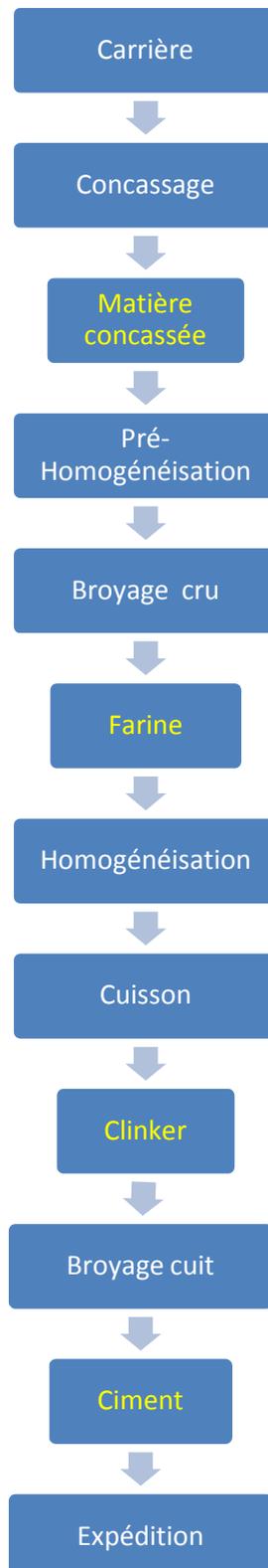


Figure 4 : Etapes de production du ciment

2.1 Carrière :



Figure 5 : Carrière

L'usine dispose de deux carrières pour assurer son approvisionnement en matières premières. L'une est située à 5Km de l'usine et couvre une surface de 150ha, la seconde est à 1Km de l'usine et couvre une superficie de 50 ha. Les carrières destinées à la production de la matière première du ciment fournissent deux éléments essentiels : le calcaire qui est très riche en carbonate de calcium (CaCO_3), et le schiste qui contient des teneurs importantes de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde du fer (Fe_2O_3). Ces matières premières sont extraites de la carrière par abattage.

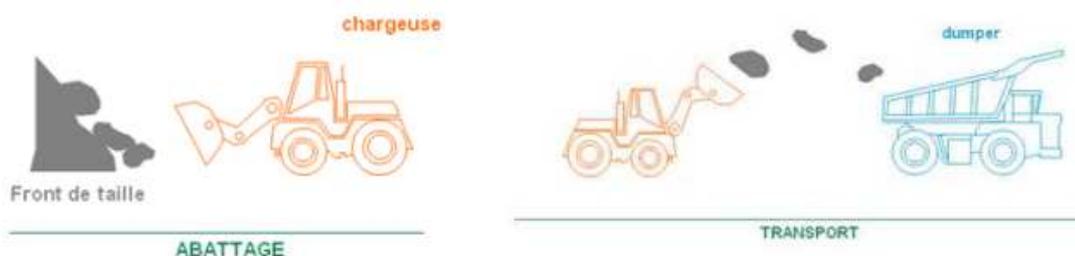


Figure 6 : Etapes de l'abattage et du transport

2.2 Concassage :

Les matières premières et les matières d'ajout sont concassées afin de réduire la dimension des blocs en fragments de faibles dimensions en vue d'optimiser et de faciliter leur stockage et leur manutention.

Les matières premières, après concassage, sont transportées à l'usine par un tapis roulant où elles sont stockées et homogénéisées.

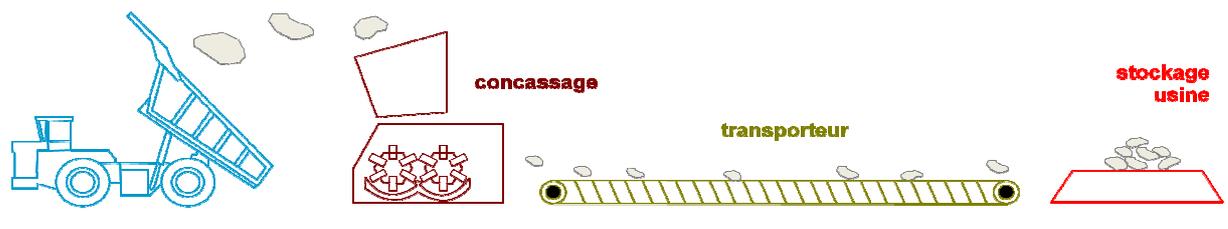


Figure 7 : Etapes de concassage, transport et stockage

2.3 Pré-homogénéisation :

Cet atelier sert à stocker et à mélanger la matière issue de la Carrière.

La pré-homogénéisation est une constitution d'un stock intermédiaire entre le concassage et l'atelier du broyage, comme son nom l'indique on essaie d'homogénéiser le calcaire, la silice et l'alumine à l'avance avant son introduction au broyeur cru, afin d'obtenir un cru régulier.

Cette phase de pré-homogénéisation consiste à créer dans un hall un mélange *pré-homogène* en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle.

Le produit arrivant du parc de pré-homogénéisation et du parc des ajouts est stocké dans des trémies. Suivant les pourcentages donnés par le laboratoire d'analyse, on procède au mélange du calcaire, de l'argile et autres ajouts.

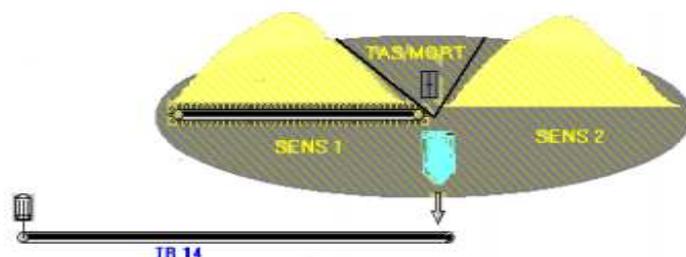


Figure 8 : Hall de pré-homogénéisation

2.4 Broyage Cru :

Les matières premières doivent être **finement broyées** pour faciliter les **réactions chimiques** au cours de la cuisson dans le four. La qualité du produit issu de cette étape exige la maîtrise des pourcentages des matières entrant au broyeur. Elles passent donc par les doseurs qui alimentent le broyeur sécheur. La fonction de séchage est nécessaire pour diminuer le taux d'humidité de la matière.

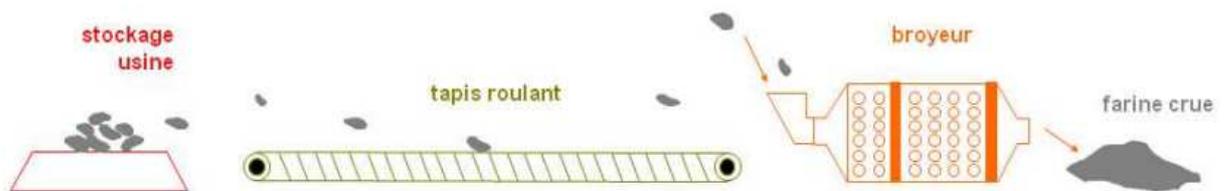


Figure 9 : Description du broyage du cru

En plus du séchage et de la fragmentation, le broyeur assure le mélange des différents minerais apportés par les matières premières et les ajouts de correction.

2.5 L'homogénéisation :

Le cru provenant des broyeurs est ensuite acheminé par des aéroglesseurs pour être stocké dans les silos d'homogénéisation, qui assurent à la fois le stockage et l'homogénéisation de la farine. Leur but est de réaliser un mélange final de la farine pour gommer les dernières dérives chimiques présentes.



Figure 10 : Silo d'homogénéisation

2.6 Cuisson :

La ligne de cuisson comporte trois équipements essentiels :

- La tour de préchauffage (séchage+déshydratation+décarbonatation 20 à 30 %).
- Le four (décarbonatation 70 à 80 % + clinkérisation).
- Le refroidisseur (trempe + refroidissement clinker).

La farine crue est préchauffée puis passe au four : une flamme atteignant 2000 °C porte la matière à 1500 °C, avant qu'elle ne soit brutalement refroidie par soufflage d'air. Après cuisson de la farine, on obtient le clinker, matière de base nécessaire à la fabrication de tout ciment.

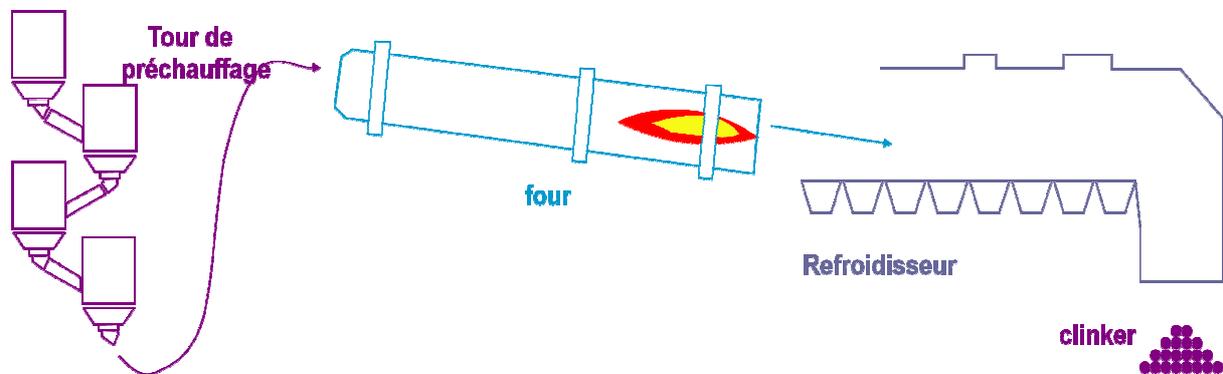


Figure 11 : Description de la ligne de cuisson

2.6.1 La Tour de préchauffage :

C'est un échangeur à chaleur à voie sèche constitué de quatre étages .Elle permet d'effectuer un échange thermique à contre courant entre les gaz chauds (850°C) sortant du four et la farine froide (50 à 60°C). Les gaz parcourent l'édifice de base en haut alors que la matière le parcourt en sens inverse.



Figure 12 : Différents flux dans la tour de préchauffage

La tour est liée avec le four via la **boite à fumée**.

2.6.2 Le four rotatif :

C'est une grande enceinte circulaire rotative dans laquelle on injecte le combustible sous pression pour produire une flamme. Il est constitué d'une virole en acier et protégé par un revêtement intérieur en matériaux réfractaires.

Le four rotatif est un échangeur de chaleur à contre courant dans lequel la flamme et les gaz récupérés du refroidisseur cèdent leur chaleur à la farine qui arrive en sens inverse



Figure 13 : Four rotatif

La jonction entre le four et le refroidisseur est assurée par le **capot de chauffe**.

2.6.3 Le Refroidisseur :

Situé à l'aval du four, le refroidisseur est à grilles horizontales. Le refroidissement est assuré par 5 ventilateurs. L'air produit par ces ventilateurs est insufflé sous les grilles par des chambres.

Le refroidisseur a un triple rôle :

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

Le clinker sort avec une température dépassent 1450°C et tombe dans le refroidisseur pour subir une trempe rapide afin de figer les C_3S et de les empêcher se transformer en C_2S , chose qui influe sur la qualité et la composition du clinker.

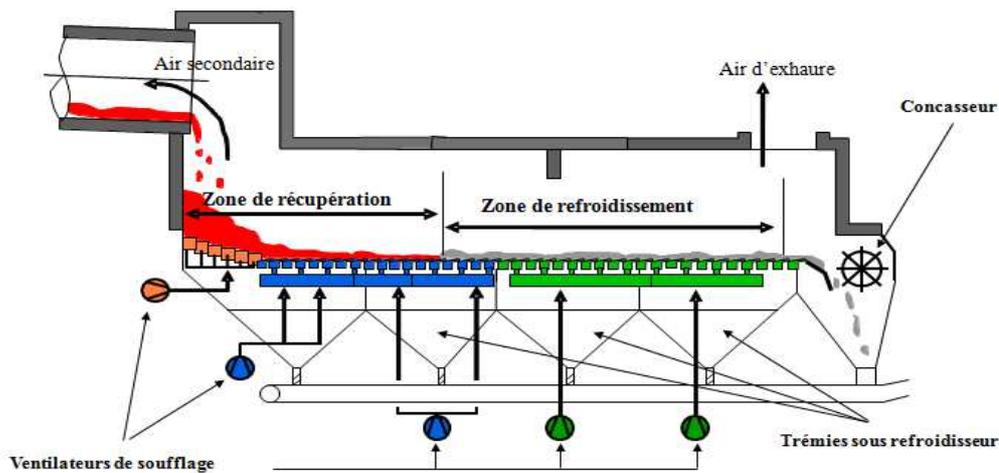


Figure 14 : Description du refroidisseur

2.7 Broyage cuit :

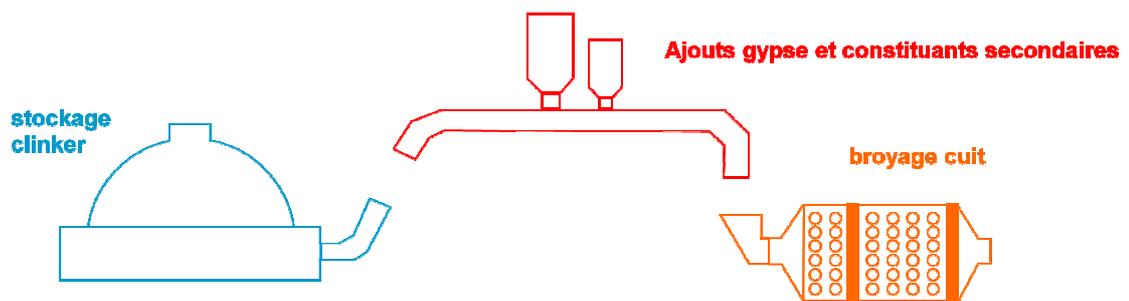


Figure 15 : Etapes de broyage cuit

Après refroidissement, les granulats de clinker sont ensuite broyés avec addition de gypse. Cette addition a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique (3CaO , Al_2O_3) et aussi de conférer au ciment des propriétés spécifiques correspondant aux différentes qualités des ciments cités auparavant (CPJ35, CPJ45, CPA55).



Figure 16 : broyeur (broyage cuit)

2.8 Ensachage et expédition :



Figure 17 : produit fini (sacs de ciment)

A la sortie du broyeur, le ciment est orienté vers les silos de stockage et de livraison. La livraison du ciment s'effectue soit en sacs, soit en vrac, comme il est présenté sur la figure ci-dessous :

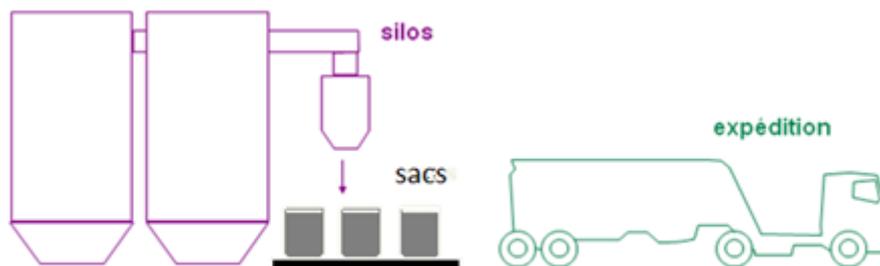


Figure 18 : expédition ciment

Conclusion

Dans cette partie, nous avons donné une brève présentation du procédé de fabrication du ciment. Et tout particulièrement la ligne Cuisson (tour, four et refroidisseur).



Figure 19 : Matières utilisées dans la production du ciment

PARTIE 3

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

3.1 Contexte :

3.1.1 Description du refroidisseur :

Situé en aval du four, le refroidisseur est le lieu d'échanges thermiques entre le clinker et l'air insufflé dans l'unité de cuisson, il se compose de : une grille, quatre chambres sous-grille, cinq ventilateurs, concasseur interne, trainasse.

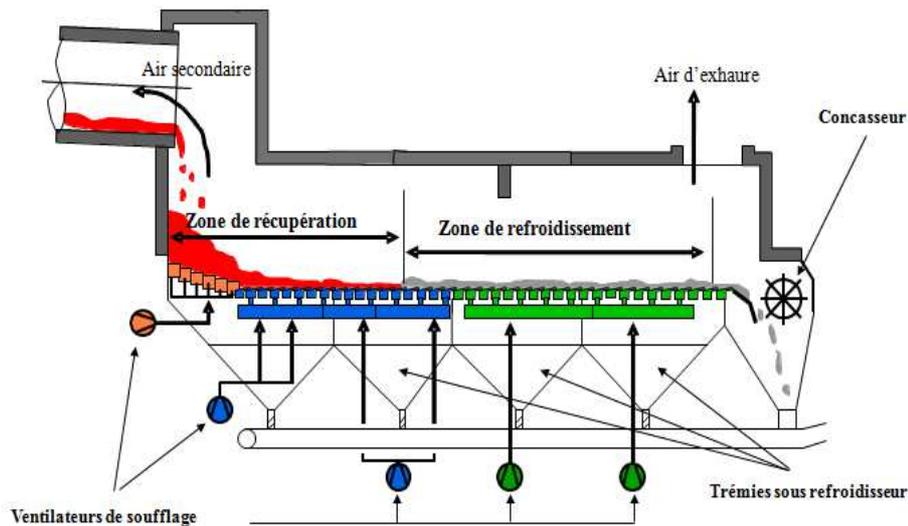


Figure 20 : description du refroidisseur

a°/ La Grille :

La grille est un assemblage de plaques (rangées fixes et rangées mobiles) en acier réfractaire, ces dernières sont percées de trous afin de laisser passer l'air de refroidissement.

La grille assure 2 fonctions :

- la manutention : un mouvement de va et vient, destiné à faire avancer le clinker.
- le refroidissement du clinker.



Figure 21 : Grille

b° / Les Ventilateurs :

Le ventilateur est situé dans un circuit gazeux, il est donc traversé par des gaz. Il transmet une partie de l'énergie qu'il reçoit de son moteur d'entraînement pour mettre ces gaz en mouvement.

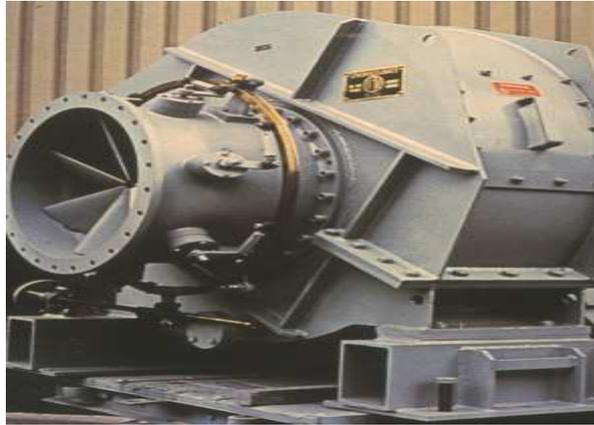


Figure 22 : ventilateur

c° / Chambres sous-grille :

Sous la grille, se trouve 4 chambres, qui permettent de répartir le débit d'air soufflé à des pressions différentes.

Au dessous de chaque chambre, se situe une trémie munie d'un clapet qui assure le passage du clinker refroidi en garantissant le passage du maximum d'air soufflé vers la grille.

d° / Concasseur interne :

Pour permettre la manutention, les gros blocs de clinker sont fractionnés par un concasseur à marteau.

e° / La Traînage :

Sous le refroidisseur, le clinker issu des chambres et du concasseur est récupéré par un transporteur de masse « trainasse » afin de l'emmener vers les autres ateliers.

3.1.2 Fonctionnement du Refroidisseur :

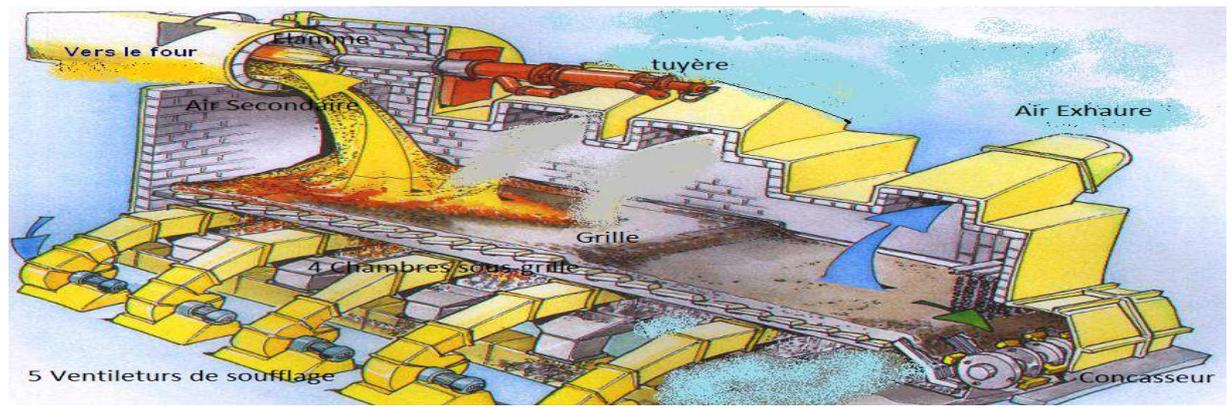


Figure 23 : fonctionnement du refroidisseur

A la sortie du four, le clinker tombe et s'étale sur la grille, il forme une couche. Cette couche est refroidie par une **trempe** (refroidissement brusque) afin de figer la composition chimique pour éviter une transformation de C_3S (alite) en C_2S (belite)



Avec CaO (la chaux) : un élément chimique qui influe sur la résistance du clinker

La couche de clinker est déplacée par le mouvement des grilles, et traversée par un courant d'air frais venant des chambres sous-grille.

Le clinker fin descend dans les trous de la grille vers les chambres alors que les autres grains de clinker à grande dimension passent par le concasseur interne.

Selon la vitesse de la grille, se forme une couche de clinker, qui influence la pression des chambres sous-grille, et en fonction de cette pression on détermine la densité de soufflage de chaque ventilateur.

Principe de refroidissement du clinker

La couche de clinker étant perméable, l'air peut circuler autour de chaque grain chaud. Au contact du grain, l'air s'échauffe par convection. En se refroidissant, cette surface appelle les calories stockées à l'intérieur de grain, la chaleur migre alors du centre du grain vers la surface par conduction, et ceci tant que la température du grain est supérieure à la température de l'air.

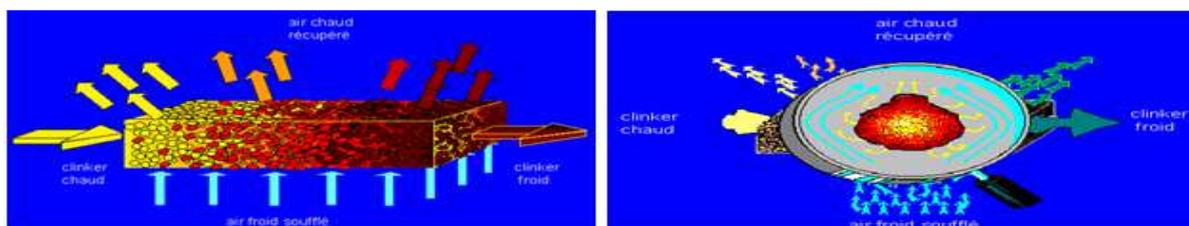


Figure 24 : principe de refroidissement du clinker

3.1.3 Les Paramètres de marche du Refroidisseur :

a°/ La température du CLINKER : on doit obtenir un clinker à la sortie du refroidisseur d'une température comprise entre 100 et 120 °C, alors qu'elle était égale à 1450 °C à l'entrée du refroidisseur (sortie four).

b°/ L'air Secondaire : c'est l'air aspiré par le ventilateur de l'EVS (échangeur à voie sèche) vers le four, et on doit récupérer le maximum de ces gaz chauds qui vont nous servir à augmenter la température dans le four et donc aider la flamme au niveau de la phase de clinkérisation. On vise une bonne récupération des thermies (calories) et donc une bonne récupération des gaz chauds (air secondaire).

c°/ L'air Exhaure : c'est l'air refoulé à l'extérieur du refroidisseur. Il est filtré afin de récupérer la matière en suspension. La température de l'air exhaure ne doit pas dépasser 300°C pour assurer un bon fonctionnement du filtre.

d°/ La pression dans la chambre 2 (en mm Courant d'Eau avec 1mmCE = 9.81Pa) : c'est elle qui règle la hauteur de couche du clinker à l'intérieur du refroidisseur. Une stabilité de la pression implique une stabilité de la hauteur de couche, tout au long du cheminement de la matière à l'intérieur du refroidisseur.

e°/ Ratio de Soufflage : égal à la somme des débits ventilateurs sur le débit clinker.

$$\text{Ratio de soufflage} = \frac{\sum Q \text{ ventilateurs}}{Q \text{ clinker}}$$

Avec **débit clinker = débit farine * 0,56**

(0,56 : un coefficient qui représente le rendement de cuisson de la deuxième ligne de production).

f° / Le coefficient d'efficacité du refroidisseur K : c'est l'interprétation mathématique du refroidisseur du clinker. En fonction du débit d'air secondaire, il permet de quantifier la qualité de récupération, ainsi il intègre l'ensemble des conditions de marche (Hauteur de couche, granulométrie du clinker et la densité de soufflage...)

$$K = \frac{1}{Q_{as}} * \ln\left(\frac{100}{100-\eta}\right)$$

Avec Q_{as} : débit d'air secondaire
 η : Rendement de récupération

g° / Rendement de récupération (%) : c'est la récupération des gaz chauds. Il dépend de l'air secondaire et de l'air soufflé.

$$\eta = \frac{100 * H_{as}}{H_{sf} + Q_{as} (C_p, \text{air souff} * T_{\text{air souff}})}$$

Avec : **H = enthalpie = débit * température * Cp**
 C_p = capacité calorifique à pression constante de l'air soufflé

Et H_{as} : enthalpie air secondaire
 H_{sf} : enthalpie sortie four

h° / Rendement du refroidisseur (%) : calculé par la relation suivante :

$$\eta' = \frac{100 * (H_{sf} - H_{sr})}{H_{sf}}$$

Avec : H_{sf} : enthalpie sortie four
 H_{sr} : enthalpie sortie refroidisseur

NB : Les relations sont extraites d'un document interne de Lafarge (fichier Excel) (voir bibliographie).

3.1.4 Matériels et Outillages de mesure :

a°/ Tube de Pitot - Tube de Strauscheib (tube de Berri) :

Ils mesurent la pression statique et la pression dynamique qui vont nous servir pour calculer la vitesse et donc le débit.

Dans le cas des gaz trop poussiéreux, on utilise le tube STRAUSCHEIB, parce qu'il possède des trous plus grand par rapport au tube PITOT.

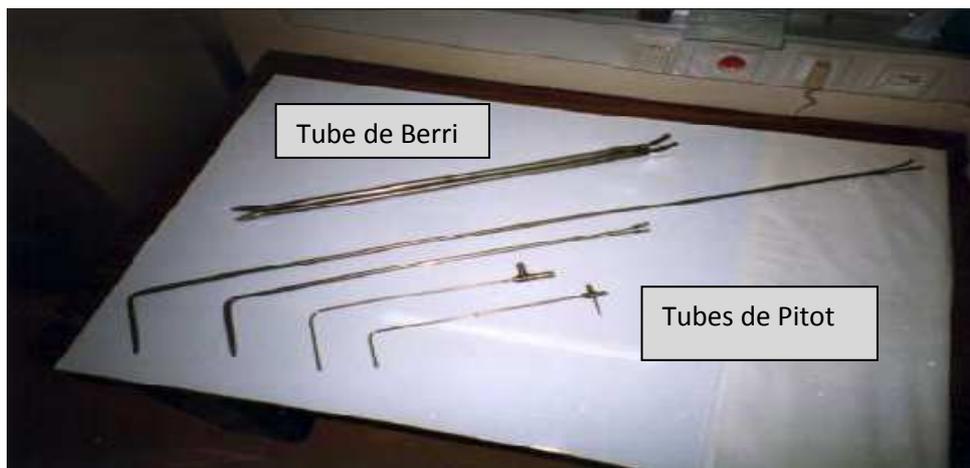


Figure 25 : Tube de Pitot / tube de Berri (matériel de mesure)

Procédure d'utilisation :

- Faire les raccordements des flexibles avec l'appareil et le tube en métal tout en respectant les polarisations + et -.
- Allumer l'appareil et choisir l'unité de mesure (mmH₂O pour notre cas)
- Ouvrir le bouchon du trou pour avoir accès à l'intérieur de la gaine.
- Introduire le tube de telle sorte que le trou au niveau du tube s'ouvre dans le sens opposé du flux.
- Positionner le tube au niveau du premier point de mesure repéré sur le tube en métal.
- Attendre que la mesure soit stable pour relever la valeur qui sera reportée sur la fiche.
- Reprendre les deux dernières étapes jusqu'à épuiser les quatre points de mesure avant de passer à un autre ventilateur.

La Sonde de température :

Elle permet de mesurer la température du clinker, d'air de soufflage du Ventilateur 3 ...



Figure 26 : Sonde de température (matériel de mesure)

Procédure d'utilisation :

- Introduire la lance pour prendre un échantillon puis verser la prise dans un seau.
- Plonger le thermocouple dans l'échantillon et attendre que la valeur se stabilise.

Anémomètre :

Les anémomètres sont utilisés pour mesurer la vitesse d'un fluide sans poussière comme l'air ambiant, ou bien l'air entrant à un ventilateur.



Figure 27 : Anémomètre (matériel de mesure)

Procédure d'utilisation:

- Choisir l'unité de mesure (m/s dans notre cas).
- Positionner l'axe de l'hélice au premier point de mesure de telle sorte que le flux puisse faire tourner les pales de l'hélice.
- Attendre que la valeur soit stable avant de la reporter sur la fiche de mesure.
- Effectuer les mêmes opérations sur tous les points de mesure avant de passer à un autre ventilateur.

3.2 Problématique

La ligne cuisson représente une phase primordiale dans la production du ciment puisqu'elle a un impact direct sur la qualité du ciment qui varie en fonction de la qualité du clinker.

Une mauvaise qualité du clinker (d'une température élevée) pose des problèmes au cours de la phase de production du ciment. Ce clinker est rejeté ou recyclé avec les matières premières ou bien mélangé (pourcentage varie de 5 à 9 %) avec un clinker de bonne qualité.

L'air de soufflage qui refroidit le clinker chaud est utilisé dans le four (il assure le milieu convenable pour une combustion optimale).

Notre sujet porte sur la phase de refroidissement du clinker et à la récupération des gaz chauds (air secondaire) pour avoir un bon rendement du refroidisseur.

Conclusion :

Cette partie nous a donné une idée générale sur le refroidisseur (ses composants, son fonctionnement) ce qui facilitera son étude, alors que Les paramètres de marche du refroidisseur permettent d'établir les calculs lors du bilan.

La détermination de la problématique facilite son analyse et donc sa résolution.

PARTIE 4

ETUDE
ET
ANALYSE
DE LA
PROBLÉMATIQUE

4.1 Introduction

Après la connaissance des paramètres du refroidisseur et son fonctionnement, on a élaboré une liste des différentes causes probables de la mauvaise performance du refroidisseur :

- Air de soufflage (débit, répartition)
- Air exhaure (température élevée)
- Flamme du four (réglage)
- Combustible (finesse, nature, débit)
- Pression chambre 2 (pression élevée influe sur la hauteur de couche de clinker à l'intérieur du refroidisseur)
- Farine cru (nature)

La détermination des causes probables nous a donné une idée sur les paramètres à mesurer afin de réaliser un bilan thermique dont le but est de déterminer les causes majeures agissant sur le fonctionnement du refroidisseur, et les actions à effectuer pour l'optimiser.

4.2 Bilan Thermique :

Définition :

Un bilan est un état de synthèse qui permet de décrire à un moment ce que l'entreprise ou le service possède, appelé " actif " et leurs ressources, appelé " passif ". Et dans notre projet on s'intéresse à la réalisation d'un bilan thermique.

Le but général de la réalisation du bilan thermique est l'évaluation du rendement de refroidisseur et la récupération des gaz chauds. Il est réparti en bilan massique, aéraulique et calorifique, notre sujet se base sur le bilan aéraulique fait au niveau du refroidisseur.

Le calcul de débits s'effectue en Nm^3/kg de clinker, en se basant sur les conditions normales de la température (0°C) et de la **pression atmosphérique**.

Mesures et Calculs :

Le bilan aéraulique se base sur les mesures prises (température, pression, vitesse, ...) et permet de repérer la source de chaque problème au niveau du fonctionnement du refroidisseur afin de trouver des solutions et les appliquer pour être proche des performances demandées.

Ce schéma présente des paramètres calculés du refroidisseur basés sur les mesures (que nous allons les voir en détail) et les relations indiquées auparavant.

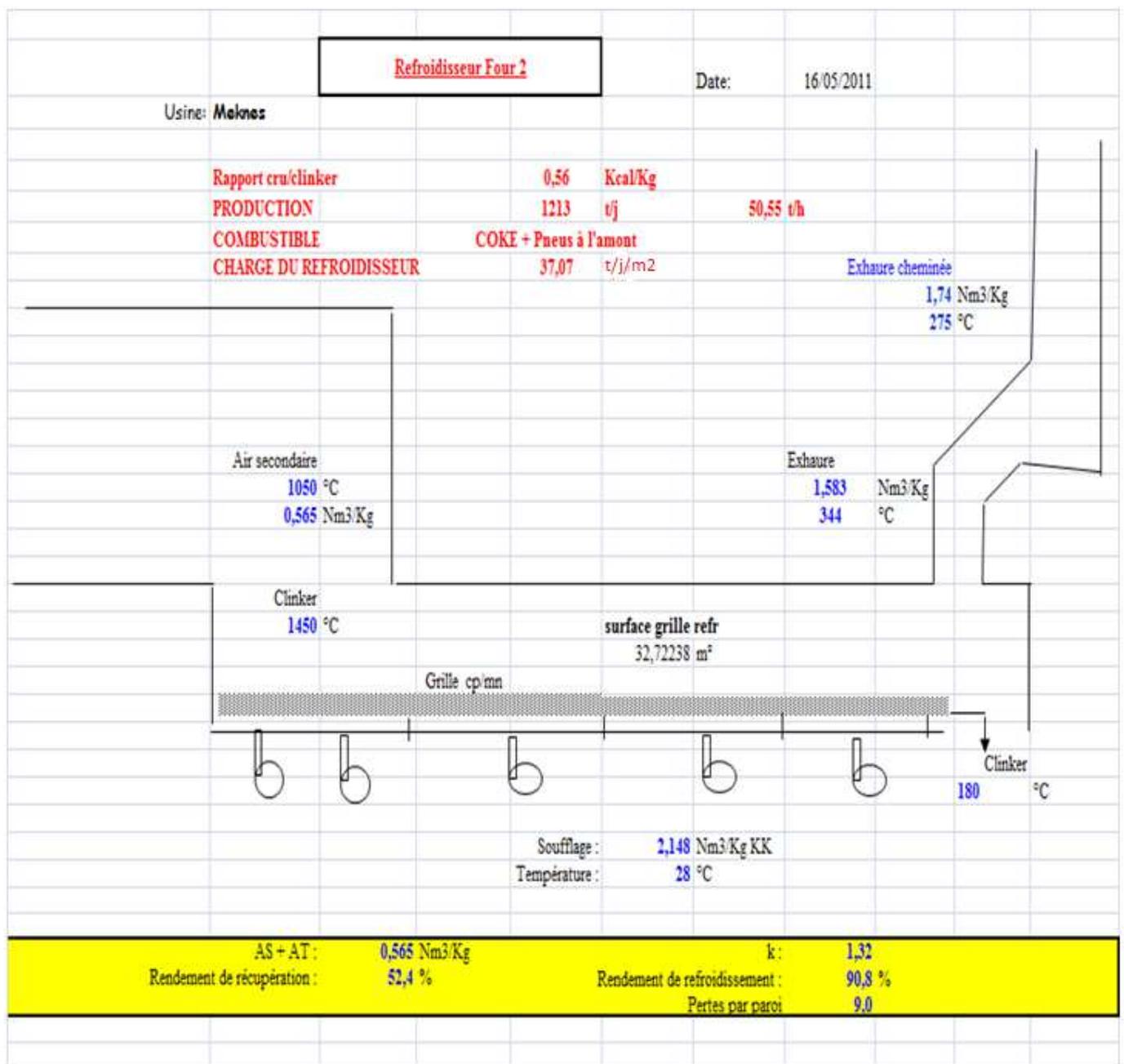


Figure 28 : différents paramètres du bilan thermique

Tableaux Comparatifs :

Les tableaux suivants présentent une comparaison des mesures (mai 2011) avec les valeurs préconisées, le dernier bilan fait en mai 2007 et la salle de contrôle (qui se base sur les valeurs prises par des capteurs).

Différents Paramètres du Refroidisseur :

PARAMETRES	Essaies de performances	Bilan Mai 2007	Bilan Mai 2011	Ecart (%) = performances – mai 2011 performances
Débit Clinker (T/J)	1262	1254	1210	4%
Rendement Récupération (%)	67	58.4	52.4	22%
Rendement de Refroidissement(%)	96	94.6	93	3%
T°C Clinker Sortie Four	1440	1417	1450	-1%
T°C Clinker Sortie Refroidisseur	100 - 120	106	180	-80% / -50%
T°C Air Secondaire	900-1100	981	1050	-17% / 5%
T°C Exhaure	262	290	344	-31%
Exhaure Refroidisseur (Nm ³ /kg de clinker)	1.1 - 1.4	1.54	1.58	-30% / -13%
Pression Statique de la chambre 2 (mm CE)	330		439	-33%
Coefficient K	1,33	1.32	1,32	0%
Ratio de Soufflage (Nm ³ /kg de clinker)	2,22	2.19	2.13	4%

Tableau 3 : Différents paramètres du refroidisseur

Ces graphes présentent une comparaison des températures (clinker, air secondaire et air exhaure) et des rendements (de récupération et de refroidissement) entre les valeurs mesurées en mai 2011 et les valeurs de performances.

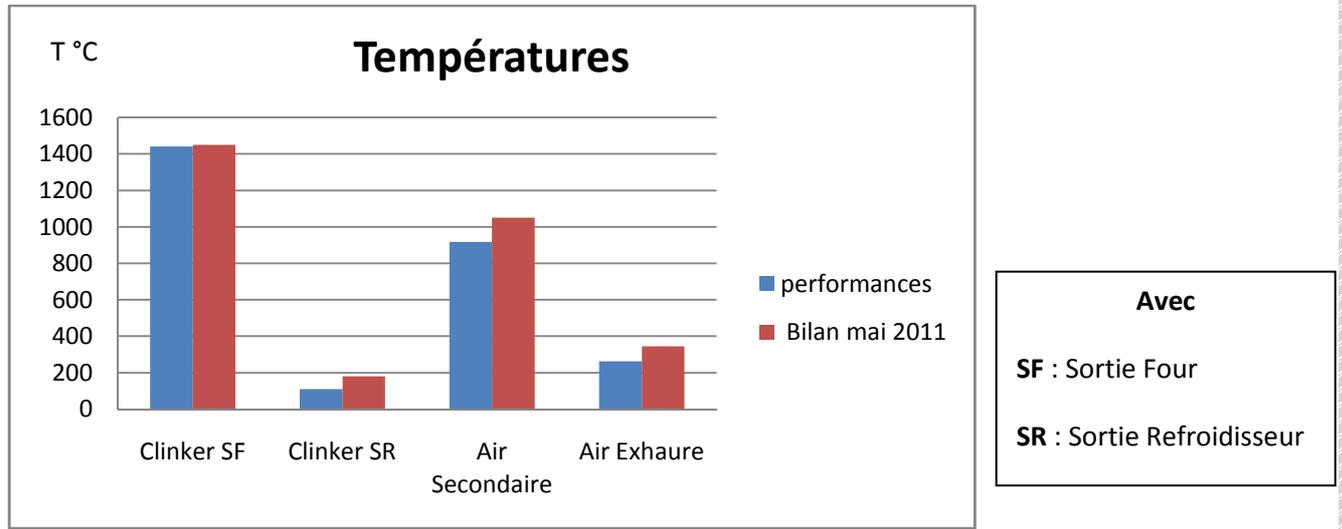


Figure 29 : Graphe comparant (bilan – performance) les températures des différents paramètres

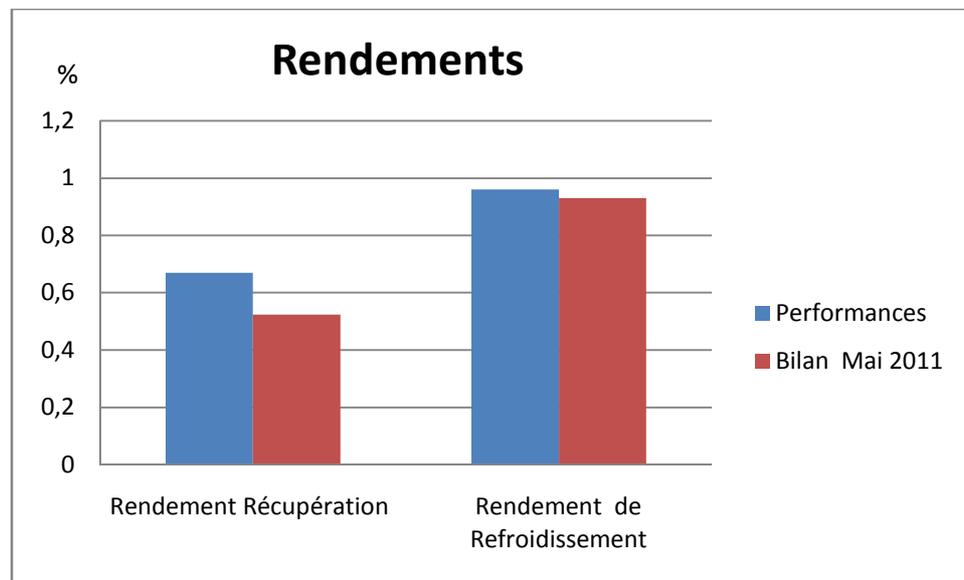


Figure 30 : Graphe comparant (bilan – performance) les rendements de récupération et de refroidissement

Selon les écarts calculés, on remarque que :

- La température du clinker 180°C est supérieure à la valeur nominale 100-120°C
- La température est très élevée de l'air exhaure 344°C.
- La Pression statique de la chambre 2 est supérieure à la norme.

Débits des Ventilateurs :

Ce tableau compare les mesure des débits des cinq ventilateurs avec les valeurs de performance et celles de la salle de contrôle.

	Valeurs Nominales (Nm ³ /h)	Mesures Mai 2007 (Nm ³ /h)	Salle de contrôle Mai 2011 (Nm ³ /h)	Mesures Mai 2011 (Nm ³ /h)	Ecart % Valeurs Nominales / Mai 2011	Ecart% Salle Contrôle / Mai 2011
Ventilateur 1	10500	10250	11310	9656	8%	15%
Ventilateur 2	11500	11200	11620	8081	30%	30%
Ventilateur 3	45000	46100	44000	40369	10%	8%
Ventilateur 4	25000	25300	22000	23343	6%	-6%
Ventilateur 5	25000	21800	22000	25951	-4%	-18%
Ratio de Soufflage			2.35	2.13		9%

Tableau 4 : Débits des cinq ventilateurs

Calcul du ratio de soufflage : Débit farine = 90 t/h → débit clinker = 90 * 0.56 = 50.4 t/h

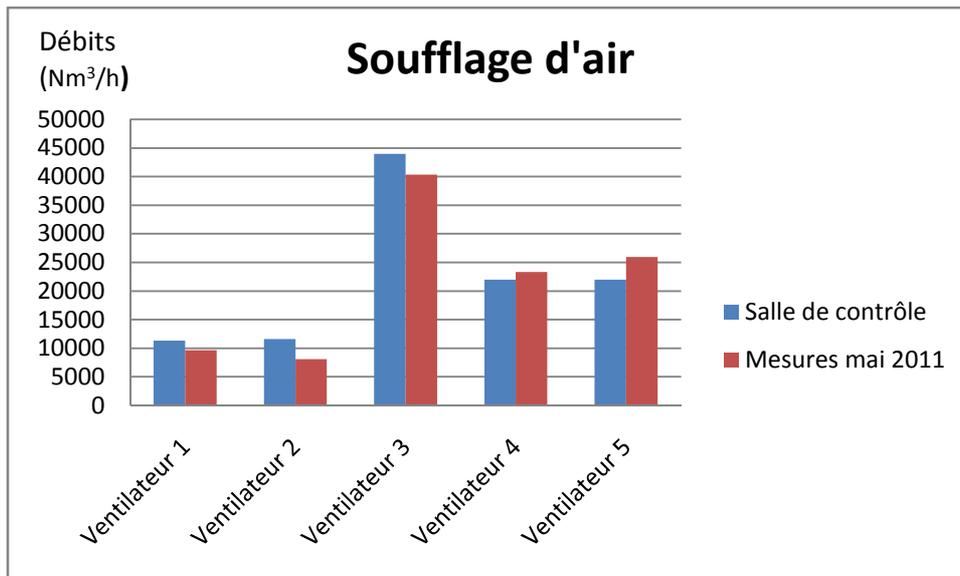


Figure 31 : comparaison des débits de soufflage (mesures - valeurs nominales)

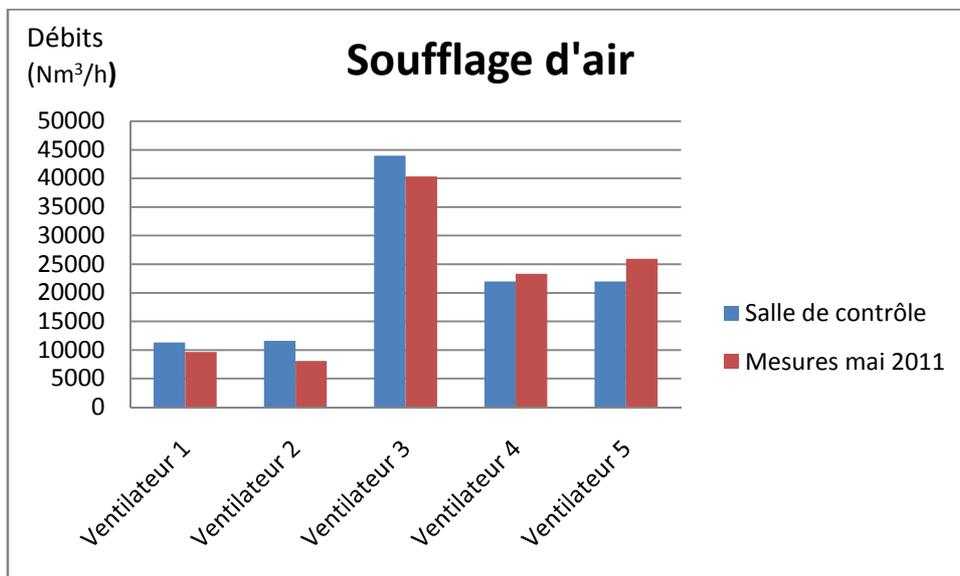


Figure 32 : comparaison des débits de soufflage (mesures - salle de contrôle)

Commentaire :

Malgré la différence, mai 2011 - norme, des débits des ventilateurs 1 et 2, on ne peut pas les varier puisqu'ils ont des vitesses constantes, par contre on peut réguler les vitesses des ventilateurs 3, 4 et 5.

On remarque un écart de 10% au niveau du ventilateur 3 qui souffle de l'air dans la chambre 2, cette dernière sert à régler la hauteur de la couche de clinker.

Pressions des Chambres :

	Salle de Contrôle (mm CE)	Mesures (mm CE)
Chambre 1	422	452
Chambre 2	416	439
Chambre 3	274	272
Chambre 4	31.18 !!!	193

Tableau 5 : Comparaison des pressions chambres (mesures- salle de contrôle)

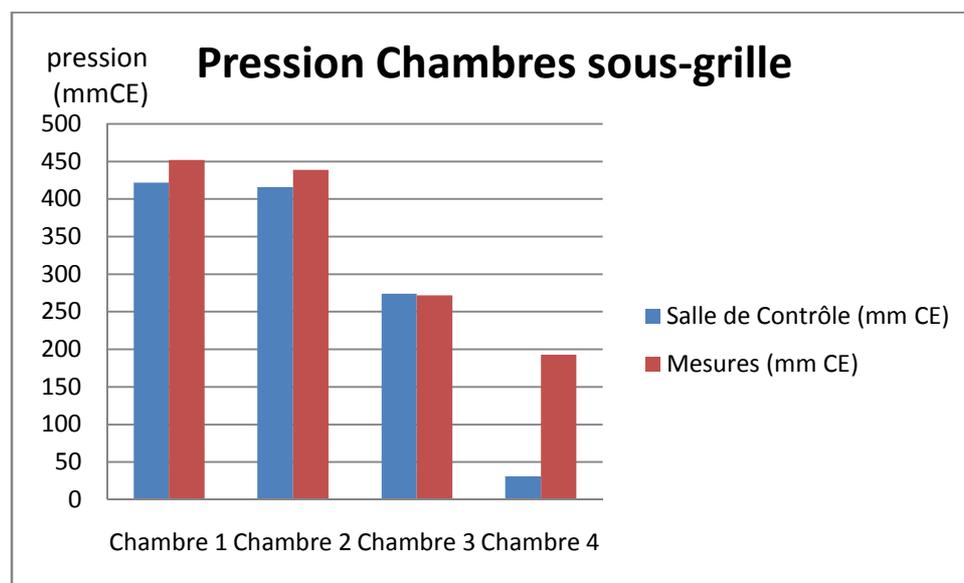


Figure 33 : Comparaison des pressions chambres (mesures- salle de contrôle)

Selon les mesures des pressions chambres, on remarque des écarts importants entre les mesures effectuées et les valeurs indiquées par de la salle de contrôle, surtout au niveau de la chambre 4.

La régulation se fait juste au niveau de la chambre 2 responsable du réglage de la hauteur couche clinker, alors que les chambres 1, 3 et 4 sont seulement à titre indicatif et changent de pression automatiquement après changement de la pression de la chambre 2.

Analyse chimique du Clinker:

	Norme	Laboratoire Mai 2011
C_3S %	50 – 60	75.53
C_2S %	10 – 20	2.91
CaO %	1 - 2.5	0.5
...		

Tableau 6 : composition clinker

Dans le four, on évite toujours la transformation (réaction réversible) de C_3S en C_2S lors de la trempe : un pourcentage élevé de C_2S influe sur la prise du ciment (la prise du ciment est brusque).

Comme il est indiqué dans le tableau, le pourcentage de CaO (chaux) 0.5% est inférieur à la norme qui doit être entre 1% et 2.5%, due à un phénomène de **Sur-cuisson** du clinker (température trop élevée dans le four).

Conclusion

En se basant sur les résultats du bilan (une température élevée du clinker, d'air exhaure et d'air soufflé par le ventilateur 3, une pression élevée de la chambre 2, ainsi des valeurs du rendement de récupération et du ratio de soufflage inférieures aux valeurs préconisées), on a pu trouver les causes principales de la dégradation des performances du refroidisseur (Répartition d'air de soufflage, pression de la chambre 2, Problème au niveau d'air exhaure et un phénomène de Sur-cuisson au niveau du four rotatif).

PARTIE 5

DÉMARCHE

DE

RÉSOLUTION

5.1 Proposition

Après détermination des causes majeures de l'état critique du refroidisseur, on s'est réuni avec les agents responsables du service procédé, pour élaborer une liste d'actions susceptibles d'être requises :

- Répartition et régulation des débits d'air de soufflage
- Réglage de la pression chambre 2
- Action sur l'air exhaure
- Régulation de la flamme
- Nature de la farine crue
- Action sur les Combustibles (débits, nature)
- Garder une hauteur constante du clinker le long de la grille
- Etalonnage capteurs

A la fin de la séance, on a déterminé les actions à appliquer et d'autres suggestions qui demandent une étude détaillée au niveau de toute la ligne de cuisson.

5.2 Actions Appliquées :

- Augmentation des débits de soufflage :

On a augmenté les valeurs (salle de contrôle) des débits de soufflage des trois derniers ventilateurs (3, 4 et 5) de telle façon à augmenter le ratio de soufflage de 2.1 à 2.3 Nm³/kg de clinker.

Sachant que le ratio de soufflage est égal à la somme des débits des ventilateurs sur le débit de clinker.

	Valeur Avant Action (Nm ³ /h)	Valeur Après Action (Nm ³ /h)
Ventilateur 3	44 000	47 000
Ventilateur 4	22 000	25 000
Ventilateur 5	22 000	25 000

Tableau 7 : Débits des ventilateurs avant et après action

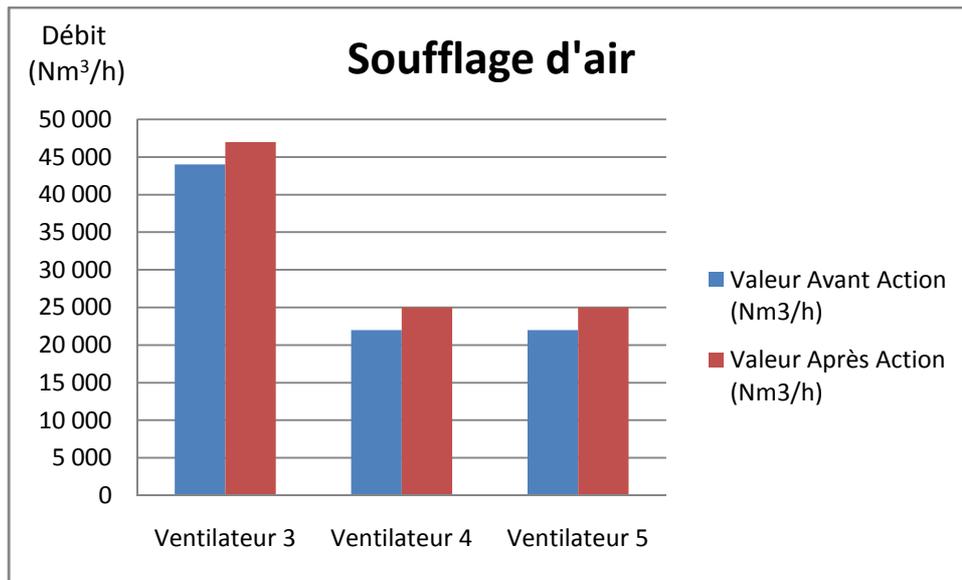


Figure 34 : Débits des ventilateurs avant et après action

L'augmentation du débit du ventilateur 3 permet de diminuer la hauteur de la couche de clinker afin de mieux le refroidir, alors que l'augmentation des ventilateurs 4 et 5 nous donnera un refroidissement plus efficace. En ce qui concerne les ventilateurs 1 et 2, ils ont des vitesses constantes.

$$\text{Calcul : ratio de soufflage} = \frac{47000+25000+25000+9656+8081}{50400} = 2.27$$

- Diminution de la pression Chambre 2 :

Afin de maintenir un bon rendement du refroidisseur, il est indispensable de garder la même hauteur de couche le long de la grille.

La régulation de la pression se fait au niveau d'une pression de marche calculée par la relation suivante (d'après un document interne de la société) :

$$\text{Pression de marche} = (48000 / \text{débit du ventilateur 3})^{1.5} * \text{pression mesurée}$$

D'après cette relation : on a pression mesurée = 438 mmCE donc
Pression de marche = 568 mmCE

Action : Diminuer la pression de marche de 568 à 380 mmCE

- **Registre Air Exhaure - Ventilateur 3**

Lors de la mesure au niveau du ventilateur 3, on a remarqué que la température de V3 est égale à 42°C alors que la température ambiante était 22°C, et donc d'un écart de 20°C due à la fermeture incomplète du registre air exhaure d'une température élevée (344°C), ce qui influe sur la température de l'air soufflé par le ventilateur 3 dans la chambre 2 (température élevée).

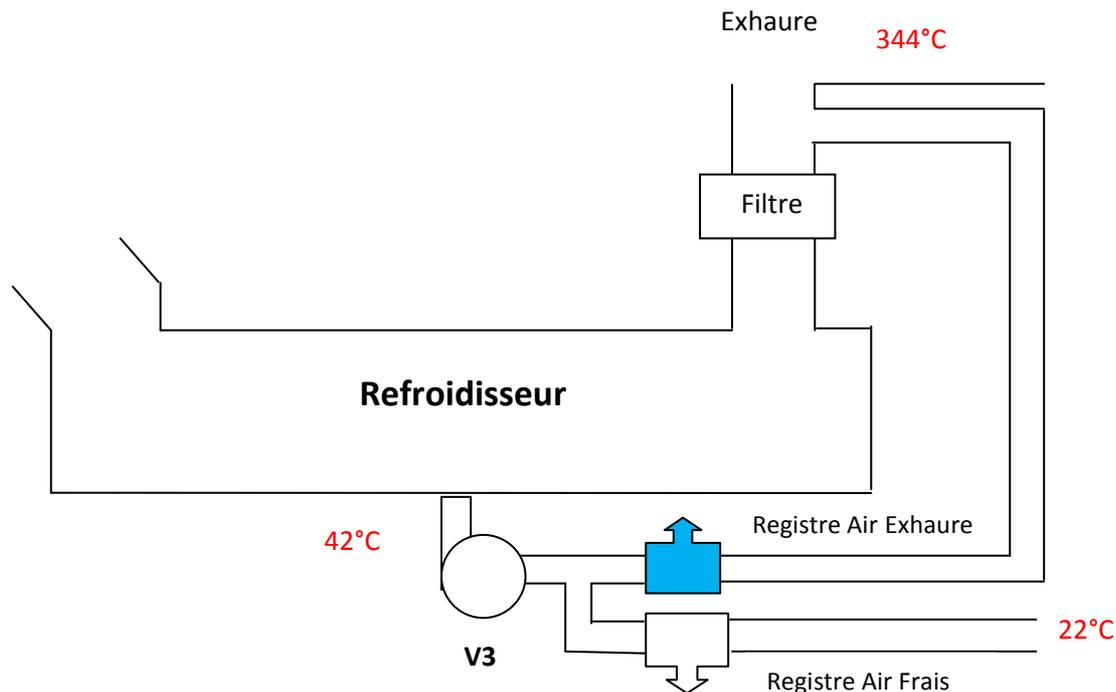


Figure 35 : schéma du registre air exhaure - ventilateur 3

Dans le but de diminuer la température de l'air soufflé par le ventilateur 3, afin de mieux refroidir le clinker, on a fermé le registre air exhaure à 100%.

5.3 Résultats et Utilité

Résultats :

Après l'application des actions, on a amélioré plusieurs paramètres comme il est indiqué dans le tableau suivant :

	Avant Actions	Après Actions	Norme
Température Clinker (°C)	180	105	100-120
Température Air Secondaire (°C)	1050	1067	900-1100
Température Air Exhaure (°C)	344	249	262
Rendement de refroidissement %	91	95	96
Rendement de récupération %	52.4	53.4	67

Tableau 8 : amélioration des paramètres du refroidisseur après actions

NB : Calcul des rendement : voir Page 29 (g°/) et (h°/)

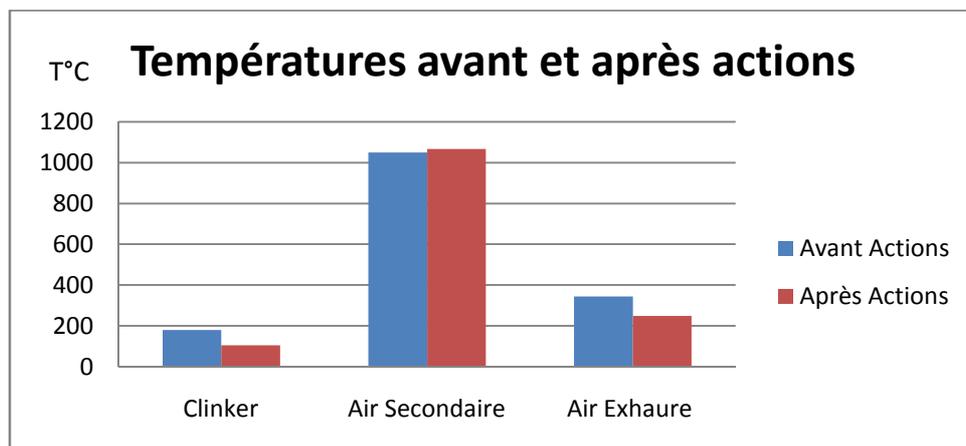


Figure 36 : amélioration des températures des paramètres du refroidisseur après actions

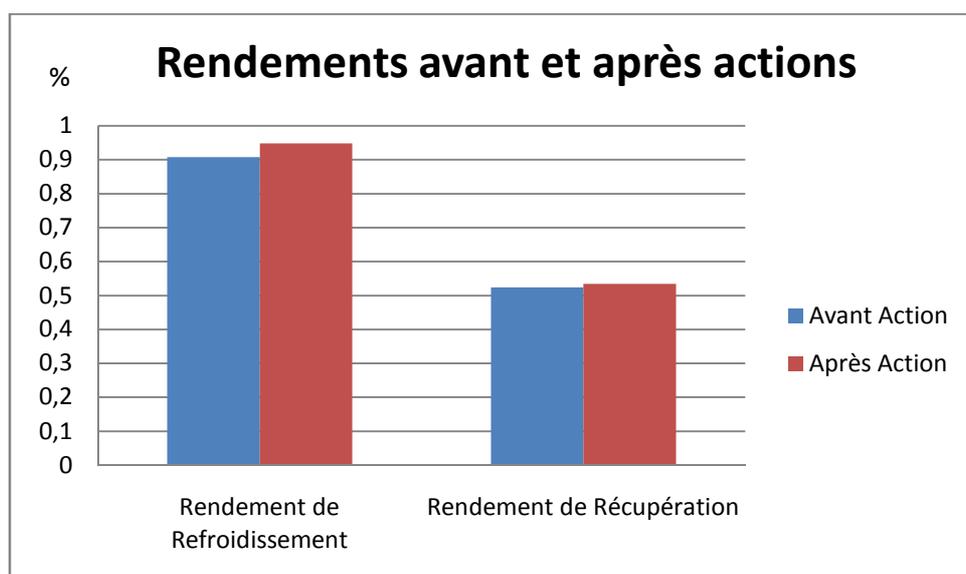


Figure 37 : amélioration des rendements du refroidisseur après actions

Remarques & Interprétations :

Après les actions prises, on remarque une amélioration des paramètres du refroidisseur par rapport aux valeurs de performance et du premier essai, et surtout la diminution de la température de clinker et l'augmentation du rendement de récupération (augmentation de la récupération des gaz chauds), qui entrent dans le but de notre projet.

Pour le rendement de récupération, l'augmentation de 1% (de 52.4% à 53.4%) après les actions, présente une amélioration et non pas une marge d'erreur, car on a pu améliorer les paramètres qui entrent dans le calcul du rendement de récupération (augmentation de la température d'air secondaire et la diminution de la température d'air soufflé).

Les résultats trouvés restent acceptables par rapport aux valeurs préconisées fixes de l'installation, malgré l'influence possible de la tour et du four.

Utilité

L'amélioration du fonctionnement du refroidisseur permet aux autres ateliers de travailler dans les meilleures conditions et donc produire un ciment de bonne qualité.

Un bon refroidissement permet aussi de protéger la grille du refroidisseur de la détérioration par usure au cas d'une température élevée du clinker. Alors qu'un bon rendement de récupération signifie qu'on aura besoin de moins de calories du combustible, et donc moins de consommation de coke.

En ce qui concerne la consommation électrique du refroidisseur (surtout au niveau des ventilateurs), le respect de l'intervalle toléré du ratio de soufflage reflète une consommation acceptable.

5.4 Suggestions :

- Vérification des Capteurs :

D'après les mesures des pressions et des vitesses (partie 4), on a remarqué qu'il y avait un grand écart entre les mesures et la salle de contrôle (capteurs) pour plusieurs paramètres.

- ✓ On peut appliquer d'autres actions :
 - Maintenir les capteurs de pression des chambres 1 et 2.
 - Changer ou étalonner le capteur de pression de la chambre 4, à cause de l'accumulation des poussières (bouchage).
- ✓ De même, il faut vérifier l'état les capteurs de vitesses des ventilateurs

- Combustibles (four) :

Selon les résultats de l'analyse du clinker, il y a une sur-cuisson dans le four, et donc il faut agir sur les combustibles (nature, débit, finesse).

La finesse agit directement sur la réaction de combustion : une farine de bonne finesse dégage plus de calories et permet de diminuer le débit du fuel injecté dans la tuyère (flamme).

Conclusion

La mission présentée dans ce rapport illustre bien l'intérêt d'évoluer en terme de performance engagé sur les objectifs de pilotage de cette usine. Et d'après l'étude faite au niveau du refroidisseur, on a trouvé des écarts importants entre les paramètres mesurés et les valeurs préconisées :

- Une température de clinker très supérieure à celle désirée à cause d'un débit de soufflage d'air insuffisant.
- Un problème au niveau du ventilateur 3 due à une température élevée d'air soufflé
- Une pression chambre 2 élevée → une hauteur de la couche du clinker non uniforme le long de la grille du refroidisseur, par conséquent un mauvais refroidissement du clinker.

Nous apportons à travers ce rapport quelques-unes des actions nécessaires à l'optimisation du refroidisseur en terme de refroidissement du clinker et de récupération des gaz chauds, telles que :

- Une augmentation des débits de soufflage → un refroidissement du clinker plus efficace.
- Fermeture (à 100%) du registre qui amène l'air exhaure filtré (d'une température très élevée) vers le ventilateur 3.
- Une Diminution de la pression de la chambre 2.

A travers ces actions, on a pu améliorer le rendement du refroidisseur par une diminution de la température de clinker ($180^{\circ}\text{C} \rightarrow 105^{\circ}\text{C}$) et une amélioration du rendement de refroidissement ($91\% \rightarrow 95\%$).

Pour conclure, ce stage nous a offert la possibilité de mettre en pratique les connaissances acquises lors de nos études et l'opportunité de s'intégrer dans le monde professionnel. Ainsi le travail en équipe reste le chemin le plus efficace pour la réussite et la continuation de n'importe quel organisme

Bibliographie

- Atelier de cuisson - refroidissement : Notice de mise en service (document interne de la société)
- Logiciel CECIL (logiciel interne de la société)
- Technologie de CLAUDIUS PETERS
- Site web de LAFARGE

Annexe

Annexe 1 : calcul débit ventilateur 1

Annexe 2 : calcul débit ventilateur 2

Annexe 3 : calcul débit ventilateur 3

Annexe 4 : calcul débit ventilateur 4

Annexe 5 : calcul débit ventilateur 5

Annexe 6 : calcul air exhaure sortie refroidisseur

Annexe 7 : calcul air exhaure sortie filtre

Annexe 8 : tableau comparatif des débits des ventilateurs

Annexe 9 : calcul des enthalpies

Annexe 1 :

Calcul du débit V1

CTEO Anémo CALCULATION SHEET		Use of the calculation sheet
plant : Meknes	Date : 2011-05-16	Time : 12:00
workshop : V1	Origin of the source : air	
Condition of the test :	Measurement point : x	

DUCT		minimum of measurement points	4
Circular : DIAMETER	0,49 m	Velocity	m/s
Tapping		1	15,42
		2	15,59
Rectangular : WIDHT		3	15,53
Rectangular : HEIGHT		4	15,46
		5	
Temperature	25 °C	6	
Static Pressure	mmWG	7	
		8	
Pitot Tube Ratio	0,85	9	
		10	
Dust concentration	0 g/m3	11	
Dust concentration	0,00 kg/Nm3	12	
		13	
Dust flow (t/h)	0,000	14	
		15	
		16	
Barometric Pressure	Pa	17	
Atmospheric Pressure Ratio	0,939	18	
		19	
Elevation "h"	500 m	20	
Atm. Pressure @ "h"	9.708,9 mmWG		NB VAL : 4
Atm. Pressure @ "h"	95.177.2 Pa		VAL maxi : 15.59

Aeraulic surface	0,1890 m2
Vitesse moy	15,50 m/s
RHO w/o dust	1,184 Kg/m3
RHO with dust	1,184 Kg/m3

Velocity	15,50 m/s
Flow	2,93 m3/s
Flow	2,68 Nm3/s
Flow	10.544 m3/h
Flow	9.656 Nm3/h

P ³ &T ³ correction	0,9158
---	--------

Débit (flow) = (moyenne des vitesses) * Surface aéraulique

Annexe 2 :

Calcul débit V2 bis

CTEO Anémo CALCULATION SHEET		Use of the calculation sheet	
plant : Meknes	Date : 2011-05-16	Time : 12:00	
workshop : V2 bis	Origin of the source : air		
Condition of the test :	Measurement point : x		

DUCT		minimum of measurement points 4	
Circular : DIAMETER	0,53 m	Velocity m/s	
Tapping	0,01 m	1	11,14
		2	11,00
Rectangular : WIDTH		3	11,16
Rectangular : HEIGHT		4	11,08
		5	
Temperature	25 °C	6	
Static Pressure		7	
		8	
Pitot Tube Ratio	0,85	9	
		10	
Dust concentration	0 g/m ³	11	
Dust concentration	0,00 kg/Nm ³	12	
		13	
Dust flow (t/h)	0,000	14	
		15	
		16	
Barometric Pressure		17	
Atmospheric Pressure Ratio	0,939	18	
		19	
Elevation "h"	500 m	20	
Atm. Pressure @ "h"	9.708,9 mmWG	NB VAL : 4	
Atm. Pressure @ "h"	95.177,2 Pa	VAL maxi : 11,16	

Aeraulic surface	0,2208 m ²
Vitesse moy	11,10 m/s
RHO w/o dust	1,234 Kg/m ³
RHO with dust	1,234 Kg/m ³

Velocity	11,10 m/s
Flow	2,45 m ³ /s
Flow	2,24 Nm ³ /s
Flow	8.812 m ³ /h
Flow	8.081 Nm ³ /h

P ^s &T ^s correction	0,9170
---	--------

Débit (flow) = (moyenne des vitesses) * Surface aéraulique

Annexe 3 :

Calcul débit V3

DUCT		minimum of measurement points		14	14	
Circular : DIAMETER	1,10	m	Dynamic Pressure		mmWG	pos ² pitot
Tapping	0,06	m	1	18,00		0,080 m
			2	19,70		0,123 m
Rectangular : WIDTH		m	3	19,30		0,169 m
Rectangular : HEIGHT		m	4	20,10		0,221 m
			5	19,40		0,281 m
Temperature	42	°C	6	16,30		0,356 m
Static Pressure	-161	mmWG	7	18,20		0,463 m
			8	15,60		0,757 m
Pitot Tube Ratio	0,85		9	14,30		0,864 m
			10	15,60		0,939 m
Dust concentration	0	g/m3	11	15,60		0,999 m
Dust concentration	0,00	kg/Nm3	12	13,40		1,051 m
			13	10,00		1,097 m
Dust flow (t/h)	0,000		14	9,30		1,140 m
			15			
			16			
Barometric Pressure		Pa	17			
Atmospheric Pressure Ratio	or		18			
0,939			19			
Elevation "h"	500	m	20			
Atm. Pressure @ "h"	9.708,9	mmWG			NB VAL :	14
Atm. Pressure @ "h"	95.177,2	Pa			VAL maxi :	20,10

Aeraulic surface	0,9503	m ²
Avg. Dyn. Pressure	155,61	Pa
RHO w/o dust	1,035	Kg/m ³
RHO with dust	1,035	Kg/m ³

Velocity	14,74	m/s
Flow	14,01	m ³ /s
Flow	11,21	Nm ³ /s
Flow	50,421	m ³ /h
Flow	40,369	Nm ³ /h

P ² &T ² correction	0,8006
---	--------

$$P_{dyn} = (\text{somme des pressions dynamiques mesurées} / \text{nombre de mesures})^2 \text{ mmCE}$$

$$\rho = 1.293 * \frac{273 * (P_{stat} + 9750)}{(273 + T) * 10332} \text{ Kg/m}^3$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{2 * g * P_{dyn}}{\rho}\right)} \text{ m/s}$$

$$Q = V * S \text{ m}^3/\text{s}$$

Annexe 4 :

Calcul débit V4

CTEO Anémo CALCULATION SHEET		Use of the calculation sheet	
plant :	Meknes	Date :	2011-05-16
workshop :	V4	Origin of the source :	air
Condition of the test :		Measurement point :	X

DUCT		minimum of measurement points		4
Circular : DIAMETER	1,05	m	Velocity	
Tapping		m	1	8,29
			2	8,11
Rectangular : WIDHT		m	3	8,02
Rectangular : HEIGHT		m	4	8,32
			5	
Temperature	25	°C	6	
Static Pressure		mmWG	7	
			8	
Pitot Tube Ratio	0,85		9	
			10	
Dust concentration	0	g/m3	11	
Dust concentration	0,00	kg/Nm3	12	
			13	
Dust flow (t/h)	0,000		14	
			15	
			16	
Barometric Pressure		Pa	17	
Atmospheric Pressure Ratio	0,939	or	18	
			19	
Elevation "h"	500	m	20	
Atm. Pressure @ "h"	9.708,9	mmWG	NB VAL : 4	
Atm. Pressure @ "h"	95.177,2	Pa	VAL maxi : 8,32	

Aeraulic surface	0,8659	m2
Vitesse moy	8,19	m/s
RHO w/o dust	1,231	Kg/m3
RHO with dust	1,231	Kg/m3

Velocity	8,19	m/s
Flow	7,09	m3/s
Flow	6,48	Nm3/s
Flow	25.515	m3/h
Flow	23.343	Nm3/h

P&T ² correction	0,9149
-----------------------------	--------

Débit (flow) = (moyenne des vitesses) * Surface aéraulique

Annexe 5 :

Calcul débit V5

CTEO Anémo CALCULATION SHEET			
plant :	Meknes	Date :	2011-05-16
workshop :	V5	Origin of the source :	air
Condition of the test :		Measurement point :	X

Use of the calculation sheet	
Time :	12:00

DUCT			minimum of measurement points		4
Circular : DIAMETER	1,05	m	Velocity	m/s	
Tapping		m	1	9,43	
			2	9,01	
Rectangular : WIDTH		m	3	8,84	
Rectangular : HEIGHT		m	4	9,02	
			5		
Temperature	25	°C	6		
Static Pressure		mmWG	7		
			8		
Pitot Tube Ratio	0,85		9		
			10		
Dust concentration	0	g/m3	11		
Dust concentration	0,00	kg/Nm3	12		
			13		
Dust flow (t/h)	0,000		14		
			15		
			16		
Barometric Pressure		Pa	17		
Atmospheric Pressure Ratio	or		18		
0,939			19		
Elevation "h"	500	m	20		
Atm. Pressure @ "h"	9.708,9	mmWG		NB VAL :	4
Atm. Pressure @ "h"	95.177,2	Pa		VAL maxi :	9,43

Aeraulic surface	0,8659	m2
Vitesse moy	9,08	m/s
RHO w/o dust	1,186	Kg/m3
RHO with dust	1,186	Kg/m3

Velocity	9,08	m/s
Flow	7,86	m3/s
Flow	7,21	Nm3/s
Flow	28.289	m3/h
Flow	25.951	Nm3/h

P°&T° correction	0,9173
------------------	--------

Débit (flow) = (moyenne des vitesses) * Surface aéraulique

Annexe 6 :

Calcul débit Air Exhaure sortie Refroidisseur

LAFARGE CEMENT		TCEA PITOT CALCULATION SHEET - V07				Use of the calculation sheet	
plant :	Meknès	Date :	2011-05-16		Time :13h		
workshop :	exhaure Aval four2 (avant filtre)	Origin of the source :					
Condition of the test :		Measurement point :					
DUCT		minimum of measurement points	12	20	Aerulic surface 2,54 m ²		
Circular : DIAMETER	1,80 m		mmWG		pos ^o pitot	Avg. Dyn. Pressure 162,18 Pa	
Tapping	0,00 m	1	16,90	16,50	0,023 m	RHO w/o dust (wet) 0,533 kg/m ³	
		2	17,10	16,90	0,070 m	RHO with dust (wet) 0,533 kg/m ³	
Rectangular : WIDHT		3	16,30	17,40	0,121 m		
Rectangular : HEIGHT		4	15,60	16,20	0,175 m	Velocity 20,97 m/s	
		5	16,60	16,30	0,232 m	Flow (wet) 53,37 m ³ /s	
Temperature	344 °C	6	16,00	16,00	0,297 m	Flow (wet) 21,99 Nm ³ /s	
Static Pressure	-25 mmWG	7	17,30	14,90	0,367 m	Flow (wet) 192,126 m ³ /h	
		8	17,20	11,80	0,450 m	Flow (wet) 79,169 Nm ³ /h	
Pitot Tube Ratio	0,850	9	18,90		0,551 m		
		10	19,40		0,698 m	P*T* correction 0,4121	
Dust concentration	0,0 g/m ³	11	19,50		1,102 m		
Dust concentration	0,00 kg/Nm ³	12	21,10		1,249 m		
		13	19,10		1,350 m		
Dust flow (t/h)	0,000	14	15,20		1,433 m	Calculation of gas flow at reference conditions	
		15	13,80		1,503 m	% H2O ref 0,00	
		16	15,70		1,568 m	Flow (H2O ref) 79,169 Nm ³ /h	
Barometric Pressure		17	14,60		1,625 m		
Atmospheric Pressure Ratio	or 0,933	18	15,60		1,679 m	% O2 ref 10,00	
Elevation "h"	550 m	19	16,80		1,730 m	Flow (H2Oref @ %O2ref) 0,504 Nm ³ /h	
		20	15,80		1,777 m	Flow (H2Oref @ %O2ref) 0,14 Nm ³ /s	
Atm. Pressure @ "h"	9.648,3 mmWG					NB VAL : 28	
Atm. Pressure @ "h"	94583,37 Pa					VAL maxi : 21,10	

$$P_{dyn} = (\text{somme des pressions dynamiques mesurées} / \text{nombre de mesures})^2 \text{ mmCE}$$

$$\rho = 1.293 * \frac{273*(Pstat+9750)}{(273+T)*10332} \text{ Kg/m}^3$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{2*g*Pdyn}{\rho}\right)} \text{ m/s}$$

$$Q = V * S \text{ m}^3/\text{s}$$

Annexe 7 :

Calcul débit Air Exhaure sortie filtre

LAFARGE CEMENT TECHNICAL CENTER Europe-Africa				TCEA PITOT CALCULATION SHEET - V07				Use of the calculation sheet		
plant: Meknès		Date: 2011-05-16		Origin of the source :		Time :13h35'				
workshop: exhaure Aval four2 (après filtre)		Measurement point :								
Condition of the test :										
DUCT				minimum of measurement points		12		20		
Circular: DIAMETER	1,80 m		Dynamic Pressure		mmWG		pos° pitot			
Tapping	0,00 m								Aerulic surface	
Rectangular: WIDHT									2,54 m ²	
Rectangular: HEIGHT									Avg. Dyn. Pressure	
Temperature	275 °C								173,50 Pa	
Static Pressure	-52		mmWG						RHO w/o dust (wet)	
Pitot Tube Ratio	0,850								0,598 kg/m ³	
Dust concentration	0,0 g/m ³								RHO with dust (wet)	
Dust concentration	0,00 kg/Nm ³								0,598 kg/m ³	
Dust flow (t/h)	0,000								Velocity	
Barometric Pressure									20,47 m/s	
Atmospheric Pressure Ratio	or								Flow (wet)	
0,933									52,09 m ³ /s	
Elevation "h"	550 m								Flow (wet)	
Atm. Pressure @ "h"	9.648,3 mmWG								24,10 Nm ³ /s	
Atm. Pressure @ "h"	94583,37 Pa								Flow (wet)	
									187,538 m ³ /h	
									Flow (wet)	
									86.768 Nm ³ /h	
									P°&T° correction	
									0,4627	
									9,80	
									Air faux filtre	
									7,599 Nm ³ /h	
									Calculation of gas flow at reference conditions	
									% H2O ref	
									0,00	
									Flow (H2O ref)	
									86.768 Nm ³ /h	
									% O2 ref	
									10,00	
									Flow (H2Oref @ %O2ref)	
									0,552 Nm ³ /h	
									Flow (H2Oref @ %O2ref)	
									0,15 Nm ³ /s	
									NB VAL :	
									18	
									VAL maxi :	
									24,20	

$$P_{dyn} = (\text{somme des pressions dynamiques mesurées} / \text{nombre de mesures})^2 \text{ mmCE}$$

$$\rho = 1.293 * \frac{273*(Pstat+9750)}{(273+T)*10332} \text{ Kg/m}^3$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{2*g*Pdyn}{\rho}\right)} \text{ m/s}$$

$$Q = V * S \text{ m}^3/\text{s}$$

Annexe 8 :

Contrôle Soufflage Refroidisseur F2 du: 16/05/2011

	Vitesse ventilateur (tr/min)	Nm3/h mesure procédé	Nm3/h indication S.C	Ecart (%)	Observation
V ₁	100%	9656	11310	15%	
V ₂	100%	8081	11620	30%	
V ₃		40369	46200	13%	
V ₄		23343	23350	0%	
V ₅		25951	25840	0%	
Ratio soufflage Nm3/kg kk		2,13	2,35	9%	débit farine 90t/h

Date	V1					
	Heure	Vitesse	T°	Débit mesuré	Débit mesuré	Débit indiqué
2011-05-16		%		m3/h	Nm3/h	Nm3/h
	12:00	100%	25	10544	9656	11310
	V2					
	Heure	Vitesse	T°	Débit mesuré	Débit mesuré	Débit indiqué
		%	°C	m3/h	Nm3/h	Nm3/h
	12:00	100%	25	8812	8081	11620
	V3					
	Heure	Vitesse	T°	Débit mesuré	Débit mesuré	Débit mesuré
		Tr/min	°C	m3/h	Nm3/h	Nm3/h
	12:00	0	42	50421	40369	46200
	V4					
	Heure	Vitesse	T°	Débit mesuré	Débit mesuré	Débit indiqué
		Tr/min	°C	m3/h	Nm3/h	Nm3/h
	12:00	0	25	25515	23343	23350
	V5					
	Heure	Vitesse	T°	Débit mesuré	Débit mesuré	Débit indiqué
		Tr/min	°C	m3/h	Nm3/h	Nm3/h
	12:00	0	25	28289	25951	25840

Les ventilateurs 1 et 2 ont des vitesses constantes

Annexe 9 :

CALCUL DES ENTHALPIES

Clinker		Débit	Température	Cp	Enthalpie	Rendements récup	
	Sortie four	1	1450	0,2651	384,44	Air 3aire	Air 2aire
Sortie refroidisseur	1	180	0,1966	35,39	0,00	51,86	
Air tertiaire	0,000	0	0,300600	0,00			
Air secondaire	0,558	1050	0,344280	201,88	k air 3aire	k air 2aire	
Air d'exhaure	1,566	344	0,3171	170,84	0,000	1,309	
Air soufflé	2,125	28,0	0,3107	18,49			

Enthalpie total des sorties	408,116	Enthalpie total entrées	402,93
Pertes par parois	9		
Total	417,12	Enthalpie AS	187,696

Rendement %	51,86
--------------------	--------------

Avec :

- Débit en Nm³ /Kg de clinker
- Température en °C
- CP en Kcal / Kg de clinker
- pertes par parois en Kcal