



*Faculté des Sciences et Techniques de Fès*



*Département de Génie Industriel*



*LST de Génie Industriel*

## **Projet de Fin d'Etudes**

# Diminution de la température d'air exhaure sorti du refroidisseur clinker

**Lieu:** LAFARGE CEMENTS USINE DE MEKNES

**Référence:** 1/15GI

**Préparé par:**

- HASSANIA EL GHARNAJI

**Soutenu le 15 Juin 2015 devant le jury composé de:**

- Pr. S. HAOUACHE (Encadrant FST)
- Pr. D. SQALLI (examineur)
- Pr. A. CHAMAT (examineur)
- Mr. M. BOUHO (Encadrant Société)

# Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à:

Mes parents, qui m'ont toujours encouragée et soutenue, que Dieu leur prête longue vie.

A l'équipe pédagogique de la **FST** qui nous a assuré une formation de qualité.

A toute l'équipe de **LAFARGE** qui nous a aidés à développer et améliorer nos savoir-faire dans le domaine énergétique.

A tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin à accomplir ce travail.

# Remerciements

Je profite par le biais de ce rapport pour exprimer mes vifs remerciements à toute personne contribuant de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail.

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des enseignants et les responsables du département génie industriel qui contribuent à bien amener notre formation par leurs aides et leurs conseils.

Je tiens à remercier le Directeur de la société LAFARGE usine de MEKNES de m'avoir accepté comme stagiaire au sein de la société et je remercie spécialement mon encadrant Mr. **MOSTAFA BOUHO** pour ses conseils précieux ainsi pour son aide et son soutien.

Un remerciement bien particulier adressé également à Mr. **SAID HAOUACHE**, pour ses remarques, ses directives, et l'intérêt qu'il m'a porté. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour son suivi et sa disponibilité.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre I: Description de Lafarge et processus fabrication .....</b>	<b>10</b>
I.1. Lafarge en évolution .....	11
1.1. Présence mondial.....	11
1.2. Lafarge Meknès .....	11
1.3. Les installations .....	11
1.4. Organigramme de l'usine Meknès .....	12
1.5. Fiche signalétique .....	12
I.2. le ciment : matière de production.....	12
2.1. Définition, désignation et composition .....	13
2.2. Les différentes voies de fabrication du ciment.....	13
I.3. procédé de fabrication : .....	13
3.1. Préparation des matériaux .....	13
3.1.1. L'extraction de la matière – carrière .....	13
3-1-2. Concassage : .....	14
3-1-3. Echantillonnage .....	14
3-1-4. Production du tas pré homogénéisé .....	14
3-2. Traitement et cuisson de cru .....	15
3-2-1. Traitement du cru -Production de la farine.....	15
3-2-2. Cuisson du cru -Production du clinker .....	15
3-3. Traitement du clinker.....	17
3-3-1. Broyeur ciment .....	17
3-4. Ensachage et Expéditions .....	17
<b>Chapitre II: Description du procédé de fonctionnement du refroidisseur de clinker.....</b>	<b>19</b>
II.1. Objectif du refroidissement .....	20
II.2. Types et principes de fonctionnement des refroidisseurs de clinker.....	20
2.1. Le refroidisseur rotatif .....	20
2.2. Les refroidisseurs à ballonnets.....	21
2.3. Le refroidisseur à grilles .....	21
2.4. Le refroidisseur à couloirs .....	22
2.4.1. Le module HE (Haut Efficacité) .....	22

2.4.2. Le module ETA.....	22
2.4.3. Concasseur.....	24
II.3. Ventilateurs de soufflages et d'exhaure.....	24
3.1. Ventilateur de soufflage.....	24
3.2. Ventilateur d'exhaure .....	25
II.4. Mécanisme de transfert de chaleur dans les refroidisseurs de clinker .....	25
4.1. Transfert de chaleur par conduction .....	25
4.2. Transfert de chaleur par convection .....	26
4.3. Transfert de chaleur par rayonnement .....	26
4.4. Dualité conduction-convection.....	27
4.5. Généralités sur les échangeurs de chaleur .....	27
4.5.1. Définition.....	27
4.5.2. Classification des échangeurs.....	28
II.5. Les paramètres influençant le refroidissement .....	28
5.1. Influence de la taille des granules.....	29
5.2. Influence de la hauteur de la taille du clinker.....	29
5.3. Influence de la densité de soufflage .....	29
II.6. Réglage du refroidisseur .....	29
<b>Chapitre III: Travail, résultats et interprétations.....</b>	<b>31</b>
III.1. Les bilans aéraulique, thermique et de matière .....	32
1.1. Introduction .....	32
1.2. Réalisation des bilans .....	32
1.2.1. Première étape : Préparation .....	33
1.2.2. Deuxième étape :exécution.....	33
1.2.3. Troisième étape : évaluation.....	33
1.2.4. Quatrième étape : interprétation.....	33
1.3. Bilan de matière .....	33
1.4. Bilan aéraulique.....	34
1.4.1. Calcul d'air secondaire.....	35
1.5. Bilan thermique .....	36
1.5.1. Calcul des chaleurs des entrées .....	36

1.5.2. Calcul des chaleurs des sorties .....	36
1.5.4. Efficacité et rendement du refroidisseur.....	37
1.6. Résultats et interprétations.....	37
1.6.1. Bilan de matière .....	38
1.6.2. Bilan aéraulique.....	39
1.6.3. Bilan thermique .....	41
1.7. Calcul du rendement et de l'efficacité .....	42
1.8. Conclusion et recommandation .....	44
III.2. Les essais de performance .....	44
2.1. Influence de la densité de soufflage.....	44
2.1.1. Profil idéal de soufflage le long du refroidisseur .....	44
2.1.2. L'essai effectué .....	45
2.2. Influence de la hauteur de la couche du clinker dans le refroidisseur .....	48
III.3. Solutions proposées .....	50
3.1. Introduction .....	50
3.2. Ventilateur : Définition .....	50
3.3. Choix du type de ventilateur à installer .....	51
3.4. Calcul du débit du ventilateur à installer .....	52
3.6. Dimensionnement du ventilateur de soufflage .....	55
3.7. Evaluation économique du ventilateur à installer .....	56
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>

# Figures

**Figure I.1:** Procédé par voie sèche / humide

**Figure I.2:** Parcours de la matière première de la carrière au concassage

**Figure I.3:** Pré homogénéisation

**Figure I.4:** Enchaînement de la préparation du cru

**Figure I.5:** Production du clinker

**Figure I.6:** Production de ciment

**Figure I.7:** La livraison de ciment

**Figure II.1:** Les airs récupérés au niveau du four et du précalcinateur

**Figure II.2:** Refroidisseur à grilles

**Figure II.3:** Principe de fonctionnement du module ETA

**Figure II.4:** Schématisation d'un refroidisseur à couloir

**Figure II.5:** Transfert de chaleur par conduction

**Figure II.6:** Mode de transfert de chaleur par convection

**Figure II.7:** Mode de transfert de chaleur par rayonnement

**Figure II.8:** Distribution des températures dans un échangeur à co-courant

**Figure II.9:** Distribution des températures dans un échangeur à contre-courant

**Figure II.10:** Echangeur tubulaire coaxial

**Figure II.11:** Rendement de récupération en fonction de la hauteur de la couche

**Figure III.1:** Profil de la densité de soufflage le long du refroidisseur

**Figure III.2:** Différentes phénomènes de transfert de la chaleur

**Figure III.3:** Densité de soufflage par chambre en avril 2015

**Figure III.4:** La densité de soufflage en décembre 2014

**Figure III.5:** Présentation de pression de la couche dans les chambres

**Figure III.6:** Température de l'air secondaire en fonction de la pression de référence

**Figure III.7:** Température de l'air exhaure en fonction de la pression de référence

**Figure III.8:** Courbe caractéristique de ventilateur

**Figure III.9:** Ventilateur centrifuge

**Figure III.10:** Ventilateur axiale

# Tableaux

**Tableau I.1:** Le pourcentage des éléments chimiques composants dans la matière première

**Tableau I.2:** Température atteintes dans chaque étage

**Tableau III.1:** Bilan de matière solide

**Tableau III.2:** Les résultats des débits

**Tableau III.3:** Les résultats de mesure des chaleurs

**Tableau III.4:** les résultats de mesure des débits

**Tableau III.5:** Les résultats de mesure de la pression en fonction de température

**Tableau III.6:** Les résultats de mesure des chaleurs

# Introduction générale

Face à une population mondiale et à un développement croissant, les besoins en produits cimentiers pour la construction des bâtiments et des infrastructures sont considérables.

La production du ciment passe par une ligne de cuisson composée par un échangeur, un four et un refroidisseur.

Le sujet proposé, portera sur le processus de refroidissement.

Ce choix a été fait car ce processus constitue le point faible de la ligne de cuisson suite aux problèmes liés à l'augmentation de la température d'air exhaure ; celle-ci atteignant **400 °C** environ, alors qu'elle devrait être de l'ordre de **250 °C**.

A cet effet, voilà les objectifs de ce travail:

- ✓ S'assurer qu'il y a une bonne récupération de l'énergie, et donc une bonne répartition thermique.
- ✓ Optimiser les paramètres de fonctionnement du refroidisseur.
- ✓ Déterminer le point où il faut augmenter le soufflage.

Pour aboutir à ces objectifs, nous avons adopté la méthodologie suivante :

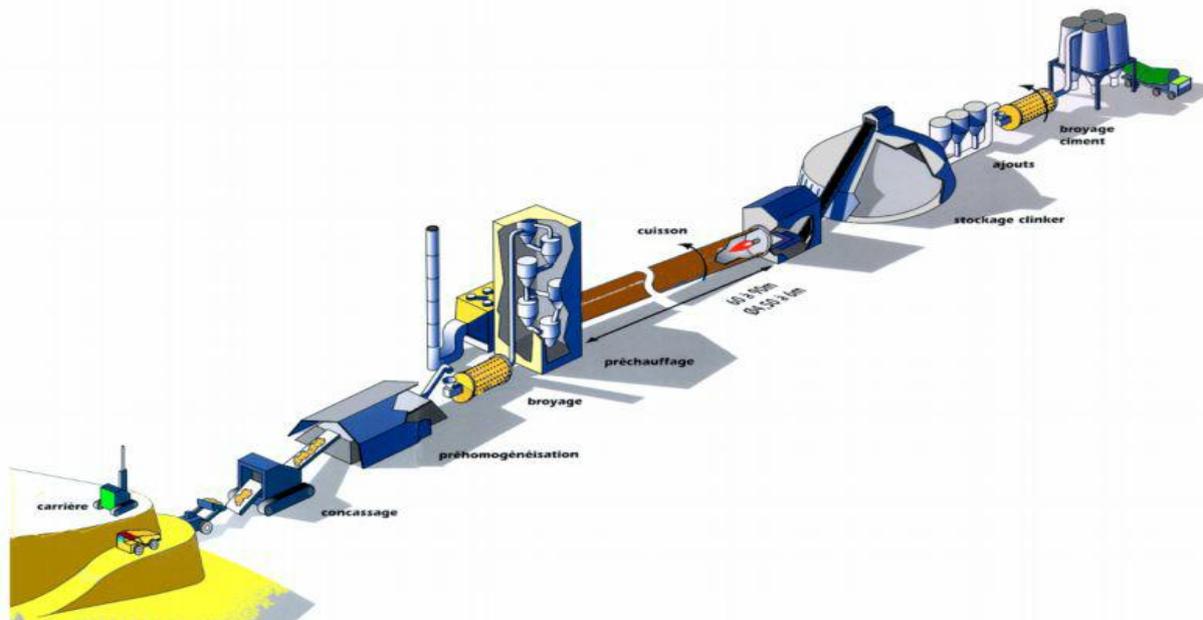
- Comprendre le procédé de fabrication et le processus de la ligne de cuisson.
- Etablir les bilans de matière, thermique et aéraulique.
- Interpréter les résultats des bilans.
- Effectuer des essais de performance qui peuvent être les causes de l'augmentation de la température de l'exhaure.
- Proposer les axes d'amélioration à partir d'une solution optimale.

Pour cela nous avons structurés notre rapport comme suit:

- **Dans Le chapitre I** présente la société **LAFARGE CIMENT** et décrit le procédé de fabrication ciment.
- **Dans Le chapitre II** s'intéresse en détail au refroidissement du clinker.
- **Dans Le chapitre III** est consacré à la présentation des bilans thermique, aéraulique et de matière, à leurs interprétations. Nous traiterons aussi les essais de performance effectués sur le refroidisseur tout en proposant des solutions.
- Nous terminerons ce rapport par une conclusion sur tous les résultats obtenus et nous donnerons quelques perspectives pour ce sujet.

## Chapitre I: Description de Lafarge et processus de fabrication

Ce chapitre portera sur deux parties: la première présentera la société (LAFARGE CIMENT), la seconde décrira le processus de production.





## **I.1. Lafarge en évolution**

### **1.1. Présence mondial**

**LAFARGE**, est présent dans quatre activités principales: Ciment N°1, Granulats et Béton N°2, Toiture N°3, Plâtre N°4, et il est en particulier le N° 1 dans le marché mondial du ciment, existant dans **75** pays avec **77000** collaborateurs et **2200** sites industriels dans le monde. Son chiffre d'affaires, **en 2006**, s'est élevé à **14,9** milliards d'euros, Dont **47 %** dans le ciment, **33 %** dans le béton et les granulats, **11 %** dans le plâtre et **9 %** dans les toitures. Le groupe emploie environ **90 000** personnes dans le monde.

### **1.2. Lafarge Meknès**

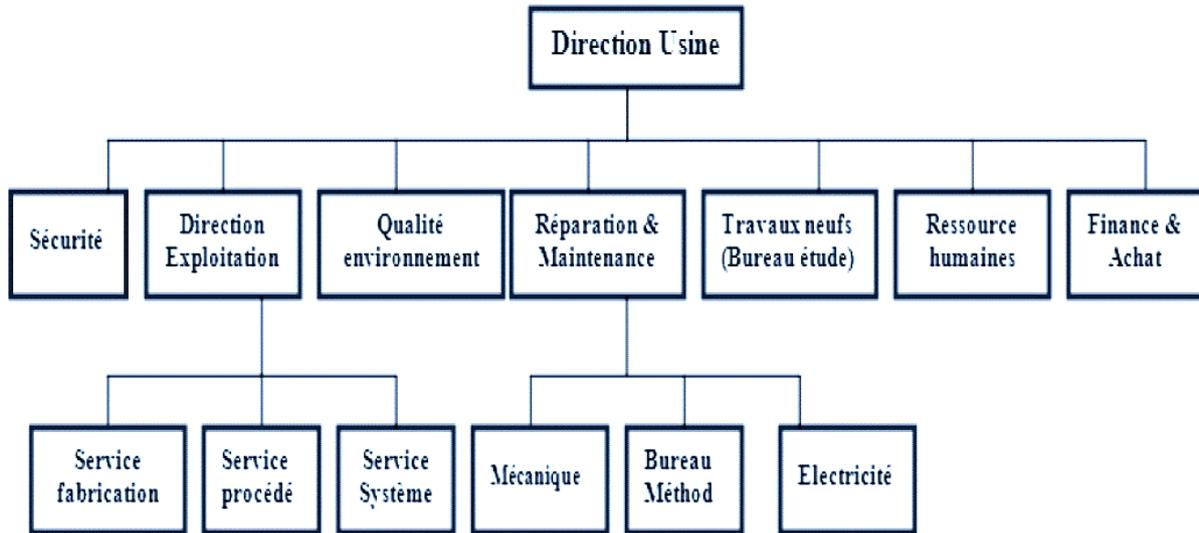
La cimenterie de **Meknès** se trouve au Nord-est de la ville à proximité immédiate de Hay Soussi et non loin de la route principale Meknès Fès. Est Dénommé **CADEM** (Ciments Artificiels de Meknès). en **1997**, il est devenu **LAFARGE CEMENTS** et faisait partie du groupe international **LAFARGE**, Au démarrage de l'usine en **1953**, avec une seule ligne de production à voie humide d'une capacité de **400 t par jour**, soit moins de **100 000 tonnes par an**.

### **1.3. Les installations**

**Lafarge** usine de Meknès dispose de:

- **2 halls** de pré homogénéisation.
- **2 Broyeurs** verticaux.
- **2 tours** d'homogénéisation.
- **2 lignes** de cuisson en voie sèche (Tour de préchauffage et four et refroidisseur).
- **3 broyeurs** ciment d'une capacité totale annuelle de **1.750.000 tonnes**.
- Un laboratoire d'analyse permettant d'assurer une logique de contrôle qualité aux Différentes étapes de la fabrication.
- Un atelier de stockage du ciment composé de **7 silos** d'une capacité totale de **22.000 t**.
- Atelier d'expédition sac et vrac.

## 1.4. Organigramme de l'usine Meknès



## 1.5. Fiche signalétique

<b>Capital social</b>	: 476 430 500 DH
<b>Capacité de production 1</b>	: 3 850 000 tonnes/an.
<b>Chiffre d'affaires en 99</b>	: 577 363 704.00 DH
<b>Répartition du capital</b>	: *LAFARGE 50% *SNI 50%
<b>Capacité de production 2</b>	: 1 250 000 tonnes/an.
<b>Chiffre d'affaires en 99</b>	: 577 363 704.36 DH
<b>Produits fabriqués</b>	: *CPJ45 en sac et en vrac. *CPJ35 en sac. *CPA 55 en sac
<b>Effectif du personnel</b>	: 331 personnes.
<b>Cadres</b>	: 19 cadres.
<b>Agents de maîtrise supérieurs</b>	: 13 agents.
<b>Agents de maîtrise moyens</b>	: 14 agents.
<b>Agents de maîtrise simples</b>	: 29 agents.

## I.2. Le ciment: matière de production

### 2.1. Définition, désignation et composition

Le ciment est une poudre minérale artificielle possédant des propriétés de liant hydraulique.

- **Poudre:** Co-broyage de clinker (avec des ajouts).
- **Minérale:** composés principaux : **Silice(S)**, **Alumine(A)**, **Oxyde de fer(F)**, **Chaux(C)**.

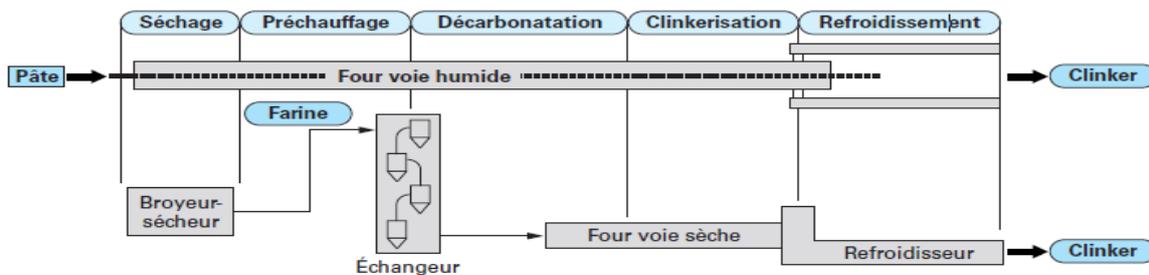
- **Artificielle:** le clinker est obtenu par la cuisson vers **1450 °C** de matières premières.
- **Liant:** utilisation comme « colle » dans la construction.
- **Hydraulique:** prend à l'eau.

## 2.2. Les différentes voies de fabrication du ciment

Les procédés de fabrication de ciment sont au nombre de deux, ils diffèrent selon la nature de l'alimentation du four, on parle du procédé par voie humide et celui par voie sèche.

A Lafarge on s'intéressera au procédé de fabrication par voie sèche, qui présente une suite d'étapes de transformation physiques et chimiques de la matière première qui est dans ce cas la farine, au contraire de la voie humide dont la matière est bien pâteuse.

Résumons les procédés sèche et humide dans le schéma suivants:



**Figure I.1: Procédé par voie sèche / humide**

## I.3. Procédé de fabrication

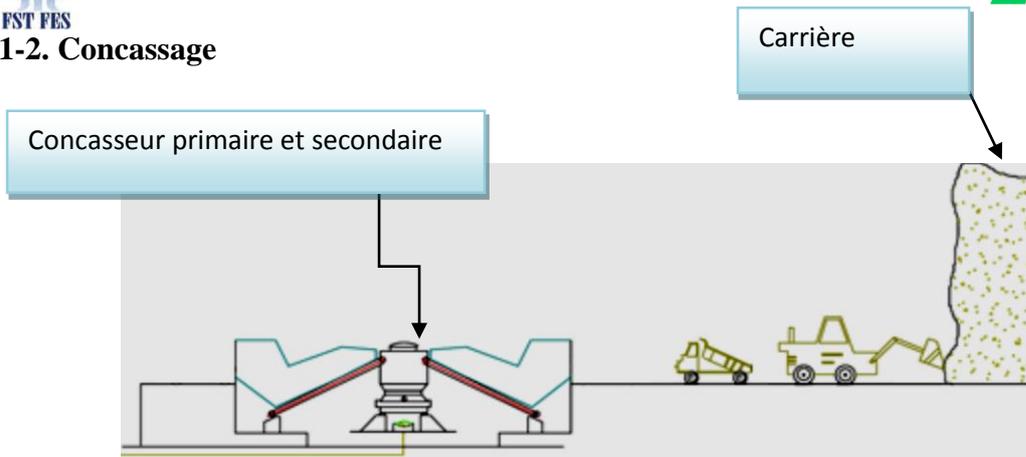
### 3.1. Préparation des matériaux

#### 3.1.1. L'extraction de la matière - carrière

La carrière est située à **5,6 Km** de l'usine, la matière première est extraite sur des fronts de **8 à 15 mètres** par abattage et tirs de mines. Les blocs de calcaire extraits peuvent atteindre **1 m<sup>3</sup>** de volume.

composé	Teneur en %	Composé	Teneur en %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (F)	3- 4	SiO <sub>2</sub> (S)	21- 25
CaCO <sub>3</sub> (C)	64 - 69	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	4 - 6

**Tableau I.1: Le pourcentage des éléments chimiques composants dans la matière première.**



**Figure I.2: Parcours de la matière première de la carrière au concassage**

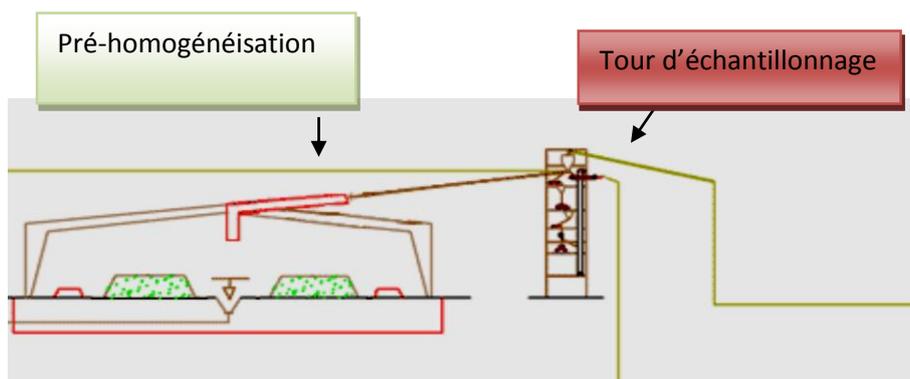
A la sortie du concasseur secondaire, la granulométrie de la matière est réduite à moins de **50 mm**

### 3-1-3. Echantillonnage

L'échantillonnage permet d'ajuster la composition chimique de la matière envoyée dans l'un des deux halls de pré-homogénéisation.

Ce dernier est fait pour vérifier que notre matière correspond aux objectifs visés, déterminant la qualité du produit fini.

### 3-1-4. Production du tas pré homogénéisé

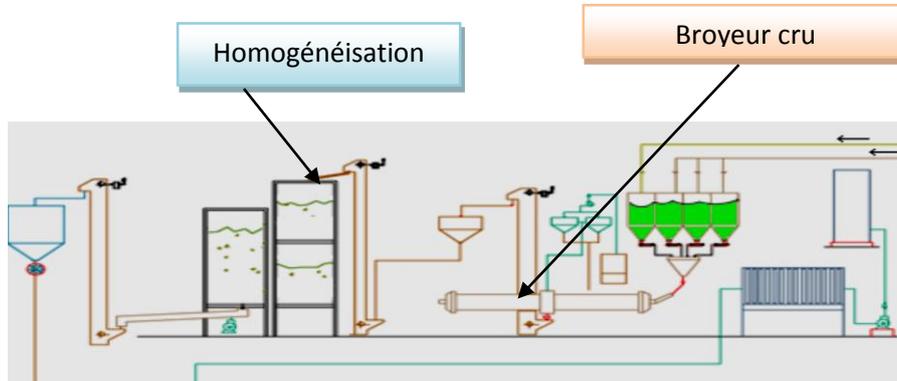


**Figure I.3: Pré-homogénéisation**

Chimiquement, les matières de carrière sont souvent variables donc il faut les mélanger pour éviter les variations brusques qui ont un impact néfaste sur la cuisson. C'est en fait le rôle du pré-homogénéisation.

## 3-2. Traitement et cuisson de cru

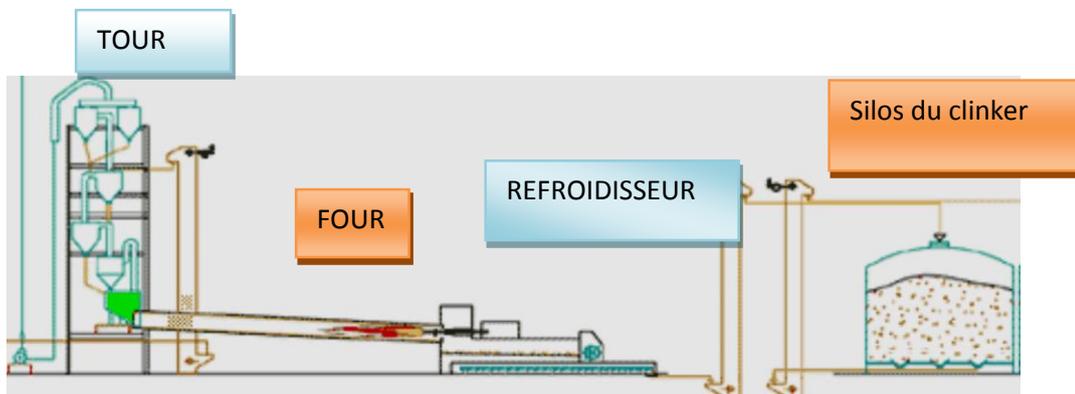
### 3-2-1. Traitement du cru -Production de la farine



**Figure I.4: Enchaînement de la préparation du cru**

Le **broyeur cru** est un tube cylindrique à galets, la montée et la descente des galets écrasent la matière qui se trouve entre ces galets et la piste tournante.

### 3-2-2. Cuisson du cru -Production du clinker



**Figure I.5: Production du clinker**

La matière première- farine- subit une série de modification jusqu'à transformation en clinker, passant par une ligne de cuisson composé **d'un tour échangeur, four rotatif et un refroidisseur.**

- La tour de préchauffage

La **tour EVS** (échangeur à voie sèche) est composée de quatre étages: 4 cyclones, un étage chacun, les échanges thermiques s'effectuent à contrecourant entre la matière et les gaz chaud provenant du four.

La matière crue qui pénètre dans le four est alors complètement déshydratée et partiellement décarbonatée.

Les températures atteintes dans chaque étage de la tour sont données comme suivant:

Etage 1	Etage 2	Etage 3	Etage 4
370	570	750	870

**Tableau I.2: Températures atteintes dans chaque étage**

Les transformations que la farine subit :

- ✓ **La déshydratation:** la farine contient environ **0.2 %** d'humidité. Cette quantité d'eau s'évapore en contact avec les gaz chauds provenant du four.
- ✓ **la décarbonatation:** la farine crue déshydratée se décarbonate jusqu'à **75%**,

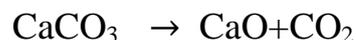


- Un four rotatif

Après la tour, on vient au four qui est composé de **deux zones**:

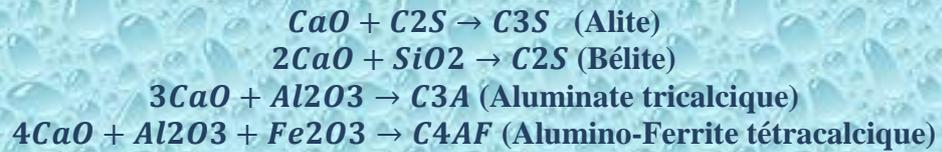
- ✓ **Zone de décarbonatation:** Elle occupe la première partie en amont du four, le reste de carbonate de chaux (**10%**) perd son gaz carbonique et la chaux amorce le processus des différentes combinaisons avec les autres éléments.

La réaction de décarbonatation est :



- ✓ **Zone de clinkérisation:** jusqu'à **1500 °C**, c'est la zone la plus importante et la plus chaude du four rotatif. Dans cette zone le Ferro-aluminate tétra-calcique apparaît le premier avec une consistance pâteuse ou liquide. Lorsque le fer est épuisé par cette réaction, il se forme de l'aluminate tricalcique fondu, ces deux corps fondus constituent la phase liquide des fours à ciment. Celle-ci dissout la silice et la chaux qui se combinent alors et se cristallisent sous forme de silicate bi et tricalcique.

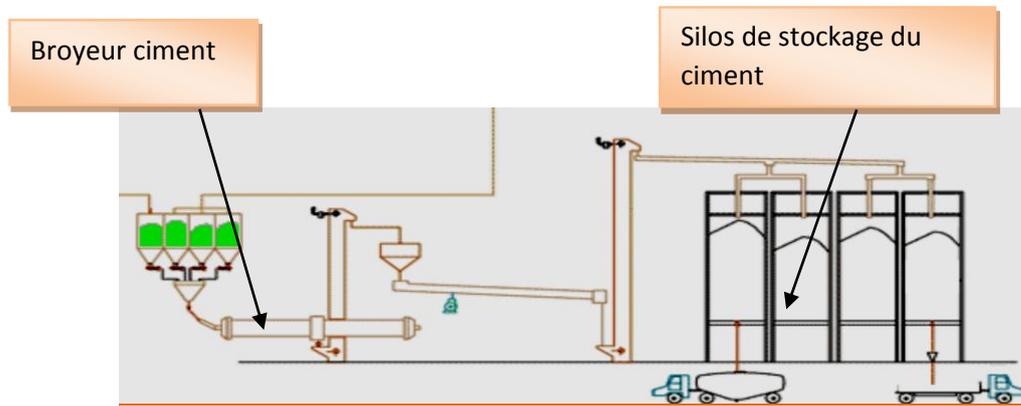
les réactions chimiques principales au niveau du four sont:



- Refroidissement

Finalement et à la sortie du four le clinker se présente sous forme de granules d'un diamètre de 5 à 40 mm Il est donc refroidi par l'air soufflé dans les compartiments, pour être ensuite conduit vers les silos de stockage.

### 3-3.Traitement du clinker



**Figure I.6: Production de ciment**

#### 3-3-1.Broyeur ciment

On vise à broyer simplement le clinker, le gypse et le calcaire en utilisant trois broyeurs:

- ✓ Broyeur à boulet de débit d'environ **52 t/h** destiné à la production du **CPJ 45**.
- ✓ Broyeur à boulet de débit d'environ **113 t/h** destiné à la production du **CPJ 35**.
- ✓ Broyeur à boulet d'environ **115t/h** destiné à la production du **CPA 55**.

Le broyeur ciment est composé de deux compartiments:

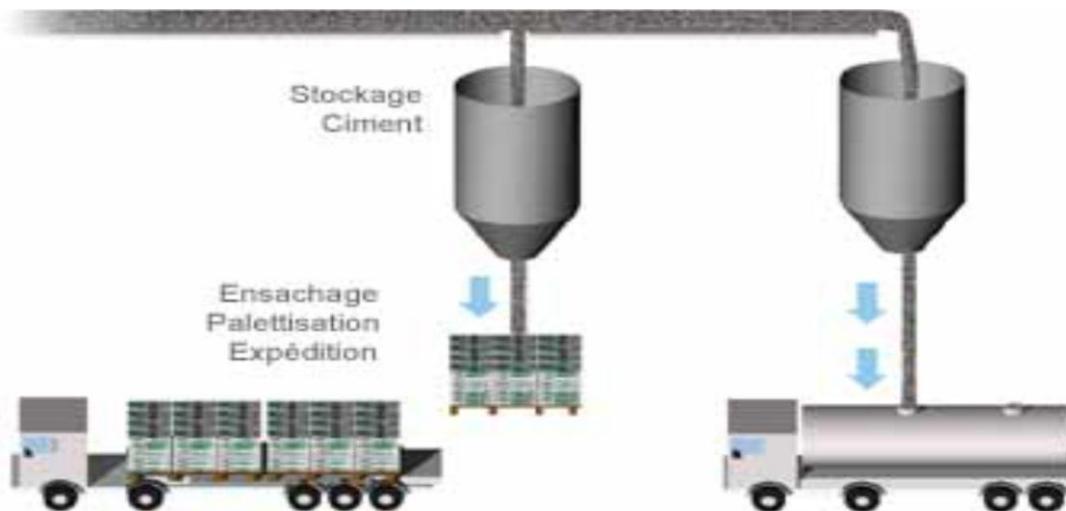
- Dans le premier compartiment, le broyage de la matière première se fait par des boulets entraînés par la rotation du broyeur. A cette vitesse, certains boulets seront entraînés et projetés sur les blindages releveurs et d'autres tomberont sous l'influence de leur poids; ils agiront par choc.

- Dans le deuxième compartiment qui est doté des blindages classant, les boulets rouleront les uns sur les autres. Ils agiront par frottement et écrasement.

### 3-4. Ensachage et Expéditions

Des équipements mécaniques et pneumatiques acheminent le produit vers quatre silos de stockage. La capacité de chacun est de **1800 tonnes**. Le silotage permet de conserver le ciment en empêchant son hydratation, ensuite vient la livraison comme suit:

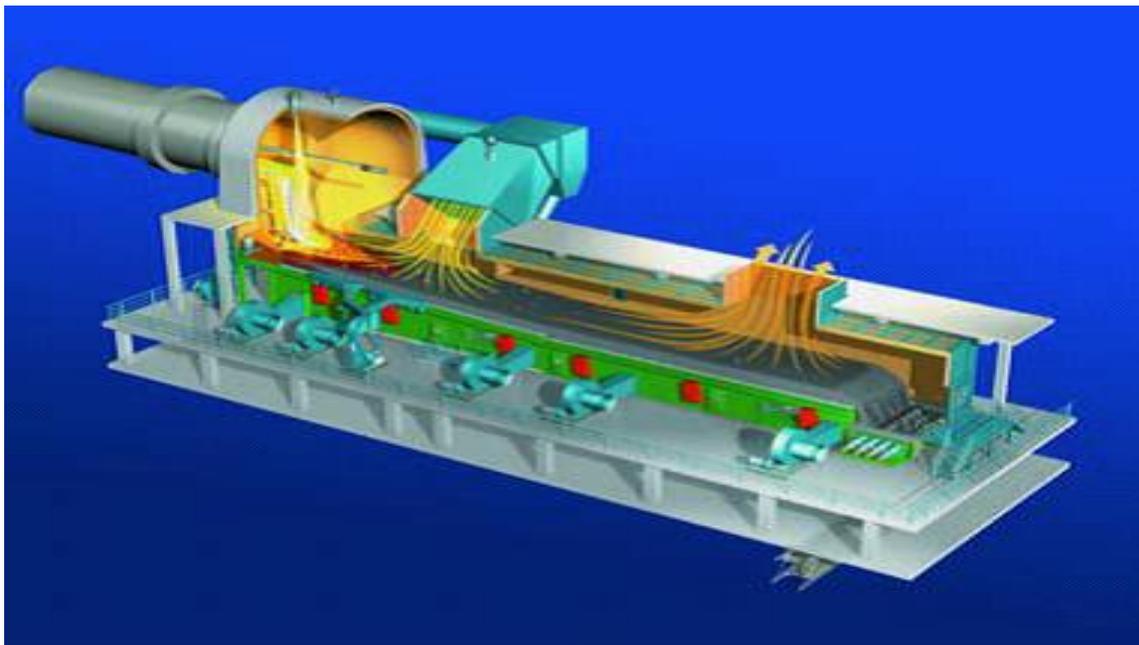
- ✓ **Livraison du ciment en sac:** Est obtenue à l'aide des machines automatiques de remplissage et de pesage. Le débit est de l'ordre de **50 T/h**. la capacité d'un sac est standardisée, et vaut **50 kg**.
- ✓ **Livraison en vrac:** Une manche télescopique ayant un débit de **250 T/h**, permet le remplissage direct des réservoirs des camions. Le principe du mode opératoire consiste à la fluidisation par pompes ou aéroglisteurs. Ce type de livraison est appelé en vrac.



**Figure I.7: la livraison de ciment**

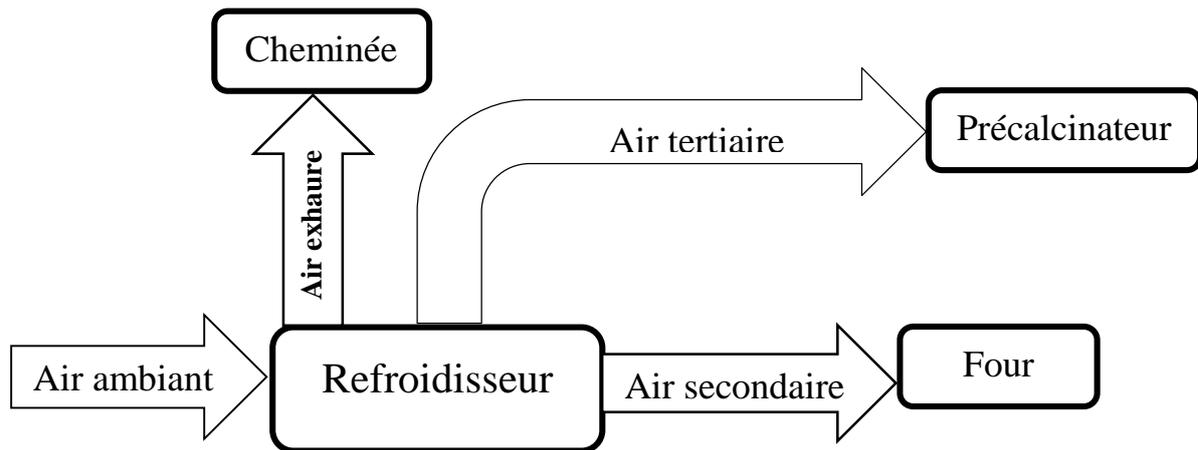
## Chapitre II: Description de fonctionnement du refroidisseur clinker

**L'objectif du présent chapitre est:** de décrire le fonctionnement du refroidisseur, son mécanisme du transfert de chaleur et ses paramètres influençant sur le refroidissement.



## II.1. Objectif du refroidissement

Pendant le processus de cuisson, les refroidisseurs utilisés en cimenterie, interviennent après le four rotatif afin de refroidir le clinker provenant de celui-ci. Ces équipements doivent réaliser trois fonctions simultanément:



**Figure II.1: Les airs récupérés au niveau du four et du précalcinateur**

- Tremper le clinker de façon à lutter contre la réversibilité de la réaction afin d'améliorer la qualité du clinker.



- Récupérer le maximum de calories emportées par le clinker à la sortie du four de façon à obtenir un air secondaire et un air tertiaire les plus chauds possibles (une température d'exhaure la plus faible possible) et afin que ces températures soient stables pour obtenir un fonctionnement régulier du four.
- Assurer un refroidissement suffisant du clinker de telle sorte que le système de transport vers le silo de stockage ne subisse pas de surchauffe et éviter une perte de chaleur très importante.

## II.2. Types et principes de fonctionnement des refroidisseurs de clinker

### 2.1. Le refroidisseur rotatif

Il est constitué, comme le four rotatif, d'un tube tournant avec une inclinaison modérée. Jusqu'à sa moitié, le tube est revêtu de briques réfractaires et partiellement équipé d'éléments releveurs. La zone non briquetée est totalement garnie de dispositifs releveurs.

## 2.2. Les refroidisseurs à ballonnets

Ce refroidisseur se compose de **9 à 11 tubes** qui sont montés concentriquement autour du tronçon terminal du four, Le flux de clinker est divisé dans ces tubes de refroidissement, situés sur la circonférence du four et Ils suivent sa rotation. Le refroidissement du clinker commence dans le four. Le brûleur est toujours inséré dans le four, une zone de refroidissement se créant ainsi derrière la flamme. Après être tombé dans les bottes (tubes), le clinker chaud est refroidi par l'air en contre-courant.

Pour Lafarge ciments, le système de refroidissement est composé de deux refroidisseurs:

- **Le refroidisseur à grilles.**
- **Le refroidisseur à couloir.**

## 2.3. Le refroidisseur à grilles

Il se trouve dans la deuxième ligne de production, constituées de deux grilles inclinées formées par des séries de plaques munies d'ouverture qui sont alternativement fixes et mobiles (comme le montre la figure ci-après) assurant ainsi le déplacement du clinker.



**Figure II.2: Refroidisseur à grilles.**

Le refroidisseur à grilles représente **les avantages** suivants:

- Bonne capacité de mélange Air/Clinker.
- Refroidissement rapide du clinker.
- Capacité élevée de production.
- Une partie de l'air non récupérée peut être utilisée dans d'autres ateliers, comme par exemple, le broyage ciment.

Comme chaque système, le refroidisseur à **ces inconvénients**:

- Contient de nombreuses parties mobiles donc plus de manutention.
- Difficile d'opérer avec un clinker très fin.
- Réglage plus compliqué.

## 2.4. Le refroidisseur à couloirs

Il est constitué de deux modules: module **HE** placé en amont du refroidisseur suivi du Module **ETA** situé à son aval.

### 2.4.1. Le module HE (haut efficacité)

Le module HE est réalisée par du béton réfractaire permet une répartition du clinker sur les couloirs de transport, et c'une grille constitué d'un cadre avec une caisse d'aération intégré dans la partie supérieur.

Cette section recouverte des plaques évite le passage des poussières. Son premier objectif est d'assurer une trempe rapide avec une autoprotection constante grâce à la présence d'une couche morte du clinker tout en prévenir la formation des chandelles par l'existence des canons à air ce qui permet une bonne répartition du clinker et par conséquent diminution des rivières rouges. Ainsi on a les avantages et les inconvénients de ce module:

#### Les Avantages

- Réglage simple.
- Accumulation de clinker bénéfique pour la stabilité de l'opération du four.
- Sans parties mobiles donc une fiabilité mécanique.
- Meilleure protection contre la charge thermique du clinker.

#### Les inconvénients

- Requier des ventilateurs à pressions plus élevées.
- Le nombre de séries qui sont "balayées" par les canons à air est limité par la hauteur de l'accumulation de clinker.

### 4.2.2. Le module $\eta$ : ETA (symbole Grec de l'efficacité)

Il est connu par sa conception modulaire, constitué de **5 chambres** qui soufflent de l'air par des ventilateurs.

## Le principe de fonctionnement des couloirs

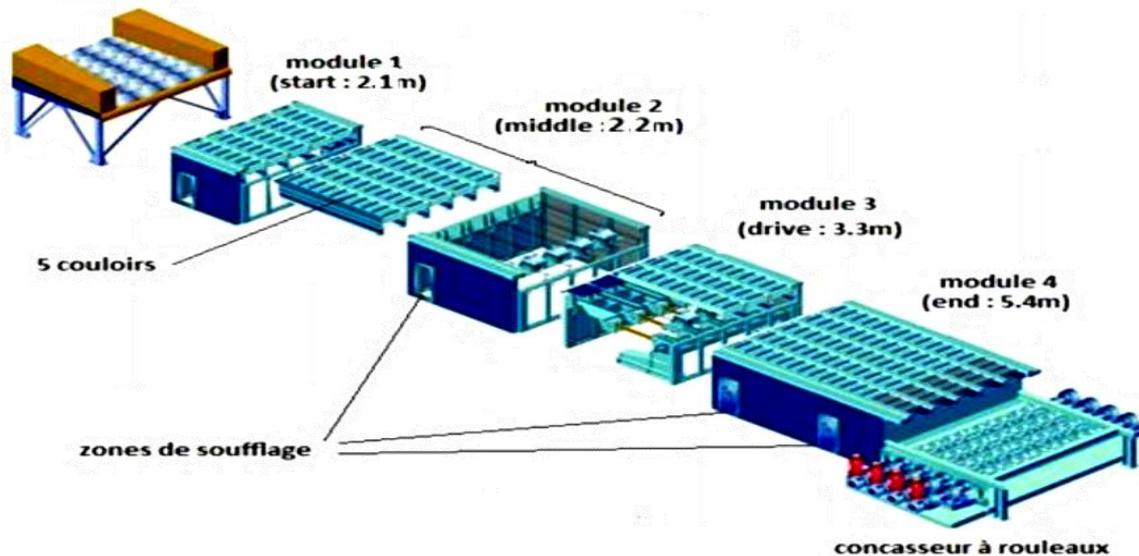
En premier temps les cinq couloirs du refroidisseur se déplacent vers l'avant, puis ils reculent deux à deux à leur position initiale comme la montre la **figure ci-dessus**, permettant ainsi le déplacement de la matière et le cycle recommence.



**Figure II.3: Principe de fonctionnement du module ETA**

Ce dernier optimise les performances du refroidisseur et on a ainsi **ces avantages**:

- ✓ Excellent rendement thermique et fiabilité mécanique.
- ✓ Faible taux d'usure.
- ✓ Distribution régulière du clinker par ajustement individuel de la longueur de déplacement des éléments de transport.
- ✓ Débit de soufflage réglable individuellement dans les compartiments du refroidisseur.
- ✓ Pas de chutes donc pas d'équipement de transport mécanique ou pneumatique pour les poussières.
- ✓ Excellente efficacité du transport de la couche de clinker.
- ✓ Montage très rapide.



**Figure II.4: Schématisation d'un refroidisseur à couloir**

#### 4.2.3. Concasseur

À la sortie du refroidisseur un Concasseur est placé pour concasser le clinker. Sa conception est modulaire pour des capacités de **12000 t/j**. sa faible vitesse de rotation est garantie pour une durée plus élevée.

### II.3. Ventilateurs de soufflages et d'exhaure

#### 3.1. Ventilateur de soufflage

Le refroidissement du clinker est assuré par de l'air soufflée moyennant **9 ventilateurs**. On a donc des échanges thermiques entre l'air en entrée et la matière ce qui permet l'abaissement de sa température en allant de l'amont vers l'aval du refroidisseur.

Un réglage judicieux des ventilateurs en amont et en aval du refroidissement est obligatoire pour:

- Bien refroidir le clinker jusqu'à la température désirée.
- Une bonne récupération des gaz chauds au niveau de la partie HE pour la combustion au four (air secondaire) ainsi qu'au Précalcinateur (air tertiaire).

Le reste des gaz appelé « **air exhaure** » rejeté dans l'atmosphère après avoir été refroidi.

### 3.2. Ventilateur d'exhaure

L'air exhaure sorti de refroidisseur passe par un échangeur en diminuant sa température et un filtre pour séparer la poussière ascendante et le gaz, les éléments major qui réalisent cette opération sont les ventilateurs d'exhaure permettant:

De régler le débit d'air exhaure à l'aide des ouvertures des registres d'entré des ventilateurs

D'assurer la régulation entre pression capot de chauffe (jonction four /refroidisseur) qui devrait être **-1mbar** et le % d'ouverture des registres qui permettent de régler le débit de ce ventilateur en fonction de la température de sortis en laissant sa vitesse constante.

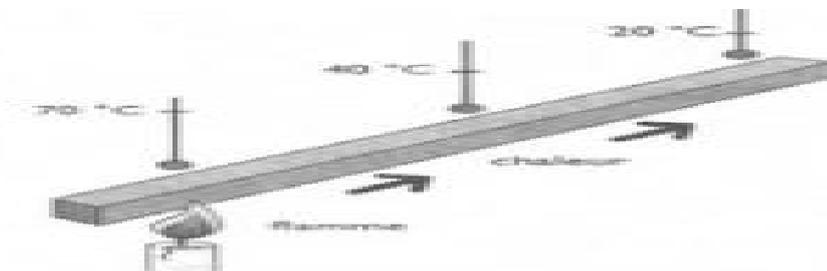
Durant ce projet, et spécifiquement au niveau du refroidisseur, nous avons recourt aux 3 modes de transfert de chaleur afin de pouvoir déterminer les échanges thermiques existant entre la granulométrie du clinker et l'air de soufflage, pour voir si cette dernière influence sur la température d'exhaure.

## II.4. Mécanisme de transfert de chaleur dans les refroidisseurs de clinker

On connaît à la norme 3 modes de transfert de chaleur:

### 4.1. Transfert de chaleur par conduction

Se produit dans les corps solides. Toute différence de température entre les deux faces d'un matériau entraine une migration (d'une molécule à une autre molécule, de proche en proche) du flux de chaleur, de la face chaude vers la face moins chaude, jusqu'à l'équilibre thermique entre ces deux faces.



**Figure II.5: transfert de chaleur par conduction**

La quantité de chaleur échangée est donnée par la formule suivante:

$$\phi = K S (T_C - T_f)$$

$\phi$ : La quantité de chaleur échangée par unité de temps en watt (W).

$K$ : le coefficient d'échange en  $(W. m^{-2}.K^{-1})$ .

$S$ : La surface d'échange en  $(m^2)$ .

$T_c, T_f$ : Température des parois en kelvin (K)

## 4.2. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient. La convection peut être naturelle (ou libre) quand c'est l'échange de chaleur lui-même qui est à l'origine du mouvement. Elle peut être forcée si un dispositif mécanique fait circuler le fluide.



**Figure II.6: mode de transfert de chaleur par convection**

La quantité de chaleur échangée est donnée par la formule suivante:

$$\phi = hS(T_p - T_f)$$

Avec :

$\phi$ : La quantité de chaleur échangée par unité de temps.

$h$ : Le coefficient de transfert de chaleur par convection.

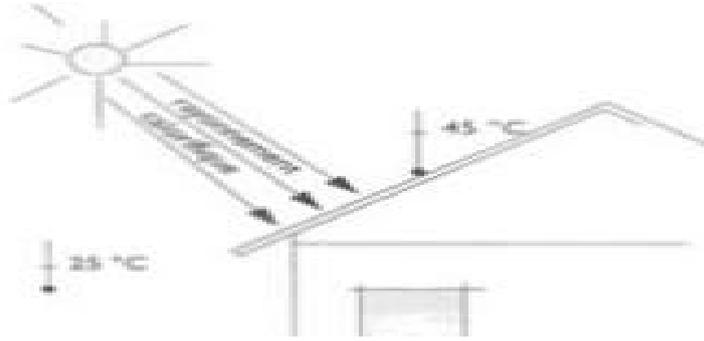
$S$ : La surface d'échange.

$T_p$ : Température des parois.

$T_f$ : Température du fluide (air).

## 4.3. Transfert de chaleur par rayonnement

C'est émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide. Il s'agit du rayonnement électromagnétique.



**Figure II.7: Mode de transfert de chaleur par rayonnement**

Le flux de chaleur transféré dans un corps noir est donné par la relation suivante:

$$\phi = \sigma A (T_c^4 - T_f^4)$$

Avec:

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

#### 4.4. Dualité conduction-convection

La température atteinte par l'air de refroidissement dépend du rapport de vitesses des deux phénomènes la convection et la conduction.

En effet, si la conductibilité du granule est grande, vitesse de migration infinie, toute quantité de chaleur extraite de la surface est aussitôt remplacée par la chaleur provenant des zones centrales en abaissant légèrement la température du granule qui de plus est uniforme. L'air extrait alors la quantité maximale de chaleur extractible par les lois de la convection: il sera très chaud. Dans ce cas, c'est la convection qui limite le refroidissement. Si au contraire la conductibilité du granule est nulle, la chaleur extraite en surface n'est jamais remplacée et le refroidissement s'arrête immédiatement: l'air est froid. Dans ce cas, c'est la conduction qui limite le refroidissement.

#### 4.5. Généralités sur les échangeurs de chaleur

##### 4.5.1. Définition

Un échangeur de chaleur est un dispositif destiné à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre. On se limitera aux échangeurs les plus courants, dont les deux fluides sont séparés par une paroi à travers laquelle s'effectuent les échanges thermiques.

##### 4.5.2. Classification des échangeurs

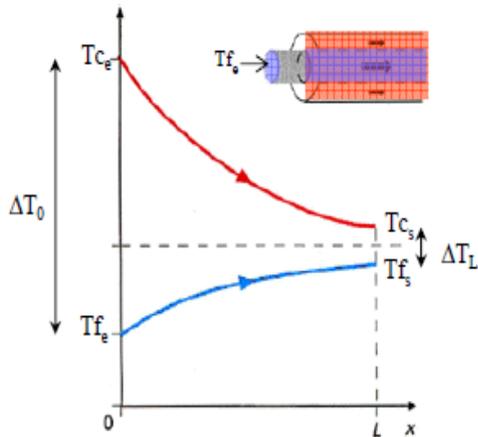
On distingue deux types d'échangeurs:

###### a) Echangeur à courants parallèles (co-courant)

Dans lequel les deux fluides s'écoulent parallèlement dans le même sens.

## b) Echangeurs à courants parallèles (contre courants)

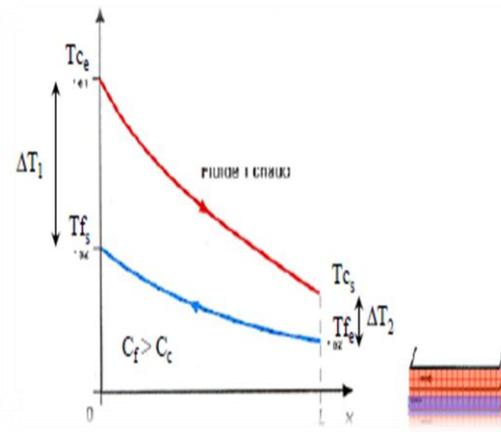
Dans lequel les deux fluides s'écoulent parallèlement au sens différents.



**Figure II.8: Distribution des températures dans un échangeur à Co-courant**

La puissance échangée par ces deux types d'échangeurs à partir de la différence logarithmique des températures:

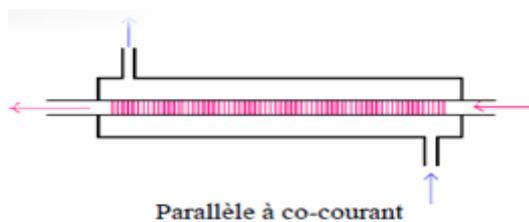
$$\Phi = k \frac{(T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe})}{\text{Log} \frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}}} S$$



**Figure II.9: Distribution des températures dans un échangeur à contre-courant**

$$\Phi = k \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\text{Log} \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}} S$$

L'échangeur utilisé par l'entreprise est l'échangeur tubulaire coaxial à contrecourant constitué de deux tubes, un fluide circule dans le tube central tandis que l'autre circule dans le tube l'annulaire.



**Figure II.10: Echangeur tubulaire coaxial**

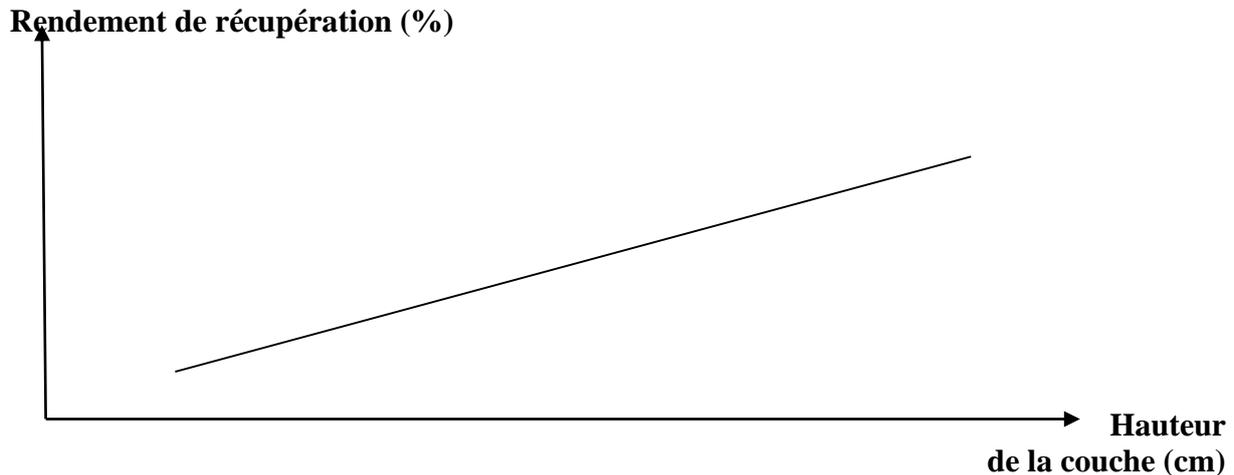
## II.5. Les paramètres influençant le refroidissement

### 5.1. Influence de la taille des granules

Une diminution de la taille des granules favorise les échanges thermiques tant par conduction que par convection. La granulométrie du clinker est un paramètre le plus souvent subi (dépend de la vitesse de rotation du four, composition chimique de la farine...) que contrôlé.

## 5.2. Influence de la hauteur de la taille du clinker

Une forte hauteur de couche en amont favorise le rendement de récupération (air secondaire très chaud).



**Figure II.11: rendement de récupération en fonction de la hauteur de la couche**

En fonctionnant en couche épaisse, le rendement et la consommation calorifique, sont meilleurs, et la température de l'air secondaire est donc plus stable, aussi la marche du four.

Le maintien d'une hauteur de couche épaisse peut parfois être délicat dans le cas de clinker fin, Le passage d'une couche mince à une couche épaisse entraîne généralement le changement de tous les ventilateurs, car il leur faut travailler à un débit beaucoup plus grand.

## 5.3. Influence de la densité de soufflage

Le refroidissement du clinker s'effectue en courant croisé avec de l'air ambiant soufflé par les neufs ventilateurs installés le long du refroidisseur. On a vu que les lois de conduction et de convection assure un transfert de chaleur lié à la quantité d'air entrant en contact avec la couche du clinker. Il faut par conséquent augmenté le plus possible la quantité d'air en respectant les contraintes de récupération.

## II.6. Réglage du refroidisseur

Le cuiseur du four doit régler le fonctionnement du refroidisseur de telle sorte à atteindre les objectifs suivants:

- ✓ A la sortie du refroidisseur, la température du clinker doit être suffisamment faible pour ne pas détériorer le système de transport du clinker et d'éviter une perte de chaleur très importante.



- ✓ La température de l'air secondaire doit être stable et la plus élevée possible pour obtenir un fonctionnement régulier du four et une bonne efficacité de chauffage.
- ✓ La température et le volume d'air d'exhaure doivent être les plus faibles afin de limiter les pertes de chaleur vers l'atmosphère.
- ✓ La pression du capot de chauffe sera maintenue légèrement négative, a **-1 mbar**.
- ✓ L'épaisseur de la couche de clinker doit assurer le passage de l'air de refroidissement
- ✓ Les surchauffes des grilles, des pièces de commande, des couloirs, des parois doivent être évitées.

Le cuiseur dispose de deux actions pour la poursuite de ces objectifs:

- ✓ La variation de la pression de la couche: la vitesse des couloirs change automatiquement de telle sorte à avoir la pression choisie.
- ✓ La variation de la distribution d'air de refroidissement.

S'il se produit une surchauffe dans le refroidisseur le cuiseur peut:

- ✓ Diminuer la quantité de clinker chaud entrant dans le refroidisseur en diminuant la vitesse de rotation du four.
- ✓ Réduire la température du clinker en agissant sur le profil de la flamme de façon à éloigner la zone de cuisson de la sortie du four.

## Chapitre III: Travail, résultats et interprétations

**Dans ce chapitre:** nous avons essayé de calculer et réaliser les bilans de matière, aéraulique et thermique. Interpréter les résultats et dégager les solutions dont une sera pratiquement réalisable

## III.1. Les bilans aéraulique, thermique et de matière

### 1.1. Introduction

Les bilans de matière, aéraulique et thermique permettent la détermination de la composition et la quantité des divers flux de matière entrant et sortant des appareils ainsi que les températures de ces flux et les quantités d'énergie échangées.

Pour réaliser un bilan il faut commencer par définir le système sur lequel on va effectuer ce bilan, dans notre cas ce système est le refroidisseur de clinker.

Les bilans thermiques du refroidisseur présentent des informations importantes sur le processus de transfert de chaleur du système de refroidissement et fournissent des renseignements extrêmement utiles sur les rendements de récupération, permettant ainsi la détermination des anomalies et des problèmes qui pourtant être cause de la problématique posée.

A l'aide de ces bilans, je vais pouvoir:

- Tester si la température excédentaire à une liaison directe soit il ou indirecte avec l'efficacité de refroidissement et le rendement de récupération.
- Détecter les causes et les facteurs de l'augmentation de la température d'air exhaure à la sortie du refroidisseur.

### 1.2. Réalisation des bilans

Pendant les bilans, il faut garder la ligne de cuisson à son état stable: le régime de l'installation étant stable, il suffit d'effectuer une seule fois chacune des mesures et chacun des prélèvements de matière (farine, clinker). Mais, à ne pas oublier que le régime du four est plus ou moins irrégulier. Pour cela:

- ⇒ Il est nécessaire de multiplier les mesures et les prélèvements à effectuer aux divers points de l'installation.
- ⇒ La durée des mesures doit être suffisante pour obtenir une bonne moyenne sur les résultats.
- ⇒ La durée du bilan ne doit pas être trop longue pour des raisons de coût, de risques de variations involontaires, etc. C'est pour cela qu'on a fait notre bilan sur une période de 24 heures.

La réalisation du bilan thermique passe par quatre étapes:



### **1.2.1. Première étape: Préparation**

Elle consiste en:

- La détermination des paramètres à mesurer, la durée que prend l'établissement du bilan et la fréquence des mesures.
- La préparation des équipements nécessaires: \*Tube de PITOT.

\*Thermocouple.

\*Analyseur des gaz.

\*Camions pour la pesée du clinker.

- La définition des points d'échantillonnage et de mesure.

### **1.2.2. Deuxième étape: exécution**

- Analyser les gaz au niveau de la boîte à fumée.
- S'assurer des mesures.

### **1.1.3. Troisième étape: évaluation**

- C'est lors de cette étape qu'on doit procéder aux calculs du bilan thermique.
- Evaluer la cohérence des résultats obtenus.

### **1.1.4. Quatrième étape: interprétation**

- Tirer des interprétations et des conclusions.
- Détecter les anomalies et les facteurs sur lesquels il faut agir pour augmenter les performances du refroidisseur, et pour diminuer la température de l'air exhaure dans notre cas.
- Faire une optimisation de l'état actuel et spécifier les valeurs des paramètres Influençant sur le refroidissement, et donc sur la fluctuation de la température de l'air excédentaire.

## **➤ Théorie des bilans**

### **1.3. Bilan matière**

#### **Le rapport Farine / Clinker (F / C)**

Ce rapport permet de déterminer la quantité des unités de masse de la farine demandée pour produire une unité de clinker. On a:

$$\frac{F}{C} = \frac{\text{quantité de farine consommée}}{\text{quantité de clinker produit}}$$

## 1.4. Bilan aéraulique

### 1.4.1. Calcul d'air secondaire

Une partie de l'air de refroidissement du clinker soufflé au niveau de l'amont du refroidisseur sert à la combustion du coke du pétrole dans le four. Cette quantité d'air est appelée air secondaire. Le bilan aéraulique sur le four donne le débit de cet air.

$$Q_{\text{entré}} = \frac{t * Q_{\text{coke}} * P_c}{(T_s - T_e) * c_{p \text{ air}}} + Q_{\text{excés}}$$

$$Q_{\text{entré}} = Q_{\text{sec}} + Q_p$$

Avec:

**Q<sub>p</sub>**: Débit volumique d'air primaire, il est décomposé en deux, air axial et radial et débit de transport du coke de pétrole par rapport à la tuyère, Il sert essentiellement au réglage de la forme de la flamme pour protéger les parois du four.

**Q<sub>sec</sub>**: Débit volumique de l'air secondaire.

**Q<sub>excés</sub>**: Débit volumique de l'air en excès.

**Q<sub>coke pétrole</sub>**: débit massique du coke de pétrole brulé dans le four exprimé en (t/h).

**T<sub>s</sub>**: température de sortie four en (°C).

**T<sub>e</sub>**: température d'entrée four en (°C).

**t**: temps de montée de température de T<sub>e</sub> à T<sub>s</sub> exprimé en (heure).

**P<sub>c</sub>**: pouvoir calorifique exprimé en (kcal/kg).

**C<sub>p air</sub>**: capacité calorifique d'air exprimé en (J/kg.°C)

**Remarque : Tous les débits volumiques sont exprimés en (Nm<sup>3</sup>/h).**

Les calculs doivent être en Nm<sup>3</sup>

Le (Nm<sup>3</sup>) désigne « normo-mètre cube », c'est une Unité de débit qui permet de comparer des mesures effectuées dans des conditions différentes à la place du (m<sup>3</sup>). c-à-d: permet de mesurer les débits à des conditions adéquates de température (20 °C) et de pression (1 atm).

La relation: 
$$\frac{t * Q_{coke} * Pc}{(T_s - T_e) * c_{p\ air}}$$

Provient de:

$$P \text{ (puissance)} = Q_{air} * C_{p\ air} * (T_s - T_e)$$

$$= \frac{H}{t} = Q_{coke} * Pc$$

$Q_{air}$  : débit d'air nécessaire pour assurer la combustion.

$C_{p\ air}$  : capacité calorifique de l'air.

La puissance exprimé en (**joule /h**).

On a:

$$(\% O_2)_{B.F} * Q_{s.f} = 21 * Q_{excés}$$

D'autre part on a:

$$Q_{s.f} = Q_f + Q_{pf} + Q_{excés}$$

Donc:

$$Q_{excés} = \frac{Q_f + Q_{pf}}{\left(\frac{21}{(\%O_2)_{bf}}\right) - 1}$$

Avec :

$Q_{s.f}$ : Débit des gaz à la sortie du four (**Nm<sup>3</sup>/h**).

$(\%O_2)_{bf}$ : Le pourcentage d'O<sub>2</sub> dans les gaz au niveau de la boîte à fumée.

$Q_f$ : Débit des fumées de la combustion du coke (**Nm<sup>3</sup>/h**),

$Q_{pf}$ : Débit de CO<sub>2</sub> dégagé lors de la décarbonatation de la farine (**Nm<sup>3</sup>/h**).

D'après ce qui précède:

$$Q_{sec} = \frac{t * Q_{coke} * Pc}{(T_s - T_e) * c_{p\ air}} + \frac{Q_f + Q_{pf}}{\left(\frac{21}{(\%O_2)_{bf}}\right) - 1} - Q_p \quad (1)$$

Le  $Q_{pf}$  est déduit à partir du débit  $D_{fc}$  de la farine chaude qui entre dans le four après sa décarbonatation dans la tour.



## 1.5. Bilan thermique

Procédure pour le calcul du bilan thermique

### 1.5.1. Calcul des chaleurs des entrées

#### a) Chaleur du clinker à la sortie du four

La chaleur sensible du clinker sortie four est exprimée (kcal/h) par la relation:

$$H_{e.clk} = Q_{clk} * C_p * (T_{e.clk} - T_e)$$

$Q_{clk}$ : débit massique du clinker sortis four (kg/h).

$C_p$ : Capacité calorifique du clinker (Kcal/kg °C).

$T_{e.clk}$ : Température du clinker à l'entrée du refroidisseur (°C).

#### b) Chaleur de l'air soufflé par les ventilateurs du refroidisseur

C'est la méthode la plus précise pour déterminer la quantité du clinker produite pour un débit farine bien déterminé. La chaleur sensible de cet air est donnée par:

$$H_{e.clk} = Q_{a.r} * C_{pair} * (T_s - T_e)$$

$Q_{a.r}$ : débit massique de l'air soufflé par les ventilateurs du refroidisseur clinker (kg/h).

$C_{pair}$ : Capacité calorifique de l'air (Kcal/kg °C).

$T_s$ : Température de l'air soufflé par les 9 ventilateurs du refroidisseur (°C).

### 1.5.2. Calcul des chaleurs des sorties

#### a. Chaleur du clinker à la sortie du refroidisseur

La chaleur sensible du clinker s'exprime par:

$$H_{e.clk} = Q_{clk} * C_{p.clk} * (T_{s.clk} - T_e)$$

Avec :

$Q_{clk}$ : débit massique du clinker (kg/h).

$C_{p.clk}$ : Capacité calorifique du clinker (kcal/kg °C).

$T_{s.clk}$ : température du clinker à la sortie (°C).



### b. Chaleur de l'air secondaire

Sa chaleur sensible est donnée par l'expression suivante:

$$H_{e.clk} = Q_{a.s} * C_{pair} * (T_{a.s} - T_e)$$

$Q_{a.s}$ : débit d'air secondaire (kg/h).

$C_{p.air}$ : Capacité calorifique de l'air (Kcal/kg °C).

$T_{a.s}$ : Température de l'air secondaire (°C).

### c. Chaleur de l'air tertiaire

$$H_{e.clk} = Q_{tert} * C_{pair} * (T_{tert} - T_e)$$

$Q_{tert}$ : débit massique de l'air tertiaire (kg/h).

$C_{p.air}$ : Capacité calorifique de l'air (Kcal/kg °C).

$T_{tert}$ : Température de l'air tertiaire (°C).

### d. Chaleur de l'air d'exhaure

C'est l'air sortant du refroidisseur et envoyé vers cheminée après avoir être refroidi et dépoussiéré. Sa chaleur sensible est:

$$H_{e.clk} = Q_{exh} * C_{p.a.e} * (T_{a.ex} - T_e)$$

$Q_{exh}$ : débit massique de l'air exhaure (kg/h).

$C_{p.a.e}$ : Capacité calorifique de l'air (Kcal/kg °C).

$T_{a.ex}$ : Température de l'air exhaure (°C).

**N.B** :  $T_e$  : température entrée dans le refroidisseur égale 20 °C.

### 1.5.3. Efficacité et rendement du refroidisseur de clinker

- Efficacité de refroidissement

L'efficacité de refroidissement est donnée par la relation suivante:

$$\theta = \frac{\text{chaleur cédée par le clinker}}{\text{chaleur initiale du clinker}} = \frac{H_{clk\ entrée} - H_{clk\ sortie}}{H_{clk\ entrée}} \quad (2)$$

- **Taux de récupération de la chaleur ou le rendement**

Ce rendement s'exprime comme le rapport de la quantité de chaleur extraite du clinker et utilisée pour la combustion à la quantité de chaleur totale contenue dans le clinker quittant le four, soit la formule:

$$\frac{\text{chaleur transporté dans l'air récupéré}}{\text{chaleur disponible à l'entrée}} = \frac{H_{as} + H_{tert}}{H_{clkin} + H_{a.r} * \left(\frac{Q_{as} + Q_{tert}}{Q_{a.r}}\right)} \quad (3)$$

$H_{clkin}$ : Chaleur sensible du clinker à l'entrée rapportée à sa masse.

$H_{a.r}$ : Chaleur sensible de l'air soufflée pour le refroidissement du clinker.

$H_{a.s}$ : Chaleur sensible de l'air secondaire.

$H_{tert}$ : Chaleur sensible de l'air tertiaire.

**Remarques:** tous les « H » du bilan thermique sont des chaleurs sensibles par unité de temps (heure).

- **Coefficient de récupération k**

Le coefficient k dépend du rendement du refroidisseur et signalé par la relation suivante:

$$K = \frac{-\ln(1-\eta)}{Q_{tet} + Q_{sec}} \quad (4)$$

Avec :

$Q_{tet} + Q_{sec}$  : volume de l'air de tertiaire et secondaire par kg du clinker.

Si:  $K < 0.9$ : récupération médiocre.  
 $0.9 < K < 1.2$ : récupération moyenne.  
 $1.2 < k < 1.4$ : bonne récupération.  
 $k > 1.4$ : très bonne récupération.

## 1.6. Résultats et interprétations

Dans ce qui suit, je vais présenter les différents résultats du bilan du refroidisseur qui vont nous permettre de dégager les causes de l'augmentation de la température exhaure.

### 1.6.1. Bilan de matière

Le débit de production du clinker est calculé à partir du rapport F/C. La méthode de pesée a donné le résultat suivant:

$$\frac{F}{C} = 1.65$$

Matières	Débit (t/h)	Débit rapportée à la masse de clinker produite (t/kg de clinker)
La farine	136.9	1.65
Le clinker	83.03	1

**Tableau III.1: Bilan de matière solide**

On sait que:

$$Q_{e.clk} = Q_{s.clk} + Q_{pertes}$$

Les fuites de matières dans le refroidisseur sont négligeables du fait que durant le dernier entretien ce problème a été résolu.

Et donc on pourra dire que:

$$Q_{e.clk} = Q_{s.clk}$$

La différence entre la quantité d'entrée et de sortie de la matière solide est due à la décarbonation et à la déshydratation de la farine au niveau de la tour (préchauffeur + four).

- **Déshydratation de la farine**

Durant le bilan l'humidité moyenne de la farine égalisait **0,2%**.

$$M_{H_2O} = 0.002 * 136.9$$

$$M_{H_2O} = 0.273 \text{ t/h}$$

- **Décarbonation de la farine**

La quantité de **CO<sub>2</sub>** dégagée par la farine lors de la cuisson est calculée en effectuant l'analyse de perte au feu au niveau du laboratoire ce qui donne le pourcentage massique de **CO<sub>2</sub>** dans la farine qui va être dégagé par décarbonation de la celle-ci selon la réaction:



D'après les données au laboratoire, on a:

Les pertes feu au niveau de la farine sont de 35%.

On a donc, la quantité de **CO<sub>2</sub>** dégagée par la farine exprimé comme suit:

$$M_{CO_2} = 0.35 * 136.9$$

$$M_{CO_2} = 47.915 \text{ t/h}$$

### 1.6.2. Bilan aéraulique

Durée du bilan	24 h
Début	13/05/15 8h40
fin	14/05/15 8h40
Débit farine à l'entrée de la tour	137 t/h

Sur terrain, toutes les mesures des débits sont effectuées par le tube de Pitot qui détermine la vitesse à travers une différence de pression (statique et totale) cela permet au remonté au débit connaissant la surface.

Théoriquement, le seul débit dont on a besoin pour satisfaire notre bilan est le débit d'air secondaire, puisqu'il apparaît impossible d'introduire le tube de PITOT dans un four à 1450 °C (matériel irrésistible).

Ainsi pour les autres matériaux de mesure (autre que PITOT), on ne pourra pas savoir si les résultats finaux sont vraiment justes (puisque'ils seront influencés par la flamme au niveau du brûleur qui prend place à la sortie du four), et donc on aura recours à calculer le débit de l'air secondaire en utilisant l'équation (1):

Avec :

$$Q_P = 5149 \text{ Nm}^3 / \text{h.}$$

$Q_{p,f}$ : débit de CO<sub>2</sub> dégagé lors de la décarbonatation de la farine chaude dans le four.

Etant donné:  $Q_{pf} = 6690.6 \text{ Nm}^3/\text{h}$  et  $Q_f = 134000 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Donc:

(%O <sub>2</sub> ) s.f	t (heure)	Q <sub>PF</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	P <sub>cal</sub> (kcal/ kg)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	Q coke (t/h)	C <sub>pair</sub> (J/kg. °C)	Masse Volumique du coke (kg/Nm <sup>3</sup> )	Q <sub>F</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
4%	0.5	6691	800	1300	800	6.7	905	0.39	134000

D'après la relation (1):  $Q_{a,sec} = 58958.674 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

$$Q_{a,sec} = 0.7103 \text{ Nm}^3 / \text{kg clk}$$

On a alors:

Débit total d'air à l'entrée du refroidisseur (Nm <sup>3</sup> /kg clk)	Débit total d'air à la sortie du refroidisseur (Nm <sup>3</sup> /kg clk)
139250/ (83.03*10 <sup>3</sup> ) = 1.677	168728.26/ (83.03*10 <sup>3</sup> )=2.032

Les résultats des débits sont:

	Débit (Nm <sup>3</sup> /h)
Air tertiaire	21259.466
Air secondaire	58958.674
Air exhaure	88510.126

**Tableau III.2: Les résultats des débits**

- **Interprétations**

Les calculs ont montré que le débit d'air à la cheminée est très important, égale à 134000/ (83.03\*10<sup>3</sup>) = 1.614 Nm<sup>3</sup> /kg du clk. Ceci est principalement dû à l'infiltration de l'air ambiant.

Appelé air faux, dans:

- Les portes visites du refroidisseur et les gaines de transport des poussières sous les grilles.
- Les conduites d'air du refroidisseur vers cheminée.
- Le filtrage.

Cet air égal:

$$Q_{\text{air faux}} = 0.42 \text{Nm}^3 / \text{kg du clk}$$

### 1.6.3. Bilan thermique

Ces calculs ont été faits avec température entrée égale à 20 °C.

On va commencer par calculer la chaleur du clinker à la sortie du four:

On sait que la température à la sortie du four atteint **1370 °C**.

Appliquons la relation suivante:

$$H_{e.\text{clk}} = Q_{\text{clk}} * C_p * (T_{e.\text{clk}} - T_e)$$

**A.N :**  $H_{e.\text{clk}} = (1 * 0.23 * (1370 - 20))$   
 $= 310.1 \text{ kcal/kg.clk}$

On poursuit le même calcul pour tous les entrées et sorties du refroidisseur en calculons à chaque fois le débit massique vu qu'on a que seulement le débit volumique:

	Température sortie (°C)	Capacité calorifique (kcal/kg. °C)	Débit massique (kg/h)	Débit volumique (Nm3/h)	Chaleur sensible (kcal/kg Clk)
<b>Clinker entrée</b>	1370	0.23	83.03 * 10 <sup>3</sup>	-	310.5
<b>Air de refroidissement</b>	60	0.216	119755	139250	12.46
<b>Clinker sortie</b>	170	0.23	83.03 * 10 <sup>3</sup>	-	34.5
<b>Air secondaire</b>	1250	0.216	54154.07	62969.86	164.07
<b>Air tertiaire</b>	880	0.216	18283.08	21259.4	39.95
<b>Air exhaure</b>	378	0.216	76118.70	88510.126	69.24

**Tableau III.3: les résultats de mesure des chaleurs**

La formule de  $C_{p,air}$  a été calculée (en dépendant de la température) comme suit:

$$C_{p,air} = -(4.489 \cdot 10^{-1} \cdot T) + (1.0575 \cdot 10^3)$$

On a trouvé :

$$C_{p,air} = 904,4 \text{ J/k. Kg}$$

$$C_{p,air} = 0.216 \text{ kcal/kg. °C}$$

**N.B :** autres termes s'ajoute à la relation n'ont pas étaient pris en compte et considérés négligeables.

Pour le clinker on a la relation suivante de  $C_p$ , change également en fonction de la température:

$$C_{p,clk} = 0.175278 + (0.141066 \cdot 10^{-3} \cdot T) - (0.13514 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) + (0.055796 \cdot 10^{-9} \cdot T^3)$$

$$C_{p,clk} = 0.23 \text{ kcal/kg. °C}$$

**N.B :** Pour ces deux  $C_p$  j'ai pris une valeur moyenne, pour effectuer les calculs.

Pour la Masse volumique moyenne de l'air étant donnée:  $\rho = 0.86 \text{ kg/Nm}^3$ .

$T_e$ : Température à l'entrée du refroidisseur égale 20 °C.

## 1.7. Calcul du rendement et de l'efficacité

L'évaluation de rendement et des performances du refroidisseur est le but principal de l'établissement du bilan thermique. En calculant le taux de récupération de la chaleur ou le rendement de récupération, on a pu détecter les principaux paramètres causant l'augmentation de la température de l'air exhaure et déterminer les actions à mener pour diminuer cette dernière.



C'est pour cette raison Je vais déterminer ce rendement et proposer les solutions les plus convenables pour arriver à résoudre le problème de l'augmentation de la température de l'exhaure tout en veillant à ne pas perturber la marche du four.

- **Efficacité de refroidissement**

Le calcul de l'efficacité de refroidissement a donné le résultat suivant on appliquant la relation (2):

$$\theta = 86 \%$$

Cette efficacité est relativement faible, car la valeur désirée se situe entre **97%** et **100%**.

- **Taux de récupération de la chaleur ou le rendement**

La récupération de la chaleur par l'air secondaire et l'air tertiaire joue un rôle primordial dans la réduction de la température en sortie de l'excédentaire, car plus on récupère de la chaleur, plus on diminue les degrés de la température exhaure avant son arrivée à l'échangeur. Le calcul de ce rendement, en appliquant la formule (3) citée au début de ce chapitre, a donné le résultat suivant:

Taux de récupération de la chaleur:  $\eta = 0.64$

- **Coefficient de récupération de la chaleur**

Appliquant la relation (4)

Avec:  $(Q_{tet} + Q_{sec}) = 0.9 \text{ Nm}^3/\text{h}$

$$k=1.13 \quad (\text{récupération moyenne})$$

- **Interprétations**

Le rendement et l'efficacité du refroidisseur sont considérés moyens. C'est peut-être dû au:

- Débit d'air de refroidissement du clinker.
- Mauvaise répartition de l'air de refroidissement.
- Ouverture des registres existant à l'amont des échangeurs de refroidissement de l'air d'exhaure. Ces registres ont pour rôle la protection des filtres de dépoussiérage contre la chaleur.
- Mauvaise granulométrie du clinker.
- Valeurs thermodynamique moyennes.

## 1.8. Conclusion et recommandation

Le calcul du bilan a montré qu'il y a une récupération moyenne de la chaleur au niveau du refroidisseur. Ceci montre que soit:

- La pression de la couche est faible, dans ce cas il faut l'augmenter. Ceci va encore influencer la température allant vers l'excédentaire
- La densité de soufflage au niveau du refroidisseur à couloir est faible, il faut donc l'augmenter dans ce cas.

## III.2. Les essais de performance

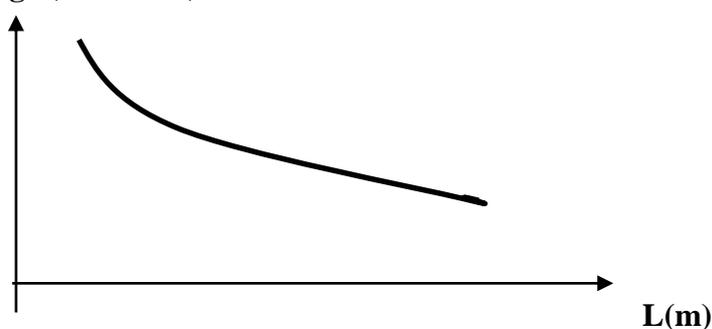
### 2.1. Influence de la densité de soufflage

C'est la quantité d'air soufflé par les neufs ventilateurs installés sous les chambres de refroidisseur ramené à la surface de ces derniers exprimée en ( $\text{Nm}^3/\text{m}^2.\text{s}$ ).

#### 2.1.1. Profil idéal de soufflage le long du refroidisseur

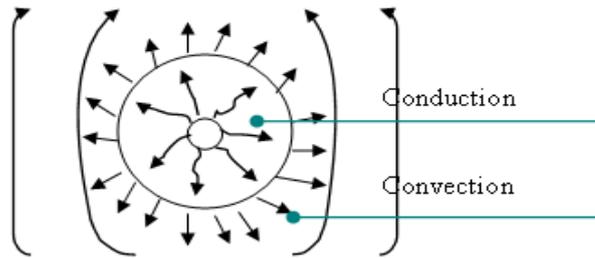
Des expériences au sein des cimenteries ont montré que le meilleur soufflage du refroidisseur est celui dont le profil est décroissant de l'amont vers l'aval comme la montre la figure ci-après:

Densité de soufflage ( $\text{Nm}^3/\text{m}^2.\text{s}$ )



**Figure III.1: Profil de la densité de soufflage le long du refroidisseur**

Pour justifier le recours à cette courbe, on considère un granule de clinker chaud admis dans un courant d'air froid:



**Figure III.2: Différents phénomènes de transfert de la chaleur**

L'échange de chaleur entre le granule de clinker et l'air s'effectue à la surface du grain. Ce dernier va céder des calories à l'air, qui sera transférées par convection. Sa surface va être refroidie jusqu'à l'équilibre avec l'air ambiant. Par la suite le cœur du granule étant plus chaud que la surface, la chaleur du centre doit migrer vers la surface et la vitesse de cette migration est régie par les lois de la conduction:

$$\phi = h. S. \Delta T$$

Avec:

$\Delta T$ : la différence de température entre le centre du granule et la surface.

- A l'amont du refroidisseur, la différence de température entre le cœur chaud d'un granule et sa surface déjà refroidie est grande et le transfert par conduction s'effectue rapidement ; il suffit de souffler fort pour extraire la chaleur.

- A l'aval, le transfert par conduction s'affaiblit et il devient inutile de souffler fort car c'est la vitesse de la conduction qui limite l'échange. C'est pourquoi du point de vue thermique, on a intérêt à souffler fort à l'amont et plus faiblement à l'aval du refroidisseur.

### 2.1.2. L'essai effectué

Au fur et à mesure de l'avancement, du refroidissement du clinker, les besoins en air soufflé évoluent en volume et en pression. Pour permettre cette évolution de manière aussi continue que possible, on a un compartimentage sous couloirs à l'aide de cloisons transversales pour exercer une pression suffisante afin que l'air puisse traverser le lit du clinker. Chaque compartiment est alimenté en air par un ventilateur qui est caractérisé par son débit déterminée selon le choix de la surface du compartiment, de la densité de soufflage et la hauteur de couche.

Pour que la répartition de l'air sous le refroidisseur soit adéquate, il faut empêcher le passage de l'air d'un compartiment à un autre en évitant des ouvertures trop importantes dans les cloisons.

Les surfaces des chambres sont données par le tableau suivant:

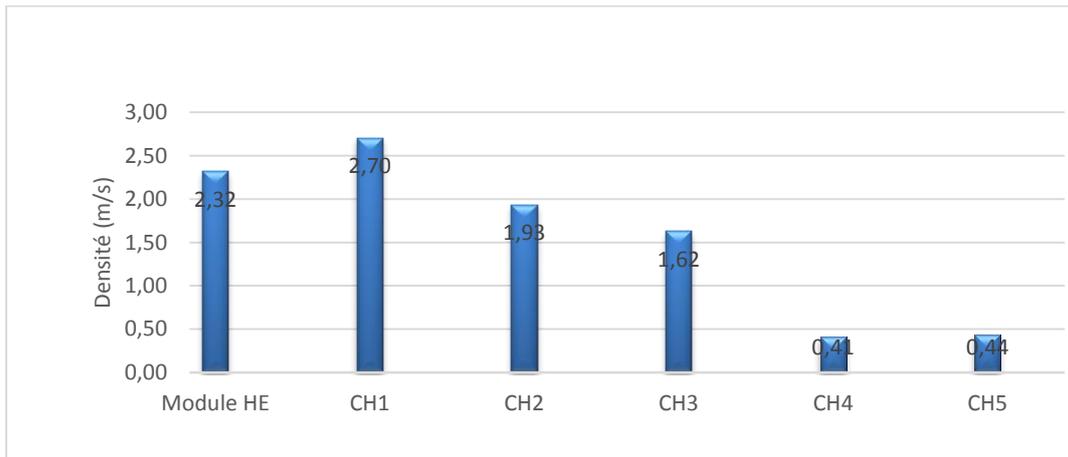
	Module HE	Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Chambre 4	Chambre 5
S (m <sup>2</sup> )	4.8	6.258	6.836	6.386	10.01	13.75

Pour approcher la distribution de soufflage des neufs ventilateurs, j'ai commencé par tracer la courbe de fonctionnement de l'état actuel.

<b>ESSAI</b>					
Compartiments	ventilateurs	Ouverture des registres (%)	Débit de soufflage (Nm <sup>3</sup> /h)	Densités de soufflage à respecter (Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s)	Débit nominal (Nm <sup>3</sup> /Kg Clk)
Module HE	V1	100%	8781	2.32	0.29
	V2	100%	11229		
	V3	5%	530		
Chambre1	V3	95%	10062	2.7	0.26
	V8	88%	5076		
	V9	50%	3431		
Chambre2	V4	100%	9745	1.93	0.23
	V8	100%	2901		
	V9	50%	3431		
Chambre3	V5	100%	9487	1.62	0.20
	V8	25%	1450		
	V9	50%	3431		
Chambre4	V6	100%	15011	0.41	0.21

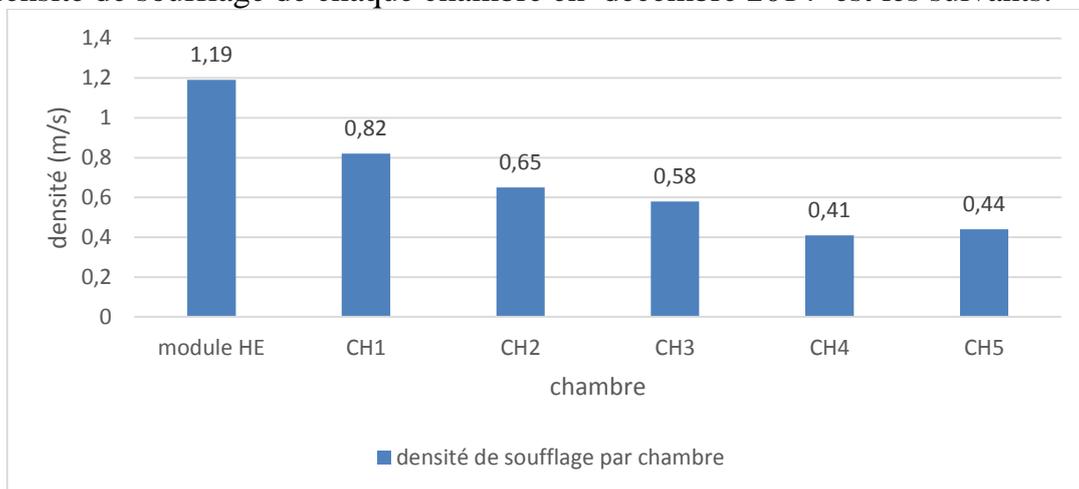
<b>Chambre5</b>	<b>V7</b>	<b>100%</b>	<b>21806</b>	<b>0.44</b>	<b>0.31</b>
<b>total</b>			<b>106370</b>	<b>9.43</b>	<b>1.49</b>

**Tableau III.4: Les résultats de mesure des débits**



**Figure III.3: Densité de soufflage par chambre en avril 2015**

La densité de soufflage de chaque chambre en décembre 2014 est les suivants:



**Figure III.4: la densité de soufflage en décembre 2014**

- **Interprétations**

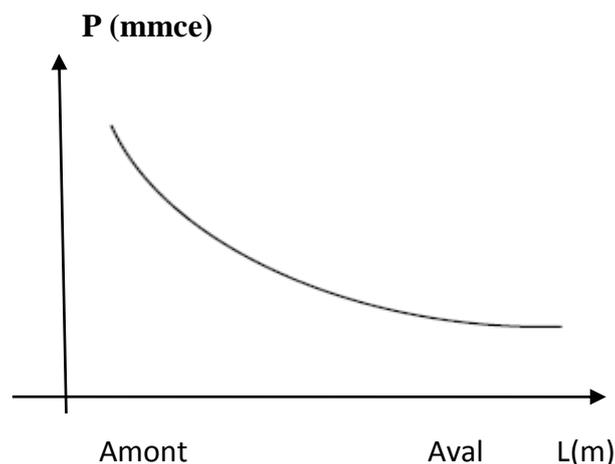
La comparaison des deux courbes conduit à dire qu'on a augmenté le soufflage dans le module HE ainsi que dans les 3 premières chambres du refroidisseur qui représentent la partie de récupération.

La densité de soufflage dans le module HE a augmenté de  $1.19 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{s}$  à  $2.32 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ . Ce qui représente une augmentation relative de soufflage de 9% qui n'était pas suffisante, De même cette densité à augmenter dans les autres chambres, ceci a pour effet diminuer la température du Clinker et de d'augmenter la récupération de chaleur pour l'air secondaire et tertiaire. Mais cet effet n'est pas assez grand pour avoir une bonne récupération.

## 2.2. Influence de la hauteur de la couche du clinker dans le refroidisseur

La vitesse de déplacement des couloirs et des grilles intervient directement dans le réglage de la hauteur de la couche (la pression référentielle nous donne l'image de la couche) et c'est l'une des commandes essentielles pour conduire le refroidisseur.

Quand la couche est épaisse, le rendement de récupération est automatiquement favorisé ce qui dit (air secondaire et air tertiaire très chauds), finalement, la hauteur de la couche est contrôlée par sa pression. Ces pressions sont réparties de telle sorte que cette hauteur soit décroissante de l'amont vers l'aval du refroidisseur, comme le montre la figure ci-après:

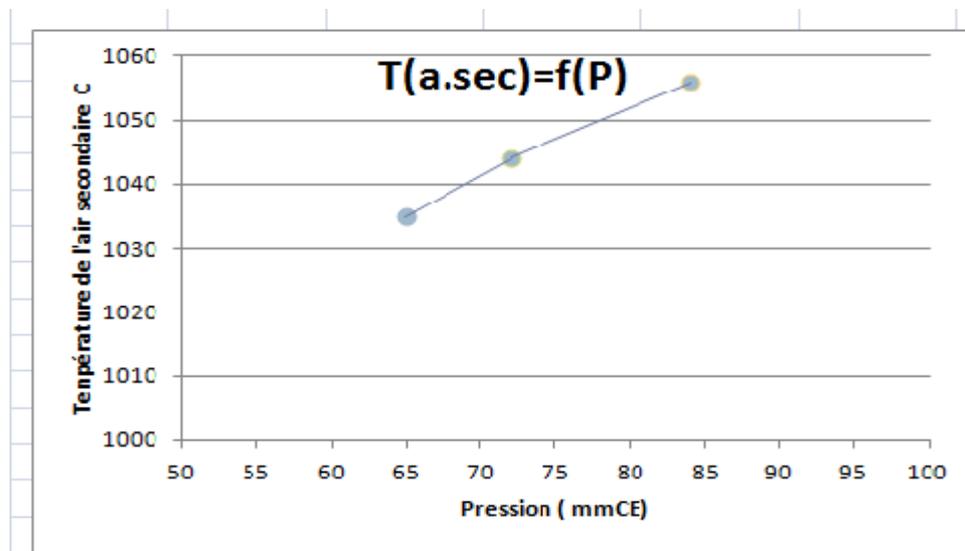


**Figure III.5: Présentation de pression de la couche dans les chambres**

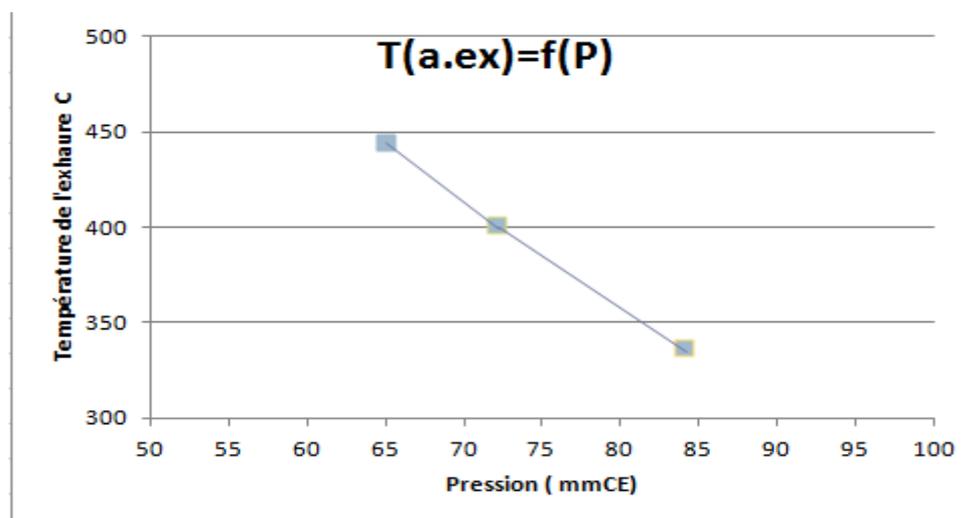
Les mesures des pressions effectuées, vont nous permettre de tracer la pression référentielle (image de la couche du clinker), en fonction de la température de l'air secondaire, et finalement en déduire la fluctuation de la température de l'air exhaure.

Températures mesurées (°C)	P (mmCE) ε [60, 70]		P (mmCE) ε [70, 80]		P (mmCE) ε [80, 90]	
	Air Sec	Air exhaure	Air Sec	Air exhaure	Air Sec	Air exhaure
Moyenne du jour	1035.97	445.81	1044.93	401.01	1056.99	388.65

**Tableau III.5: les résultats de mesure de la pression en fonction de température**



**Figure III.6: température de l'air secondaire en fonction de la pression de référence**



**Figure III.7: température de l'air exhaure en fonction de la pression de référence**

- **Interprétations**

Ces deux courbes montrent que la température de l'air secondaire augmente si on commence à augmenter la hauteur de la couche ([70, 80 mm CE])... En effet, la diminution de l'épaisseur de la couche du clinker au-dessus des couloirs et des grilles entraîne automatiquement l'augmentation de la vitesse des couloirs provoquant ainsi l'évacuation rapide du clinker. D'autre part l'augmentation de la hauteur de la couche permet une bonne récupération. (Température de l'air secondaire augmente), et donc température de l'exhaure diminue.

### **III.3. Solution proposée**

#### **3.1. Introduction**

Selon ce qui précède, j'ai pu déduire que la vitesse de refroidissement a une certaine influence sur la qualité du clinker vu qu'elle agit sur la structure des différents constituants. Un refroidissement lent entraîne une cristallisation des constituants du clinker par contre un refroidissement brusque « trempe » laisse les silicates à l'état cristallin mais solidifie les autres constituants; ce qui facilite l'opération du broyage du clinker.

Le calcul du bilan thermique a montré qu'il n'y a pas une récupération moyenne de l'énergie.

Les essais de performance ont prouvé, que malgré l'optimisation des paramètres influençant le refroidissement, la température de l'air exhaure à la sortie du refroidisseur est très élevée par rapport à la valeur optimale (**250 °C**).

A cet effet, j'ai proposé d'installer un nouveau ventilateur de soufflage au niveau de la grille statique du module HE à l'amont du refroidisseur. Dans ce cas il y aura une bonne récupération, un meilleur refroidissement.

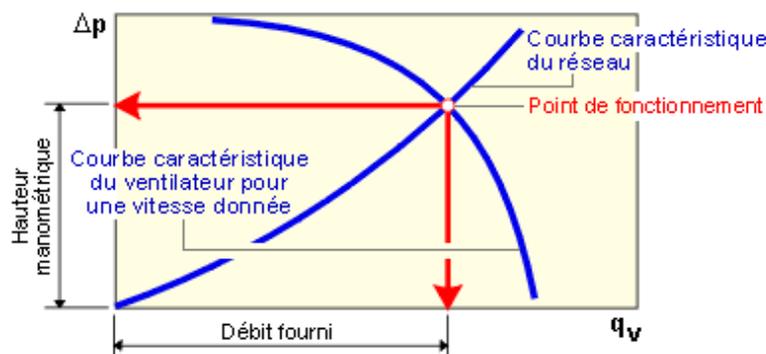
Le but de cette partie est de dimensionner et d'évaluer économiquement le ventilateur de soufflage à installer.

#### **3.2. Ventilateur: Définition**

On appelle ventilateurs des appareils destinés, à créer un vent artificiel, un courant d'air. et il permet de fournir à l'air l'énergie nécessaire pour le déplacer d'un point à un autre en lui imprimant une certaine vitesse.

- Point de fonctionnement d'un ventilateur

Si l'on branche un ventilateur, il stabilisera son débit à une valeur pour laquelle la pression qu'il fournit équivaut à la résistance du circuit, qui présente celle-ci le frottement de l'air dans les conduits. Ce point est le seul point de fonctionnement possible. Alors Sans pertes de charge, la caractéristique du réseau serait une droite. En réalité, la courbe est incurvée comme une parabole car la pression évolue en fonction du carré de la vitesse et donc du débit. La caractéristique du ventilateur est une courbe qui s'incurve vers le bas. Le point d'intersection des 2 courbes, réseau aéraulique et ventilateur est le point de fonctionnement de l'installation.



**Figure III.8 : courbe caractéristique de ventilateur**

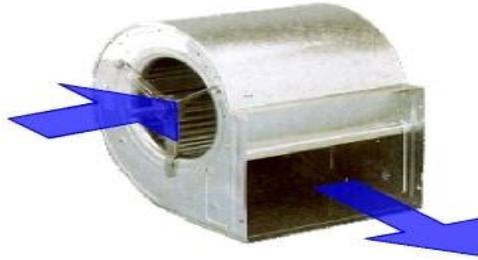
### 3.3. Choix du type de ventilateur à installer:

Le choix d'un groupe de ventilation, C'est en fonction des courbes débit-pression que l'on choisira en veillant à ce que son point de fonctionnement, soit aussi proche que possible d'un rendement maximum.

Il existe deux grandes types de ventilateurs peuvent être utilisés pour tous les fluides:

- ventilateur centrifuge

Ce type de ventilateur est le plus utilisé par Lafarge MEKNES, tel que l'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation et propulsé par force centrifuge perpendiculairement au même axe. Il donne de fortes variations de pression avec de faibles variations de débits. Il fournit un rendement compris entre (50% et 70%).



**Figure III.9: ventilateur centrifuge**

- ventilateur axial ou hélicoïde

Il permet d'avoir un débit important dont l'air est aspiré et propulsé parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur, par suite il ne peut en général assurer une grande différence de pression, et il peut avoir un rendement élevés (jusqu'à 89 %). donc il est plus économique d'avoir recours aux ventilateurs axiaux.



**Figure III.10: ventilateur axial**

### 3.4. Calcul du débit du ventilateur à installer

Pour garder le four en marche il faut que le débit du ventilateur à installer égale la quantité d'air nécessaire pour une combustion complète au niveau du four et du Préalcalinateur.

Les ventilateurs existant et qui soufflent dans la grille statique du module HE sont V1 et V2 vu que le débit de V3 est maintenue à partir du 1<sup>er</sup> chambre et il est négligeable par rapport au V1 et V2:

Ventilateurs	Ouverture des registres (%)	Débit de soufflage (Nm <sup>3</sup> /h)	Débit de soufflage nominal (Nm <sup>3</sup> /h)
V1	100%	8781	12100
V2	100%	11229	13100

D'après le tableau, on voit que les débits mesurés n'atteignent pas les débits nominaux désirés. J'ai pensé à remplacer le ventilateur **V1** par un ventilateur axial, vu que ce dernier a un écart de **3319 Nm<sup>3</sup>/h** par rapport à la valeur optimale. Afin d'augmenter sa densité de soufflage.

- **Calcul de la quantité d'air nécessaire pour une combustion complète:**

Sachant que le débit nécessaire pour une combustion complète est:

$$Q_{a,c} = 86413.2 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Et on a selon les données, la quantité du combustible est: **6.73t/h**

$$V_a = \frac{86413.2}{6.73 \cdot 10^3} = 12.84 \text{ Nm}^3/\text{kg coke. (Pouvoir comburivore)}$$

Donc pour avoir une combustion complète du coke dans four il faut:

$$V_a \cdot M_{comb} = Q_{sec} + Q_p$$

Alors:

$$Q_{sec} = V_a \cdot M_{comb} - Q_p$$

Avec :

**Q<sub>sec</sub>**: débit de l'air secondaire (**Nm<sup>3</sup>/kg clk**).

**V<sub>a</sub>**: pouvoir comburivore (**Nm<sup>3</sup>/kg coke**).

**M<sub>comb</sub>**: masse du combustible consommé pour produire 1 kg clk (**kg coke/kg clk**).

**Q<sub>p</sub>**: Débit de l'air primaire à l'entrée du four (**Nm<sup>3</sup>/kg clk**).

Le tableau suivant regroupe les valeurs utilisées:

<b>V<sub>a</sub></b> (Nm <sup>3</sup> /kg coke)	<b>M<sub>comb</sub></b> (kg coke/kg clk)	<b>Q<sub>p</sub></b> (Nm <sup>3</sup> /kg clk)
12.84	0.081	0.07

Après calcul, on obtient un débit d'air secondaire:

$$Q_{sec} = 75367.32 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$Q_{sec} = 0.907 \text{ Nm}^3/\text{kg clk}$$

Pour avoir une combustion complète, on marche avec un excès d'air de 4% à 20%. Ceci est nécessaire car, sans excès d'air, il y a manque d'oxygène pour la combustion parce que le brassage des gaz n'est pas parfait.

Pour **LAFARGE** le pourcentage d'excès d'air est: **4%**



Donc:

$$Q_{excés} = \% O_{2.excés} * V_a * M_{comb}$$

Finalement,

$$Q_{excés} = 0.04160 \text{ Nm}^3/\text{kg clk}$$

Pour l'air tertiaire (Précalcinateur), la quantité d'air nécessaire pour la combustion complète est donnée par:

$$V_a * M_{comb} + Q_{excés} = Q_{tert} + Q_p$$

Donc le débit de l'air tertiaire avec un excès d'air de 5% est:

$$Q_{tert} = (1 + \% O_2 \text{ excés}) * V_a * M_{comb} - Q_p$$

Avec :

$Q_{tert}$ : débit de l'air tertiaire ( $\text{Nm}^3/\text{kg clk}$ ).

$V_a$ : pouvoir comburivore ( $\text{Nm}^3/\text{kg coke}$ ).

$M_{comb}$ : masse du combustible consommé au niveau du précalcinateur ( $\text{kg coke/kg clk}$ ).

$Q_p$ : Débit de l'air primaire à l'entrée du four ( $\text{Nm}^3/\text{kg clk}$ ).

Excès d'air dans le Précalcinateur égale ( $5\% * \text{excès } O_2 \%$ )

$$Q_{tert} = 0.947 \text{ Nm}^3/\text{kg clk}$$

$$Q_{tert} = 78601 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

L'air envoyé vers l'exhaure, est mesuré par le tube de Pitot pour une température  $253^\circ\text{C}$ .

$$Q_{a.ex} = 69247.02 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$Q_{a.ex} = 0.8343 \text{ Nm}^3/\text{kg clk}$$

On sait que Le débit total est (d'après les mesures):

$$Q_{total} (\text{ancien}) = 168728.26 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$Q_{total} (\text{ancien})$ : Débit d'air total de soufflage dans le module HE à l'état actuel.

$$Q_{total} (\text{nouveau}) = Q_{tert} + Q_{sec} + Q_{a.ex}$$

$$Q_{total} = 223215.02 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$Q_{total} (\text{nouveau})$ : Débit d'air nécessaire dans le module HE.

Donc il faut augmenter le soufflage sous les couloirs de la quantité suivante:

$$Q_{nouveau} - Q_{ancien} = 54486.76 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Donc le débit du ventilateur à installer est:

$$Q_{\text{nouveau}} = Q(V_2) + Q(V_3) + Q_{\text{total}}(\text{nouveau}) - Q_{\text{total}}(\text{ancien})$$

A.N:  $Q_{\text{nouveau}} = 66245.76 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Alors pour savoir combien de gain rapporté à l'entreprise avec ce nouveau ventilateur. On doit comparer le rendement et le coefficient de récupération (ancien/nouveau). par suite on doit calculer les nouvelles chaleurs.

	Température sortie (°C)	Capacité calorifique (kcal/kg. °C)	Débit massique (kg/h)	Débit volumique (Nm <sup>3</sup> /h)	Chaleur sensible (kcal/kg Clk)
<b>Clinker entrée</b>	1370	0.23	83.03 * 10 <sup>3</sup>	-	310.5
<b>Air de refroidissement</b>	60	0.216	162738.8	139250 + 54486.7	16.94
<b>Clinker sortie</b>	170	0.23	83.03 * 10 <sup>3</sup>	-	34.5
<b>Air secondaire</b>	900	0.216	63308.54	75367.32	144.98
<b>Air tertiaire</b>	880	0.216	66024.84	78601	147.76
<b>Air exhaure</b>	253	0.216	59552.43	69247.02	36.11

**Tableau III.6: Les calculs des chaleurs**

D'après les relations qu'on est utilisé au début de ce chapitre:

Le rendement égale  $\eta=90\%$   
 Et  $k=1.3$   
 Avec:  $Q_{\text{tet}} + Q_{\text{sec}} = (0.94+0.90) (\text{Nm}^3/\text{kg clk})$

Alors 26% de gain porté pour avoir un bon refroidissement et par suite une bonne récupération d'énergie.

### 3.5. Dimensionnement du ventilateur de soufflage

Le débit que doit fournir le ventilateur équivaut à:

$$Q_{\text{nécessaire}} = 18.401606 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

Alors:

D'après la loi des ventilateurs axiaux on a:

$$D = \frac{Q^{\frac{3}{4}} * \left(\frac{\rho}{g}\right)^{1/4}}{W^{1/4}}$$

$$N = \frac{W^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{5}{4}} * \left(\frac{\rho}{g}\right)^{3/4}}$$

$$P = \frac{W}{Q}$$

Avec:

**D:** Diamètre de la roue (**mm**).

**N:** Vitesse de rotation de la roue (**tr/min**).

**P:** Pression totale du ventilateur (**Pa**).

**ρ:** Masse volumique (**kg/m<sup>3</sup>**).

**g:** Accélération du pesanteur (**m/s<sup>2</sup>**).

**Q:** débit du ventilateur (**m<sup>3</sup>/s**)

On a:

<b>ρ</b> <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>g</b> <b>(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>W</b> <b>(watt)</b>	<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
1.1634	9.80	69041,26	7.66

Tous calculs faits on a trouvé que :

$$D = 1326 \text{ mm}$$

$$N = 1472,12 \text{ tr /min}$$

$$P = 9132,606 \text{ Pa}$$

### 3.6. Evaluation économique du ventilateur à installer

	Acier ordinaire	Alliage Ni	Fibre de glasse
Prix du ventilateur (\$)	17343	43359	86718

Etant donné que l'air n'est pas très corrosif, et que l'acier ordinaire est le moins cher on a choisi comme matériau, l'acier ordinaire.

$$\text{Prix du ventilateur} = 142952.44 \text{ DH}$$

# Conclusion

Le refroidisseur du clinker est un point clé de toute installation de cuisson par son impact sur la récupération thermique, sur la consommation énergétique, au niveau du broyeur à ciment, et sur la régularité du système.

L'optimisation de son réglage est une opération délicate. En effet le système de refroidissement se caractérise par plusieurs entrées et plusieurs sorties.

L'étude des bilans thermiques et matières réalisés sur le refroidisseur, ayant pour but la détermination des causes de l'augmentation de la température de l'air exhaure, nous a permis de dégager les résultats suivants:

- Le débit d'air à la cheminée est très important. Ceci est principalement dû à l'infiltration de l'air ambiant, appelé air faux .Ce débit d'air faux correspond à un pourcentage de 45% par rapport à l'air de refroidissement. Pour cela il faut veiller sur l'étanchéité du système surtout sur celle de l'air exhaure.
- L'efficacité de refroidissement vaut **86%**, valeur relativement moyenne car la valeur désirée se situe entre **97%** et **100%**.
- La récupération de la chaleur est moyenne avec un rendement valant 64%, éloignée du rendement visé par la société qui est de **72%**, ceci est dû à l'insuffisance de la densité de soufflage au niveau du refroidisseur.

Les essais de performances ont montré que:

- Tant que la pression optimale de la couche, pour lequel il y a une bonne récupération avec un refroidissement meilleur augmente, sûrement on aura une diminution constatée au niveau de l'exhaure.
- L'augmentation du soufflage au niveau des grilles n'a pas beaucoup influencé la diminution de la température exhaure.

L'optimisation des paramètres de marche du refroidisseur a permis de diminuer la température excédentaire d'environ **30 °C**. Cependant nous n'avons pas abouti à avoir une température inférieure à **250 °C**.

Il découle de ce qui précède que l'installation d'un nouveau ventilateur au niveau du module **HE** statique est nécessaire.

En effectuant des calculs technico-économiques sur le ventilateur à installer, j'ai choisi un ventilateur axial de puissance **70 kW**, le débit vaut à peu près **36096 m<sup>3</sup>/h**.

## Les perspectives

J'ai essayé de proposer évidemment des solutions pour la résolution de la problématique, néanmoins ces dernières n'étaient pas prises en compte vu plusieurs facteurs.

Ci-joint les solutions perspectives:

<b>Solutions perspectives</b>	<b>Explication de la solution</b>	<b>Raison de refus</b>
Tour de refroidissement	Une tour permettant le refroidissement des gaz en éjectant l'eau pulvérisé, le long de leurs trajets	Problème de colmatage au niveau des parois, et donc restriction du diamètre de passage
Tube refroidisseur	Un tube contenant un liquide situé le long du trajet de l'exhaure, permettant le refroidissement des gaz	Nécessité de l'installation d'une pompe : coût élevé pour un rendement moyen
Tuyau serpentin	Un tube placé en dessous des couloirs contenant un liquide aidant au refroidissement du clinker au niveau du module HE	Difficulté de trouver un liquide résistant à environ 1450 °C, sans changement de phase
Elargissement de la longueur l'échangeur	Tripler la longueur de l'échangeur, avant sa sortie	Notre problème, est surtout la diminution de la température excédentaire pour la récupération des calories au niveau des airs secondaire et tertiaire. Après échangeur la température même il est froidie ça se sera que des pertes.
Augmentation de la hauteur de lit du clinker	L'augmentation de la hauteur du lit du clinker permet l'augmentation de la température au secondaire, ce qui implique la diminution de cette dernière à l'exhaure	Il est déconseillé de dépasser 0.6 m (valeur optimale détectée) pour la hauteur du lit du clinker, pour éviter la surpression au niveau de la pression référentielle

## Webographie

### ➤ Lien internet

[www.abb.com](http://www.abb.com) / extrait de la revue .ABB.2/2007.

[www.claudiuspeters.com/760](http://www.claudiuspeters.com/760) ETA-COOLER.

[www.flsmith.com/controla](http://www.flsmith.com/controla) avancé du procédé pour l'industrie du ciment.

[www.centec-calcia.fr](http://www.centec-calcia.fr)

[www.ecom.fr](http://www.ecom.fr) : La combustion.

## Bibliographie

### ➤ Documentation de LAFARGE MEKNES

- Process book de refroidisseur.
- Refroidisseur ETA: description fonctionnels.
- Manuel opérateur MEKNES refroidisseur: « bilan thermique four 1 du 08/2008 ».
- Synthèse Bilan thermique F1 2010.
- BT four 1 juin 2002.
- Note BT four 1 juin 2006.

### ➤ Rapport, revue et articles

-Rapport PFE réalisé par une étudiante de l'école Mohammedia des ingénieurs sous thème l'amélioration des performances du refroidisseur En 2007.

-Rapport PFE: Département Génie industriel: l'efficacité du dépoussiérage

-Rapport du travail de fin d'études réalisé par JIHAD EL FARKANI sous thème : Détermination des causes de la rupture du tirant du broyeur cru En 2013.

-Rapport du travail de fin d'études sous thème Optimisation et régulation de la Température du gaz de cyclone C4 Action sur débit combustible Précalcinateur (coke) En 2011.

-Articles in 2011 by SCHEUCH GMBH-FRANZOSHCH.

-Industrie ciment Scheuch Technology for clean air.

-Directive pour essai de rendement par wilhelm ANSELM: ingénieur conseil.Hedelberg.