

Tableau 26 : Coût des pertes au niveau de la tour 48

Liste des Abréviations

CPJ : Ciment Portland avec ajout de constituants secondaires

C : CaO

A : Al_2O_3

F : Fe_2O_3

S : SiO_2

kk : Clinker

C2S : Silicate bicalcique ou Bélite, est un composant du clinker.

C3S : Silicate tricalcique ou Alite, est le constituant principale du clinker.

C4AF : Aluminoferrite tétracalcique ou Ferrite, composant principale du clinker qui a tendance à noircir le ciment.

CaCO₃ : Carbonate de calcium est le composant principal du calcaire.

CaO : Oxyde de Calcium CaO , largement connu par la chaux, est un composant majeur du Clinker.

MPa : Le méga pascal est une unité utilisée pour la mesure de haute pression.

Clinker : Est un constituant du Ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % des argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
Chapitre I : Présentation générale de l'entreprise	2
I. Présentation de Lafarge Meknès	3
1. Fiche Signalétique.....	3
2. Produits fabriqués	3
3. Organigramme de LAFARGE Meknès.....	4
II. Processus de fabrication du ciment	5
1. Composition chimique du ciment	5
2. Production du clinker	5
3. La ligne de cuisson.....	6
3.1 La tour de préchauffage où la tour à cyclone	7
a. Principe de fonctionnement du cyclone.....	7
3.2 Four rotatif.....	8
Chapitre II : Présentation du Problématique	12
I. Variation de la consommation d'énergie durant l'année 2014	13
II. Problématique	13
III. Les étapes du déroulement du projet	14
 Chapitre III : Étude de transferts thermiques et appareils de mesure	
I. Mode de transfert thermique	16
1. Transfert par conduction	16
1.1 Conduction d'une paroi cylindrique	16
2. Transfert par convection	17
2.1 Détermination du coefficient thermique de convection naturelle	17
2.2 Détermination du coefficient thermique de convection forcée	18
3. Transfert par rayonnement	19
II. Appareils de mesure	19
1. Pyromètre Infrarouge	19

2. Anémomètre.....	20
Chapitre IV : Calcul des pertes d'énergie Et étude des causes	22
I. Calcul des surfaces et mesures des températures et des.....	23
vitesse du vent des éléments de la ligne de cuisson	23
1. Calcul de la surface et mesure de la température et vitesse du vent de la Tour :.....	23
1.1 <i>Calcul de la surface des cyclones.....</i>	<i>23</i>
a. <i>Calcul de la surface de la gaine Gaz C2 et C3.....</i>	<i>24</i>
b. <i>Calcul de la surface Gaine Gaz C4</i>	<i>25</i>
c. <i>Boîte à fumer.....</i>	<i>27</i>
2. Calcul de la surface du four avec les différentes mesures.....	30
3. Calcul de la surface et mesure de la température et vitesse du vent du capot de chauffe :	32
4. Calcul de la surface et mesure de la température et la vitesse du vent du refroidisseur :	32
5. Calcul de la surface et mesure de la température de la gaine d'exhaure :.....	33
II. Calcul des pertes par parois	34
1. Les résultats	35
III. Analyse des causes	36
1. Recherche des causes probables des problèmes constatées	36
2. Vote Pondérée	37
3. Analyse Pareto	39
Chapitre IV : Proposition de solution	41
I. Le plan à suivre pour réduit les pertes.....	42
II. Historique du briquetage	42
1. Four	42
1.1 <i>Les caractéristiques des briques réfractaires.....</i>	<i>42</i>
<i>Les caractéristiques des briques réfractaires sont présentées sur le tableau 19 :</i>	<i>42</i>
1.2 <i>Calcul et comparaison des résistances thermiques</i>	<i>43</i>
2. La Tour de préchauffage	44
2.1 <i>Calcul et comparaison des résistances thermiques</i>	<i>44</i>

III. Évaluations économiques du projet.....	45
1. Solution et proposition	45
2. Étude économique pour le four	45
3. Étude économique pour la tour.....	47
<i>Conclusion</i>	49

Introduction générale

L'industrie cimentière s'est engagée au cours de ces dernières années dans un important investissement pour augmenter et diversifier la production afin de satisfaire la demande croissante du marché. Pour répondre à cette demande qui est en augmentation continue, il est indispensable de maîtriser le processus de fabrication du ciment. Le processus de fabrication du ciment est fortement consommateur en énergie calorifique et électrique. Dans ce sens et sous la supervision du service procédé au sein de l'usine de LAFARGE Meknès, on s'est penché sur l'optimisation des pertes thermiques par les parois de la ligne de cuisson du Four 2. Ce stage a pour but de déceler cette perte d'énergie thermique et de proposer des recommandations.

Actuellement le service procédé accorde une nette importance sur la minimisation des pertes d'énergie calorifiques par parois au niveau de la ligne de cuisson 2, en ce sens que nous avons eu la chance de travailler sur un tel sujet (Optimisation des pertes d'énergie par les parois au niveau de la ligne de cuisson 2).

Ce rapport a permis de mettre en évidence les causes principales de ces pertes et il comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on va présenter l'organisme d'accueil on commençant par la présentation générale de l'usine Lafarge de Meknès avec une description du procédé de fabrication de ciment, tandis que le deuxième chapitre traite les différents modes de transfert thermiques ainsi que les appareils utilisés pour calculer les pertes d'énergie de la ligne de cuisson 2.

Le troisième chapitre comporte une description générale du problème étudié ainsi que les étapes de déroulement du travail.

Le quatrième chapitre traite les différents calculs (surface de différentes parties de la ligne de cuisson, pertes d'énergie par parois) et l'analyse des résultats obtenus et enfin les causes qui amènent à ce problème.

Le cinquième chapitre comporte des solutions approchées pour minimiser les pertes thermiques par les parois au niveau de la ligne de cuisson du four 2.

Chapitre I :

Présentation générale de l'entreprise

I. Présentation de Lafarge Meknès

1. Fiche Signalétique

La figure 1 montre la fiche signalétique de Lafarge Meknès :

Raison Sociale: Usine Ciments de LAFARGE Meknès

Siège Social: Casablanca

Forme Juridique: Société anonyme

Date de création: Octobre 1953

Adresse : Km 8 Route de Fès, BP 33 Meknès

Téléphone : 035-52-26-44/45/46

CNSS: 1098343

N° Patente: 17045015

Effectif du personnel : 340

Directeur: Mr CHEWAR

Capital : 476 430 500 DH

Gamme de Produits :

- PJ45 en sac et en vrac.
- CPJ35 en sac.
- CPA 55 en sac

Figure 1: La fiche signalétique

2. Produits fabriqués

L'usine de Meknès est spécialisée dans la fabrication de trois types de ciment le CPJ45, CPJ35 et CPJ55. Le tableau 1 présente les trois types de ciment :

Tableau 1 : Différents types des ciments

<u>Produits</u>	<u>Description</u>
CPJ 35	Ciment Portland composé dont les principaux constituants sont le clinker 58% le calcaire 35,60%, il est utilisable dans le domaine routier pour la stabilisation des sols et des couches de chaussées.
CPJ 45	Ciment Portland composé dont les constituants principaux sont le clinker 66,34%, calcaire 24%, caractérisée par une résistance de 45MPa ce qui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités.
CPA 55	Ciment Portland artificiel composé de clinker 94,34% et de gypse 5,64%.La résistance élevée de CPA 55 confère l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités, les bétons précontraints et les bétons à haute performance.

3. Organigramme de LAFARGE Meknès

Lafarge Meknès se compose de plusieurs services comme le montre la figure 2 :

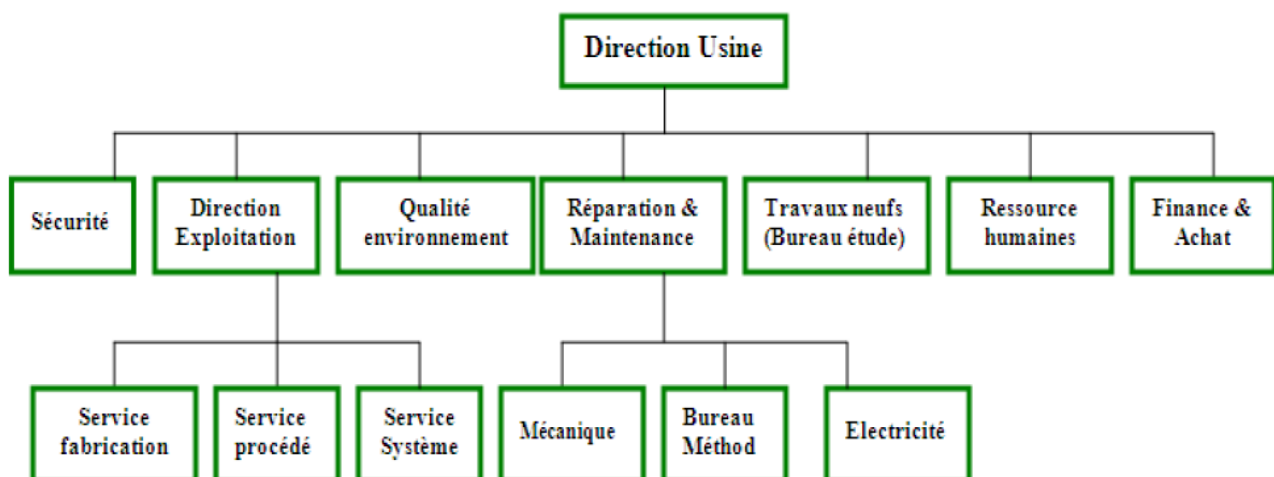


Figure 2 : Organigramme de Lafarge Meknès

II. Processus de fabrication du ciment

Le processus de fabrication du ciment comprend deux activités indépendantes mais complémentaires : L'extraction de la matière première (calcaires, argiles, matériaux de correction) et la transformation de la matière première (préparation, broyage, cuisson) qui exigent un savoir-faire et une maîtrise d'outils et des techniques de production et des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

1. Composition chimique du ciment

Le ciment résulte du broyage de clinker qui est une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde Ferrique, et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse et de produit d'addition en faible quantité (cendres volantes). La figure 3 montre les composants du ciment :



Figure 3: Les composants du ciment

2. Production du clinker

On peut distinguer Cinq étapes principales dans le processus de fabrication du ciment :

1. L'extraction de la matière dans la carrière et son homogénéisation
2. La préparation des matières premières afin de constituer le cru
3. La cuisson aboutissant à la création du clinker.
4. Le broyage du clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment.
5. Le stockage et l'expédition des ciments.



La matière première subit plusieurs étapes pour se transformer en ciment comme le montre la figure 4 :

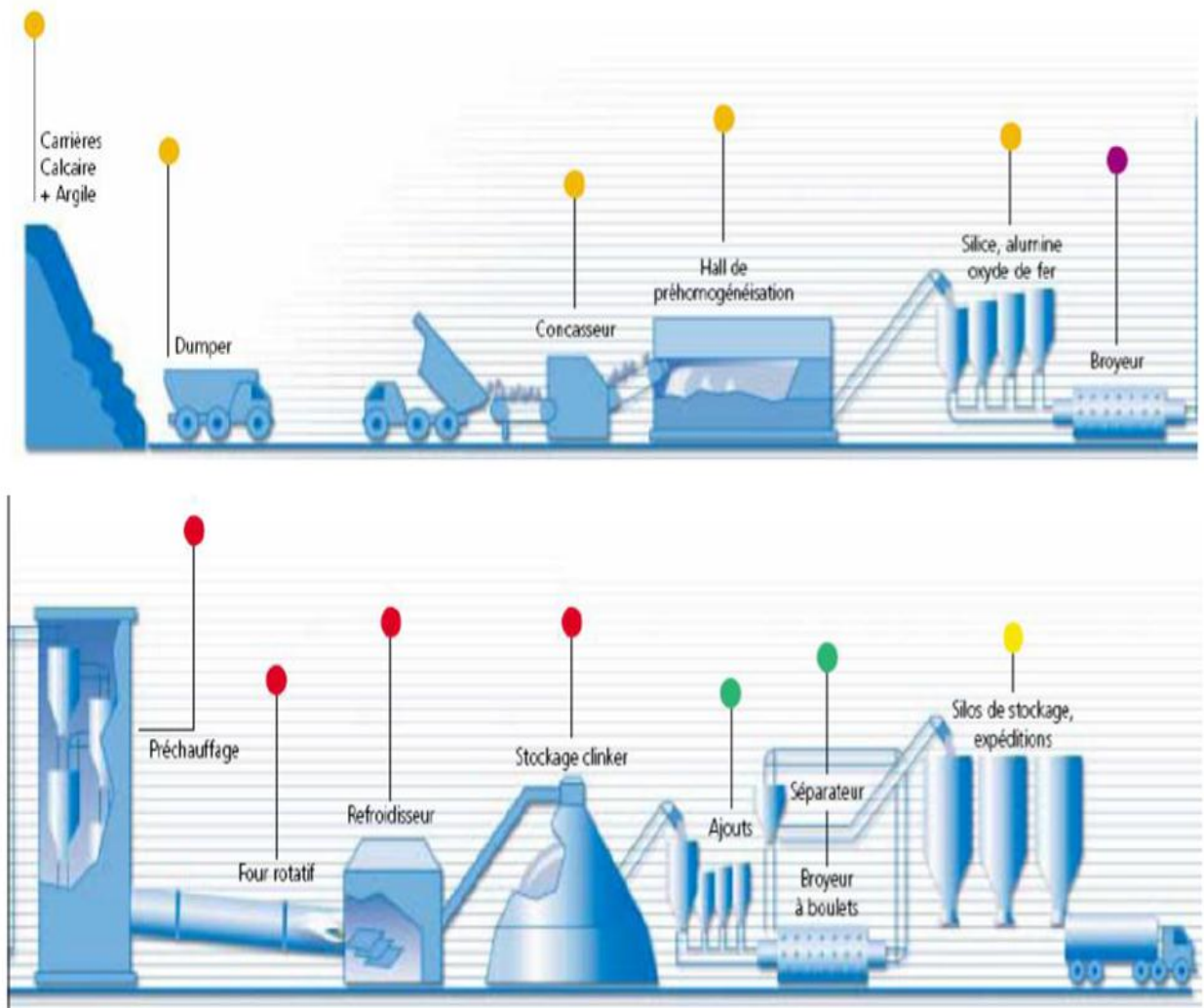


Figure 4: Procédé de fabrication

3. La ligne de cuisson

On entend par cuisson le processus de transformation de la matière crue en clinker par des réactions chimiques complètes conduisant à l'élimination presque totale de la chaux non combinée.

La figure 5 présente les différents éléments constituant de la ligne de cuisson :

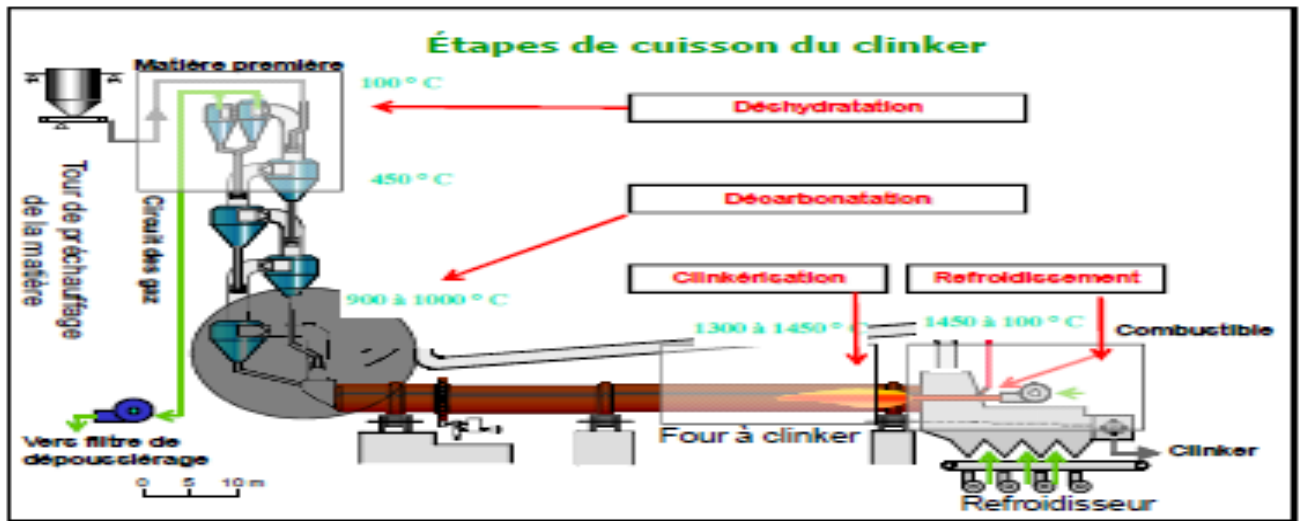


Figure 5 : La ligne de cuisson

La ligne de cuisson est constituée :

- Une tour à cyclones ou tour de préchauffage
- Un four rotatif
- Un refroidisseur

3.1 La tour de préchauffage où la tour à cyclone

a. Principe de fonctionnement du cyclone

La tour de la ligne de cuisson N°2 est constituée d'un ensemble de cyclones {C1, C1bis}, C2, C3, C4, où s'effectue la préparation de la matière avant son entrée dans le four. Chacun des cyclones est le siège d'un processus d'échange thermique entre matière (50 à 60°C) et gaz chauds (900°C) sortant du four dans le carneau d'entrée. Le passage dans chaque cyclone se fait en deux étapes distinctes :

- Première étape : échange thermique entre la farine et gaz à contre-courant qui se produit en grande partie dans les gaines de liaison entre cyclones lors du transport.
- Deuxième étape : séparation entre la farine et les gaz après l'échange thermique, le mélange farine et gaz pénétrant au cyclone tangentiellement en un mouvement Tourbillonnaire qui assure une perte d'énergie cinétique par frottement contre les parois d'où la chute par gravité pour rejoindre l'étage d'en bas alors que les gaz avec les fines remontent sous l'effet du tirage à l'étage supérieur.

La figure 6 présente le mouvement de la matière à l'intérieur du cyclone :

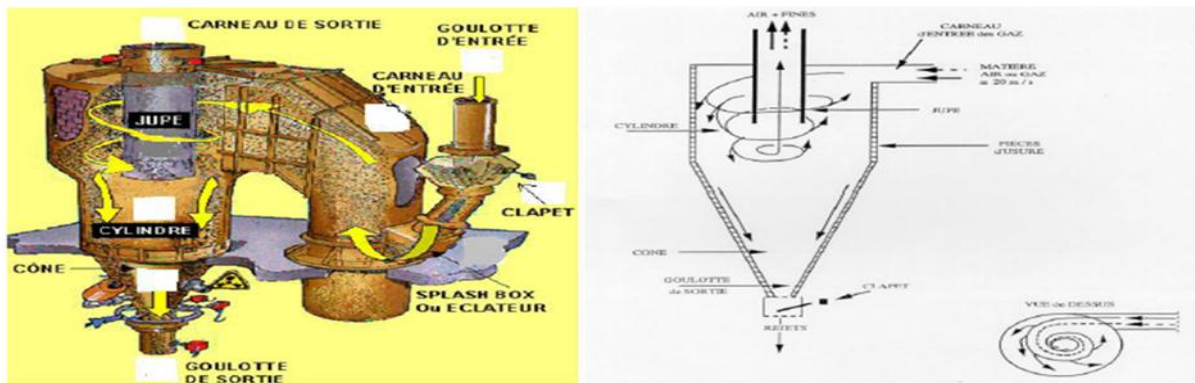


Figure 6 : Mouvement de la matière à l'intérieur du cyclone

Lors de cet échange thermique des réactions physico-chimiques se produisent au fur et à mesure que la température de la farine augmente.

A 100°C: Évaporation de l'eau à l'état libre (humidité)

Entre 250 °C et 450 °C: Déshydratation de l'eau de liaison

Entre 450 °C et 620 °C: Décarbonatation des carbonates de magnésium



Entre 820 °C et 900 °C: Décarbonatation des carbonates de calcium



3.2 Four rotatif

Le four est constitué par une virole en acier animé d'une vitesse de rotation variable pouvant atteindre 3 tr/mn. Il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires et présente une inclinaison de 3% dans le sens de l'écoulement de la matière, cette inclinaison combinée avec la rotation font que la matière puisse progresser, par gravité, vers le brûleur, ce brûleur dégage une flamme qui s'établit à la sortie de la tuyère lieu où les combustibles (Fuel, coke de charbon) et le comburant (O₂ de l'air) et qui peuvent atteindre 2000° C. La matière sortant du four est le clinker, la longueur du four atteint 64 mètres, son diamètre est de 4 mètres

Le four est le siège d'un équilibre entre deux flux :

- Un flux calorifique des fumées de combustion d'aval en amont fourni par la combustion des gaz et le débit d'air secondaire, arrivant du refroidisseur déjà chaud.
- Un flux de matière granulaire, d'amont en aval qui forme dans le four un lit de matière arrivant du préchauffeur partiellement décarbonatée, avec une température de l'ordre de 800 °C à 900 °C et devant atteindre la clinkerisation à une température de 1200°C à 1450°C.

a. Différentes zones du four

Le four rotatif est constitué par différentes zones comme le montre la figure 7 :

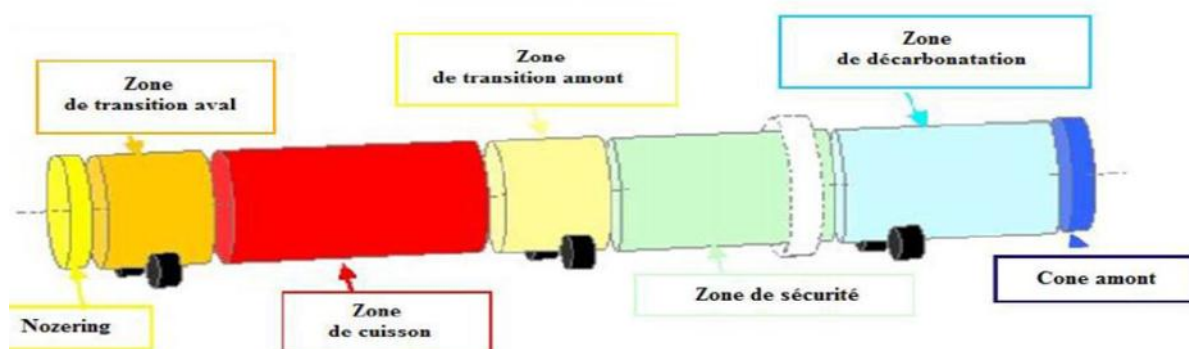


Figure 7: Différentes zones du Four

Zone de décarbonatation et zone de sécurité

Ces zones se caractérisent par :

- L'absence de croûtage
- Une abrasion mécanique du briquetage due au glissement de la matière à l'entrée du four.
- La fin de la réaction de décarbonatation à une température entre 820 et 900 °C qui donne la libération de la chaux libre CaO en effet :



Zone de Transition amont

Cette zone se caractérise par :

- La formation de l'alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF) de l'ordre de 5 à 15 %: donne des résistances faibles et peu précisées.

- La formation de l'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A) de l'ordre de 2 à 106 %.

Zone de cuisson

Cette zone se caractérise par :

- La formation de silicate bi calcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C2S) de l'ordre de (10 -20 %) : Résistances initiales moins élevées que C3S, mais deviennent bonnes à long terme, il est moins bon en terme d'aptitude au broyage que C3S
- La formation de silicate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C3S) de l'ordre de 50 à 70 % : ce composant donne de très bonnes résistances à court et à long terme, ainsi qu'une bonne aptitude au broyage.

Zone de Transition aval

Cette zone se caractérise par : Un croûtage instable, température élevée.

Zone de refroidissement

Cette zone se caractérise par :

- L'absence fréquente de croûtage, ce qui la rend vulnérable aux attaques chimiques.
- La récupération variable de chaleur du refroidisseur

3.3 Refroidisseur

Le four est reliée au refroidisseur par le capot de chauffe à ce niveau le clinker sort à une température de 1450°C et subi une trempe rapide afin de figer les C3S et de les empêcher de redevenir en C2S chose qui influe sur l'atelier de broyage cuit parce que les C2S sont difficile à broyer donc sur la qualité de clinker. Cette opération est nécessaire à la formation du C3S l'élément nécessaire pour la résistance du ciment.

Le refroidisseur permet la récupération d'énergie thermique pour les réintroduire au niveau du four ou ils sont emportés par le flux de l'air secondaire et aussi la récupération d'air d'exhaure. Les parois de refroidisseur sont garnies de réfractaire et l'air de refroidissement est soufflé par des ventilateurs de différent débit sous les grilles et traverse la couche du clinker en mouvement, les ventilateurs sont placés de part et d'autre du refroidisseur. la figure 8 montre le refroidisseur a grille :

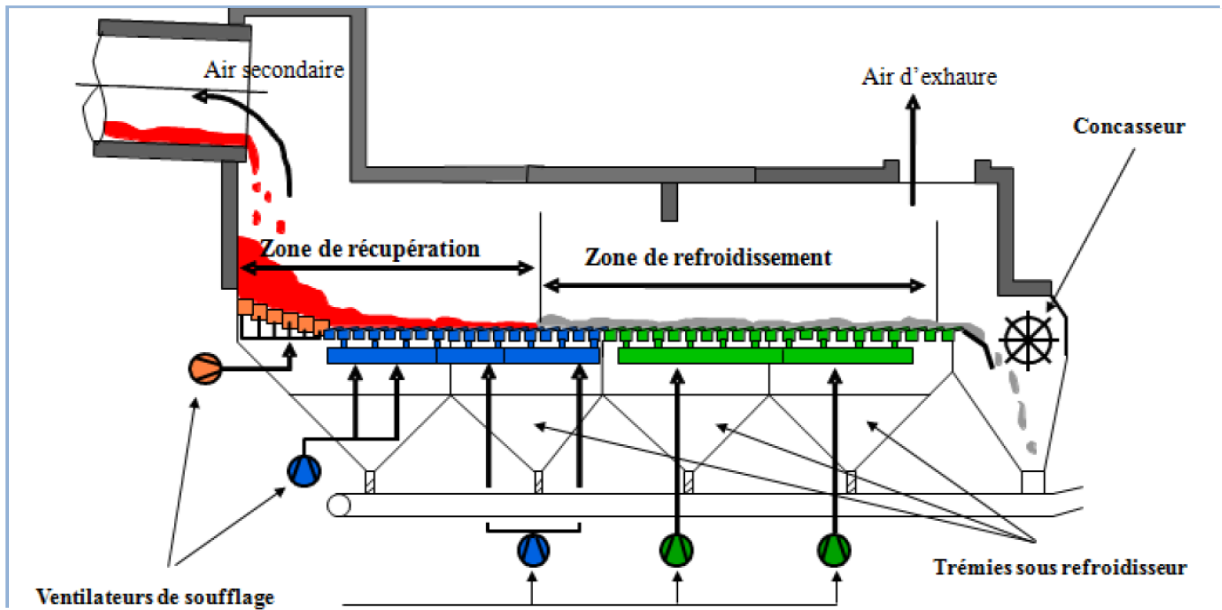


Figure 8: Refroidisseur a grille

La figure ci-dessus présente deux zones :

- ✚ La zone de refroidissement : Assure le refroidissement du clinker et réduire l'impact de la chaleur sur les processus suivants (transport de clinker, séchage, broyage du ciment).
- ✚ La zone de récupération : Permet la récupération des calories pour minimiser la consommation thermique et obtenir la température d'air de combustion, qui doivent recyclées au four grâce aux petites chambres de soufflages

Le refroidisseur a un triple rôle :

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

Après le refroidissement du clinker on obtient un clinker qui est composée par :

Phase solide

C3S (50% à 70%), C2S (10% à 30%)

Phase liquide

C3A (2%à 10%) , C4AF (5% à 15%)

Chapitre II

Présentation du Problématique

I. Variation de la consommation d'énergie durant l'année 2014

L'usine de Meknès c'est l'usine la plus consommatrice en énergie calorifique parmi les autres usines de LAFARGE-MAROC. La figure 9 présente l'historique de la consommation calorifique pour chaque mois dans l'année 2014.

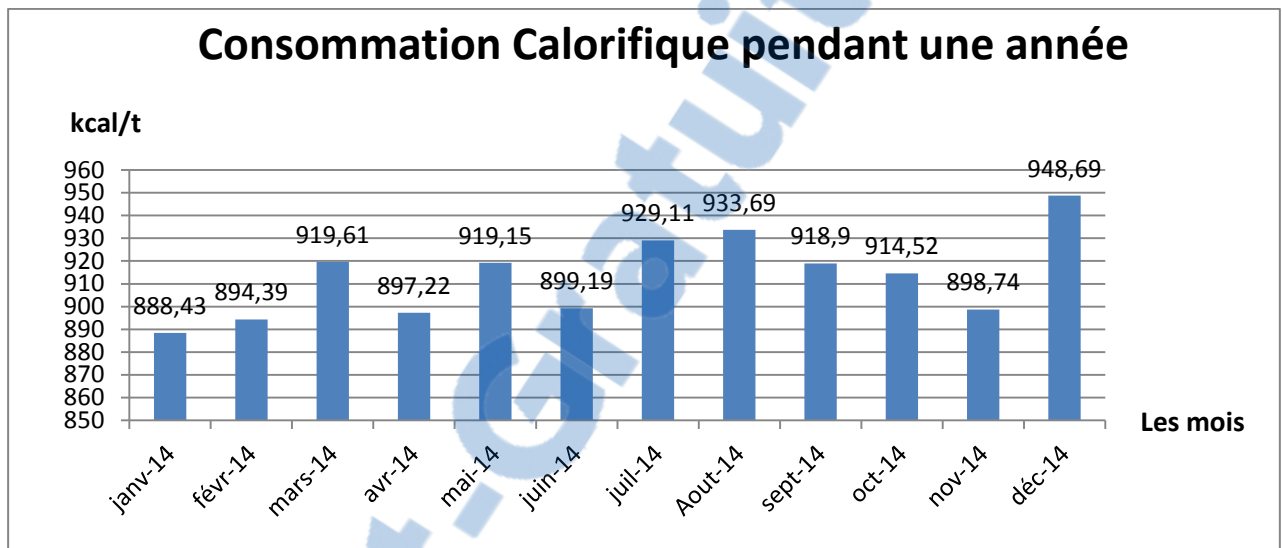


Figure 9: Consommation Calorifique de la ligne N°2

La ligne de cuisson N°2 consomme plus d'énergie thermique par rapport à son objectif fixé à 875 kcal/t. Plusieurs facteurs influencent cette augmentation, parmi lesquels on peut citer les pertes par parois.

II. Problématique

La ligne de cuisson consomme de l'énergie de manière intensive. Donc il est souhaitable d'évaluer les pertes thermiques par parois et de trouver un moyen de réduire ces pertes. En tant que partie intégrante d'un effort d'optimisation de la consommation calorifique et réduire les coûts de l'énergie. Les pertes thermiques dépendront de la température de surface, alors une augmentation excessive de température pourrait entraîner des problèmes structurels induits par différentiel de dilatation thermique entre l'enveloppe et les briques réfractaires. En effet ce projet consiste à déterminer les conditions de la diminution des pertes d'énergies (convection et radiation) et de trouver des résolutions en effectuant une analyse des caractéristiques des briques réfractaires.



III. Les étapes du déroulement du projet

On propose de gérer la mission qui s'appuie sur une bonne maîtrise du procédé de la fabrication du ciment et des outils d'analyse en quatre étapes :

- Étape 1 : calcul de la surface, mesure de température et de la vitesse du vent ainsi que la vitesse de ventilateur de zone, dans cette partie on va calculer la surface de chaque élément de la ligne de cuisson on se basant sur les plans géométriques de la ligne de cuisson, ensuite on va mesurer la température et la vitesse du vent de chaque surface calculé.
- Étape 2 : calcul des pertes dans cette étape on va utiliser une fiche de calcul standard de Lafarge (Wall losses calculation kiln 2).
- Étape 3 : analyse des causes dans cette partie on va utiliser un ensemble des outils (Ishikawa ; Pareto ; vote pondéré) afin d'énumérer toute les causes.
- Étape 4 : recherche des solutions approchées pour minimiser les pertes d'énergie par les parois au niveau de la ligne de cuisson du four 2.

Chapitre III :

Étude de transferts thermiques et appareils de mesure

I. Mode de transfert thermique

Les problèmes de transmission d'énergie et en particulier de la chaleur ont une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. En effet, dans certains systèmes réactionnels c'est la vitesse d'échange de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endo- ou exothermique). Le transfert de chaleur se fait suivant trois modes:

- Par conduction
- Par rayonnement
- Par convection

1. Transfert par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température.

1.1 Conduction d'une paroi cylindrique

Expression du flux thermique de conduction d'une Paroi cylindrique

Le flux thermique correspondant est :

$$\frac{\partial Q}{dt} = \lambda \frac{S dT}{dr} \longrightarrow \phi = \lambda \frac{2 r \pi L dT}{dr}$$

L'équation précédente peut donc s'intégrer de l'intérieur à l'extérieur du cylindre, on

Obtiendra la formule suivante :
$$\phi = \lambda \frac{2\pi L(T_i - T_e)}{\ln R_e/R_i}$$

Avec

ϕ = Quantité de chaleur en Watt

λ = Coefficient de conduction des matériaux en W/m.K

S = Surface des matériaux en m²

($T_i - T_e$) = Écart de température entre les deux parois en °C ou K

L = Longueur de la paroi cylindrique en m,

R_e et R_i = rayon extérieur et intérieur de la paroi en m.

✚ Expression de la résistance thermique d'un tube cylindrique

A partir de l'expression du flux, on déduit l'expression de la résistance thermique d'un tube

$$\phi = \lambda \frac{2 \pi L (T_i - T_e)}{\ln R_e / R_i} \longrightarrow \phi = \frac{(T_i - T_e)}{R_{th}}$$

Donc :
$$R_{th} = \frac{\ln \left(\frac{R_e}{R_i} \right)}{2 \lambda \pi L}$$

2. Transfert par convection

C'est un transfert de chaleur qui s'accompagne d'un transfert de masse ce mode d'échange de chaleur existe lorsqu'un fluide circule autour d'une paroi. L'étude du transfert de chaleur par convection est gouverné par la loi du Newton permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. Alors l'expression du flux est :

$$\phi = h \times S \times (T_p - T_a)$$

h : Coefficient thermique de convection (en $W.m^{-2}.K^{-1}$)

S : Surface d'échange en m^2

$(T_p - T_a)$: Différence de température entre parois et l'air ambiant

On parlera de convection forcée quand le mouvement du fluide s'effectue grâce à des forces externes (ventilateur) et de convection naturelle quand le mouvement s'effectue sous l'influence de différences de densité dues à des différences de températures au sein du fluide.

2.1 Détermination du coefficient thermique de convection naturelle

Le tableau 2 montre les formules de calculs du coefficient d'échange naturel :

Tableau 2: Formule de calcul du coefficient d'échange naturel

Convection Naturelle Laminaire	$h_{nat} = 1,18 * (\Delta T / L)^{1/4}$
Convection Naturelle Turbulent	$h_{nat} = 1,38 * (\Delta T)^{1/3}$

2.2 Détermination du coefficient thermique de convection forcée

L'expression de la convection forcée dépend de la vitesse du vent et du type de convection h_{nat} . La formule utilisée dans les calculs et la suivante :

$$h_f = h_{nat} \times (1 + 0.57 \times v)^{exp}$$

La valeur d'expo varie entre 0,5 et 0,8 en fonction de la vitesse du vent comme le montre le tableau 3 :

Tableau 3: Valeur d'expo

	Type de convection	Valeur d'exponent (exp)
$v < 1.30 \text{ m/s}$	Natural / Laminar	0.5
$v < 1.55 \text{ m/s}$	Natural / Turbulent	0.5
$v < 2.00 \text{ m/s}$	Forced / Laminar	0.5
$v < 2.40 \text{ m/s}$	Forced / transitory (50Laminar/50Turbulent)	0.5
$v > 2.40 \text{ m/s}$	Forced / Turbulent	0.5
$v < 3.00 \text{ m/s}$	Forced / Turbulent	0.5
$v < 5.00 \text{ m/s}$	Forced / Turbulent	0.6
$v < 8.00 \text{ m/s}$	Forced / Turbulent	0.75
$v > 8.00 \text{ m/s}$	Forced / Turbulent	0.8

Pour le four rotatif, le coefficient de convection forcé dépend de la vitesse de convection. Alors l'expression de la vitesse de convection devient :

$$V_c = (1 - 20\%) \times \left(\pi \times d \times \frac{V_r}{60} + V_v \right) + 20\% \times \left(\pi \times d \times \frac{V_r}{60} + V_v + V_f \right)$$

Avec :

V_c : Vitesse de convection en (m/s)

V_v : Vitesse du vent (m/s)

V_r : Vitesse de rotation du four (m/s)

V_f : Vitesse des ventilateurs de zone (m/s)

20% : Cette valeur représente la longueur de la zone où il y a des ventilateurs par rapport à la longueur du four.

Dont ce cas la valeur d'exp dépend de la vitesse de convection on utilise le tableau précédent pour préciser la valeur d'exp mais on changeant la notion de vitesse du vent par la vitesse de convection, on garde la même formule du coefficient de convection forcée.

3. Transfert par rayonnement

C'est une transmission d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie, électromagnétique). L'étude du transfert de chaleur par rayonnement est gouverné par la loi de Stéphan-Boltzmann est donné par la relation suivante :

$$\dot{Q} = \varepsilon \times \sigma \times S \times (T_p^4 - T_a^4)$$

Avec :

ε : L'émissivité de la surface est 0,95.

σ : Coefficient de Stephan Boltzmann = $4.882.10^{-8}$ (Kcal/m²/K⁴).

S : La surface d'échange en m².

$(T_p - T_a)$: Différence de température entre parois et l'air ambiant.

I. Appareils des mesures

1. Pyromètre Infrarouge

Le pyromètre optique est l'appareil utilisé pour la mesure de la température par quantification de l'énergie radiative émise dans l'infrarouge. Le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance. La figure 10 montre le Pyromètre Infrarouge :



Figure 10 : Pyromètre Infrarouge

1.1 Caractéristiques techniques [1] :

Les caractéristiques sont présentées sur le tableau 4:

Tableau 4 : Caractéristiques techniques Pyromètre d’Infrarouge

Marque	Fluke 568 IR Thermomètre
Gamme de température infrarouge	-40 à 800 °C (-40°F à 1 472°F)
Echelle de température	Degré celsius , Degré Fahrenheit
Température de Fonctionnement	0°C à 50°C (32°C à 122°C)
Temps de réponse infrarouge	<500 ms
Réglagee d'émissivité	Réglage numérique de 0,1 à 1
Dimensions minimales du point	19 mm
Réponse spectrale infrarouge	8 µm à 14 µm

2. Anémomètre

Un anémomètre est un appareil qui permet de mesurer la vitesse du vent. Il est muni d'un capteur mécanique de type éolien qui tourne en fonction de la puissance du vent. La vitesse de rotation de l'hélice est proportionnelle à la vitesse du vent. Après transformation de cette vitesse de rotation à l'aide d'un procédé mécanique, magnétique ou électronique, la vitesse du vent est visualisée par l'intermédiaire d'une aiguille sur un afficheur électronique.

La figure 11 montre le Pyromètre Infrarouge :



Figure 11: Anémomètre

2.2 Caractéristiques techniques de l'Anémomètre [2] :

Les caractéristiques techniques de l'Anémomètre sont regroupées dans le tableau 5 :

Tableau 5:Caractéristiques techniques de l'Anémomètre

Marque	Anémomètre Mini Air 2 Multiprobe
Plage de vitesse	0,4 à 30 m/s
Précision	$\pm 3 \%$ (<20 m/s) et $\pm 4 \%$ (>20 m/s)
Plage de température	-20 à +80 °C
Humidité de l'air	5 à 95%
Plage du débit volumétrique	0,0 ... 999900 m ³ /min

Chapitre IV :

Calcul des pertes d'énergie **Et étude des causes**

I. Calcul des surfaces et mesures des températures et des vitesses du vent des éléments de la ligne de cuisson

D'abord on commence par le calcul des surfaces des éléments de la ligne de cuisson, ensuite on mesure la température et la vitesse du vent de chaque élément calculé auparavant.

1. Calcul de la surface et mesure de la température et vitesse du vent de la Tour :

1.1 Calcul de la surface des cyclones

La méthode de calcul suivante résume les équations qu'on a utilisées on se basant sur la géométrie de chaque cyclone (schéma voir annexe A).

▪ Calcul de la surface des cônes

$$S_1 = \pi \times (R1 + R2) \times a \quad \text{Avec} \quad a = \sqrt{(L - C)^2 + (R1 - R2)^2}$$

▪ Calcul de la surface des cylindres

$$S_{C1} = 2 \pi R1(C-hj)$$

▪ Calcul de la surface d'escargot

Pour ce calcul on a découpé la surface d'escargot en 4 cercles chacune a un rayon R différent comme le montre la figure 12 :

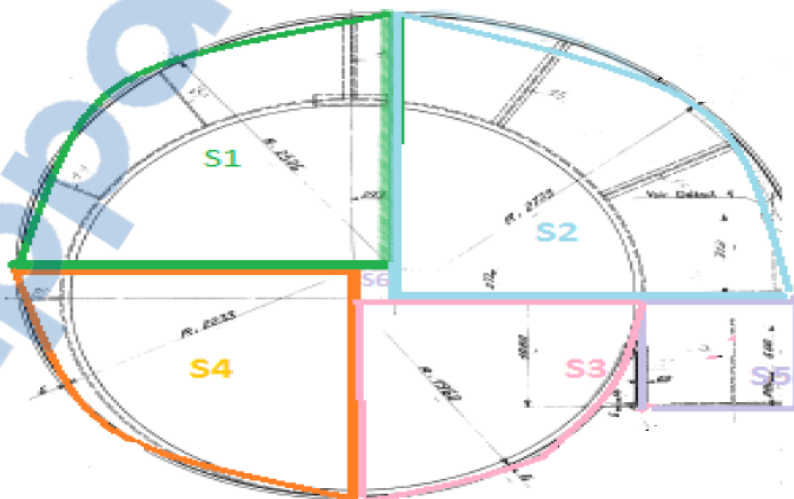


Figure 12: Toit du cyclone en générale

Donc pour le calcul du périmètre du toit on doit deviser chaque cercle en 4 parties

$$P_{\text{toit}} = P1 + P2 + P3 + P4 + a + b$$

$$P_1 = \frac{2\pi R_1}{4}, \quad P_2 = \frac{2\pi R_2}{4}, \quad P_3 = \frac{2\pi R_3}{4}, \quad P_4 = \frac{2\pi R_4}{4}$$

Donc la surface d'escargot est : $S_{\text{escargot1}} = P_{\text{toit}} \times h_{j1}$

▪ Calcul de la surface du toit

Pour le calcul de la surface du toit on doit calculer la surface d'escargot puis on retranche la surface de la jupe : $S_{\text{toit}} = S_{\text{escargot}} - S_{\text{jupe}}$

Avec la surface de la jupe est : $S_{\text{jupe}} = \pi \times r^2$

a. Calcul de la surface de la gaine Gaz C2 et C3

Le tableau 6 représente le calcul de la surface pour les deux gaines (schéma voir annexe B):

Tableau 6 : Surface de la Gaine Gaz C2, C3

Calcul de la surface de cylindre 1	$SC_1 = 2 \pi R_1 \times L_1$
Calcul de la surface du cône 1	$SC_2 = \pi \times (R_1 + R_2) \times a$ Avec $a = \sqrt{L_2^2 + (R_2 - R_1)^2}$
Calcul de la surface du cône 2	$SC_3 = \pi \times (R_2 + R_3) \times a$ Avec $a = \sqrt{L_3^2 + (R_3 - R_2)^2}$
Calcul de la surface de cylindre 2	$SC_4 = 2 \pi R_3 \times L_4$
Calcul de la surface du cône 3	$SC_5 = \pi \times (a + R_4) \times R_4$ Avec $a = \sqrt{(R_4)^2 + L_5^2}$
Calcul de la surface de cylindre 3	$SC_6 = 2 \pi R_6 \times L_5$

b. Calcul de la surface Gaine Gaz C4

Le tableau 7 représente le calcul de la surface du gain gaz C4 (schéma voir annexe C) :

Tableau 7 : Surface de la Gaine Gaz C4

Calcul de la surface de cylindre 1	$SC_1 = 2 \pi R_1 \times L_1$
Calcul de la surface du cône 1	$SC_2 = \pi \times (R_1 + R_2) \times a$ Avec $a = \sqrt{L_2^2 + (R_2 - R_1)^2}$
Calcul de la surface de cylindre 2	$SC_3 = 2 \pi R_3 \times L_1$
Calcul de la surface du cône 2	$SC_4 = \pi \times (R_3 + R_4) \times a$ Avec $a = \sqrt{L_4^2 + (R_4 - R_3)^2}$
Calcul de la surface du cône 3	$SC_5 = \pi \times (R_4 + R_5) \times a$ Avec $a = \sqrt{L_5^2 + (R_5 - R_4)^2}$
Calcul de la surface de cylindre 3	$SC_6 = 2 \pi R_5 \times L_6$
Calcul de la surface du cône 4	$SC_7 = \pi \times (a + R_6) \times R_6$ Avec $a = \sqrt{[(R_6)^2 + (L_7)^2]}$
Calcul de la surface de cylindre 4	$SC_8 = 2 \pi R_7 \times L_7$

Les résultats des calculs des surfaces de la tour ainsi que les mesures de température et vitesse du vent pour chaque surface calculée sont regroupés dans le tableau 8 :

Tableau 8 : Résultats des calculs des surfaces et mesure des températures et vitesse du vent pour chaque surface de la tour

	Cyclone C1						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m/s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	T du Surface En °C	T du Surface En K	
Cône	2,84	16,7	25	298	135	408	2
Cylindre	2,97	35,4	25	298	127	400	2
Escargot	2,18	29	25	298	119	392	2
Toit	2,97	26,4	25	298	148	421	2

	Cyclone C1 bis						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m/s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Cône	2,84	16,7	25	298	150	423	2
Cylindre	2,97	35,4	25	298	125	398	2
Escargot	2,17	28,5	25	298	118	391	2
Toit	2,97	25,9	25	298	156	398	2

	Cyclone C2						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m/s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Cône	4,83	37,62	25	298	118	391	1,8
Cylindre+ Escargot	4,18	75,7	25	298	97	370	1,8
Toit	2,15	21,75	25	298	77	350	1,8
Gaine gaz	2	92,04	25	298	70	343	1,8

	Cyclone C3						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m /s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Cône	4,83	37,62	25	298	161	434	1,6
Cylindre+ Escargot	4,18	75,6	25	298	120	398	1,6
Toit	2,12	21,17	25	298	75	348	1,6
Gaine gaz	1,97	95,338	25	298	144	417	1,6

	Cyclone C4						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m /s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Cône	4,83	37,62	25	298	220	493	1,5
Cylindre+ Escargot	4,18	75,1	25	298	150	423	1,5
Toit	2,15	21,75	25	298	126	399	1,5
Gaine gaz	2	130	25	298	187	460	1,5

c. Boite à fumer

Le tableau 9 présente le calcul de la surface de la boite à fumer (schéma voir annexe D) :

Tableau 9 : Surface de la boîte à fumer

Calcul du diaphragme	Cylindre 1	$Sc1=2 \pi R1 \times L1$
Calcul du sous diaphragme	Cylindre 2	$Sc2=2 \pi R2 \times L2$
	Cylindre 3	$Sc3=2 \pi R3 \times L3$
	Cône ouvert	$Sc4= \pi \times a \times (R3+R4)$ Et $a = \sqrt{[(L4)^2 + (R4 - R3)^2]}$
	Demi-cône	$Sc5= ((\pi \times R4 \times (R4+a))/2)$ Et $a = \sqrt{[(L4)^2 + (R4)^2]}$
Calcul de la glisse	Cylindre 4	$Sc6=2 \pi R5 \times L5$

Les résultats des calculs des surfaces et les mesures de température et vitesse du vent de la boîte à fumer sont regroupés dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Résultats des calculs des surfaces et mesure de température et vitesse du vent de la boîte à fumer

	Boîte à fumer						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m /s
	Longueur m	Surface m²	Ambia nt °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Diaphragme	1,48	4,81	25	298	83	356	1,5
Sous diaphragme	2,46	14,18	25	298	123	396	1,5
Glisse	3,38	20,45	25	298	147,5	421	1,5

La variation de la température tout au long de la tour est représentée dans la figure 13 :

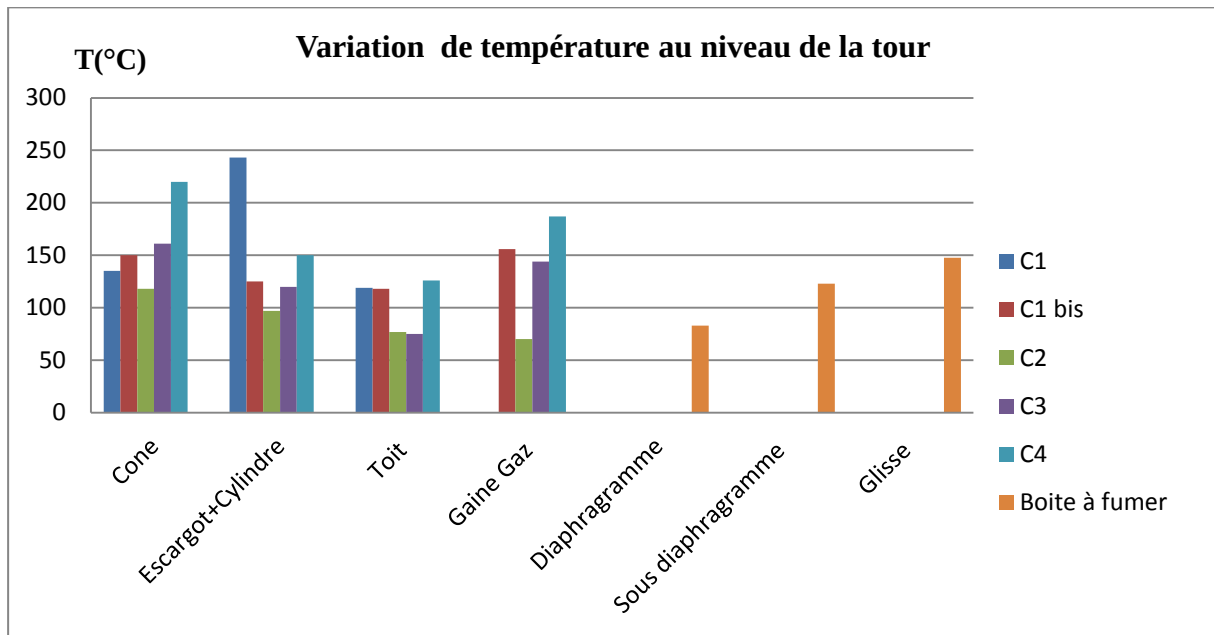


Figure 13: Variation de température au niveau de la tour

La différence de température tout au long de la tour de préchauffage peut être traduite par :

- Les échanges thermiques au niveau des cyclones et les gaines de jonction.
- Des briques usées.
- Des zones des briques changé par des bétons.
- Formation des concrétions dans des zones au niveau de la paroi du cyclone

La variation de la vitesse du vent tout au long de la tour est représentée sur la figure 14 :

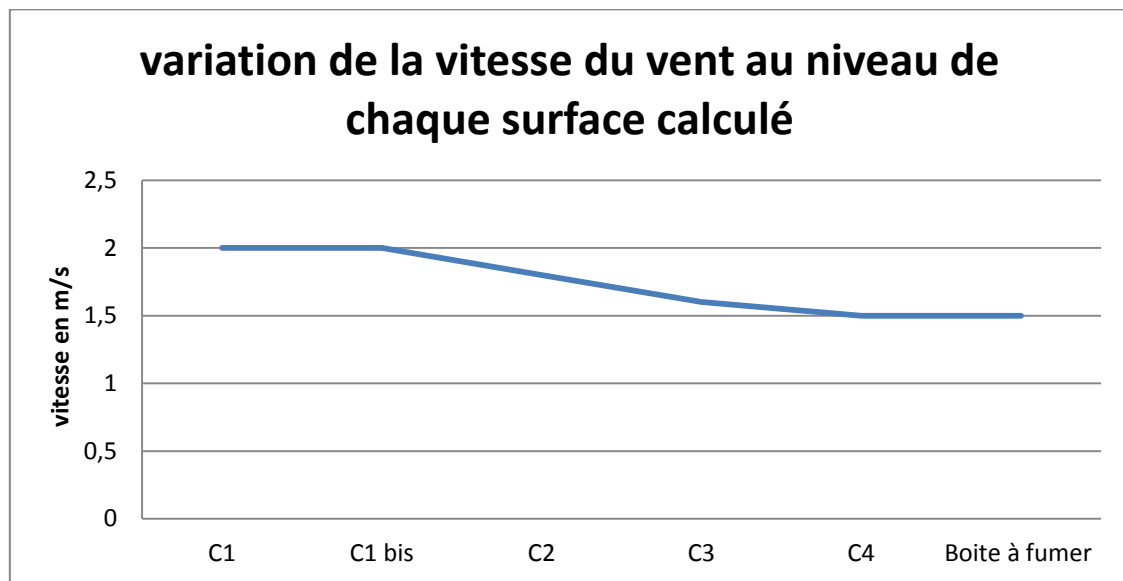


Figure 14 : Variation de la vitesse du vent de la tour de préchauffage

On remarque que lorsque l'altitude de la tour de préchauffage augmente, la vitesse du vent augmente.

2. Calcul de la surface du four avec les différentes mesures

Les résultats du calcul de la surface du four et la vitesse de vent ainsi que la température sont regroupés dans le tableau 11 :

Tableau 11 : Résultats des calculs des surfaces et mesure de température et vitesse du vent du four

Géométrie		Temp	Vitesse	Vitesse de	Géométrie		Temp	Vitesse du	Vitesse
Long (m)	Surf (m²)	°C	du vent (m/s)	ventilation (m/s)	Long (m)	Surf (m²)	°C	vent (m/s)	de ventilation (m/s)
1,0	12,57	369	1,3	0		12,57	145	1,3	0
1,0	12,57	354	1,3	0	1,0	12,57	168	1,3	0
1,0	12,57	398	1,3	0	1,0	12,57	198	1,3	0
1,0	12,57	380	1,3	0	1,0	12,57	150	1,3	0
1,0	12,57	325	1,3	0	1,0	12,57	145	1,3	0
Band1	26,85				1,0	12,57	147	1,3	0
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	146	1,3	0
1,0	12,57	265	1,3	0	1,0	12,57	100	1,3	0
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	140	1,3	0
1,0	12,57	269	1,3	0	1,0	12,57	198	1,3	0
1,0	12,57	298	1,3	0	1,0	12,57	201	1,3	0

1,0	12,57	214	1,3	0	1,0	12,57	213	1,3	0
1,0	12,57	215	1,3	0	1,0	12,57	245	1,3	0
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	256	1,3	0
1,0	12,57	201	1,3	0	1,0	12,57	267	1,3	7,25
1,0	12,57	231	1,3	0	1,0	12,57	258	1,3	7,25
1,0	12,57	211	1,3	0	1,0	12,57	235	1,3	7,25
1,0	12,57	224	1,3	0	1,0	12,57	215	1,3	7,25
1,0	12,57	226	1,3	0	1,0	12,57	278	1,3	7,25
1,0	12,57	223	1,3	0	1,0	12,57	148	1,3	7,25
1,0	12,57	226	1,3	0	1,0	12,57	195	1,3	7,25
1,0	12,57	223	1,3	0	1,0	12,57	192	1,3	7,25
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	166	1,3	7,25
1,0	12,57	298	1,3	0	Band3	24,50			
1,0	12,57	317	1,3	0	1,0	12,57	184	1,3	7,52
1,0	12,57	335	1,3	0	1,0	12,57	189	1,3	7,52
1,0	12,57	400	1,3	0	1,0	12,57	238	1,3	7,52
1,0	12,57	350	1,3	0	1,0	12,57	274	1,3	7,52
Band2	24,50				1,0	12,57	256	1,3	7,52
1,0	12,57	256	1,3	0	1,0	12,57	245	1,3	7,52
1,0	12,57	245	1,3	0	1,0	12,57	298	1,3	7,52
1,0	12,57	210	1,3	0	1,0	12,57	331	1,3	7,52
1,0	12,57	231	1,3	0	1,0	12,57	324	1,3	7,52

La figure 15 représente la variation de la température tout le long du four :

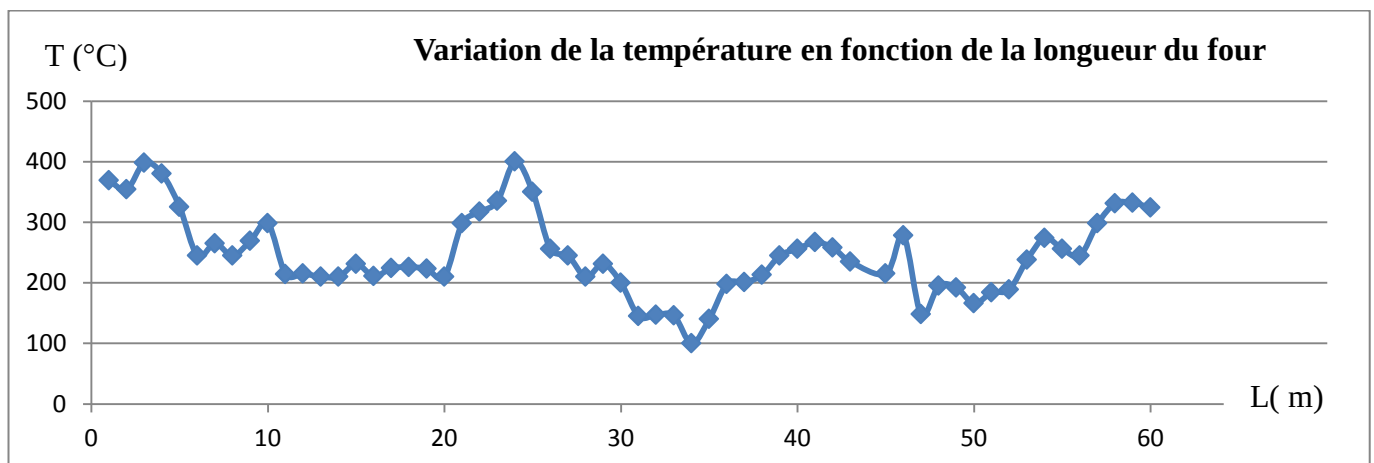


Figure 15: Variation de la température au niveau de la virole

D'après la figure 14 en remarque une variation de température au niveau de la virole, cette température peut entraîner des déformations au niveau de la virole ainsi des fissurations des briques réfractaires et entraine aussi des pertes d'énergies thermiques majeur qui influence la consommation

calorifique. En explique la diminution de température dans certaine zone par la présence des ventilateurs ainsi que la présence des couches de croutage (dépôt de clinker sur les parois).

3. Calcul de la surface et mesure de la température et vitesse du vent du capot de chauffe :

Les résultats du calcul de la surface du Capot de chauffe ainsi que les mesures de température et du vent pour chaque surface calculée sont regroupés dans le tableau 12 (schéma voir annexe E) :

Tableau 12: Résultats du calcul de la surface et mesure de la température et de la vitesse du vent du Capot de chauffe

	Capot de chauffe						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m/s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	
Latéral du four 2	4,50	8,41	25	298	95	368	1,3
Latéral du refroidisseur	3,38	47,78	25	298	77	350	1,3

4. Calcul de la surface et mesure de la température et la vitesse du vent du refroidisseur :

Les résultats du calcul de la surface et mesure de la température et vitesse du vent de la gaine d'exhaure sont regroupées dans le tableau 13 (schéma voir annexe F) :

Tableau 13 : Résultats du calcul de la surface et mesure de la température et de la vitesse du vent du refroidisseur

	Refroidisseur						
	Géométrie		Température				Vitesse du vent m/s
	Longueur m	Surface m ²	Ambiant °C	Ambiant K	Surface °C	Surface K	

Frontal refroidisseur	8,95	177,51	25	298	65	338	1,3
Frontal casse boule	3,29	136,31	25	298	105	378	1,3
Frontal puits	2,81	83,96	25	298	95	368	1,3

La variation de la température au niveau du capot de chauffe et refroidisseur sont représentée dans la figure 16 :

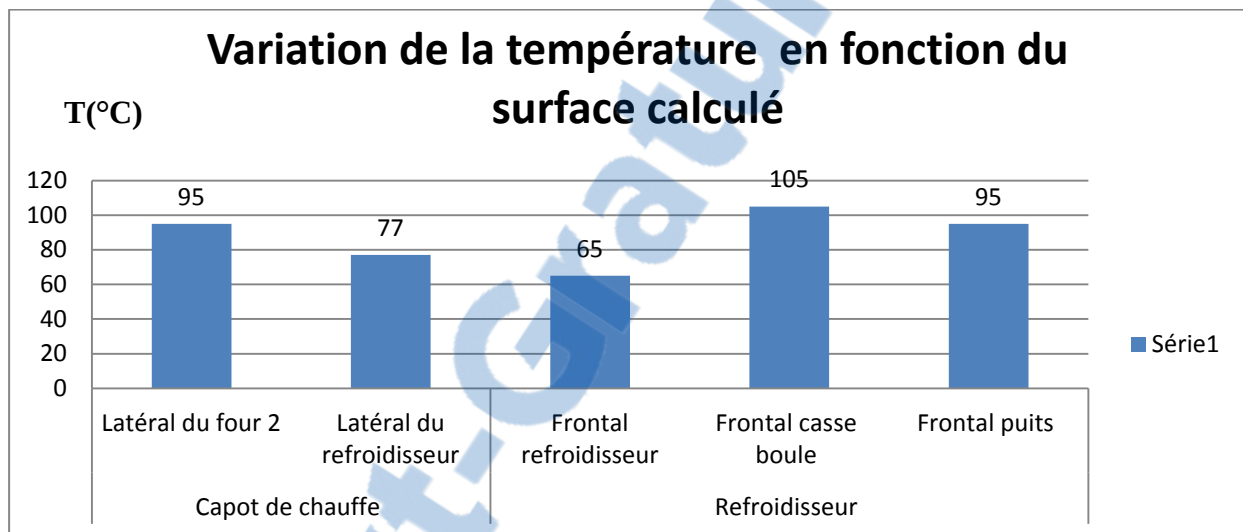


Figure 16 : Variation de la température

Au niveau du refroidisseur et du capot de chauffe, la température n'est pas trop élevée à cause de la présence des ventilateurs de soufflage.

5. Calcul de la surface et mesure de la température de la gaine d'exhaure :

Les résultats qu'on a obtenu sont représentés sur le tableau 14 (schéma voir annexe J) :

Tableau 14 : Résultats du calcul de la surface et mesure de la température de la gaine d'exhaure

		Géométrie		Température de la surface ° C
		Hauteur (m)	Surface (m²)	
	S1	7,60	41,78	250
	S2	1,75	0,35	210
	S3	1,75	1,42	155
	S4	1,75	1,42	130
	S5	1,75	1,42	105

Gaine d'exhaure	S6	1,75	0,35	105
	S7	9,63	57,48	101
	S8	2,05	9,93	100
	S9	1,14	4,08	100
	S10	5,64	26,93	98
	S11	21,01	189,76	90
	S12	1,90	5,37	90
	S13	3,39	20,22	84
	S14	1,90	5,27	80
	S15	2,08	12,41	76

La variation de la température au niveau de la gaine d'exhaure est représentée sur la figure 17 :

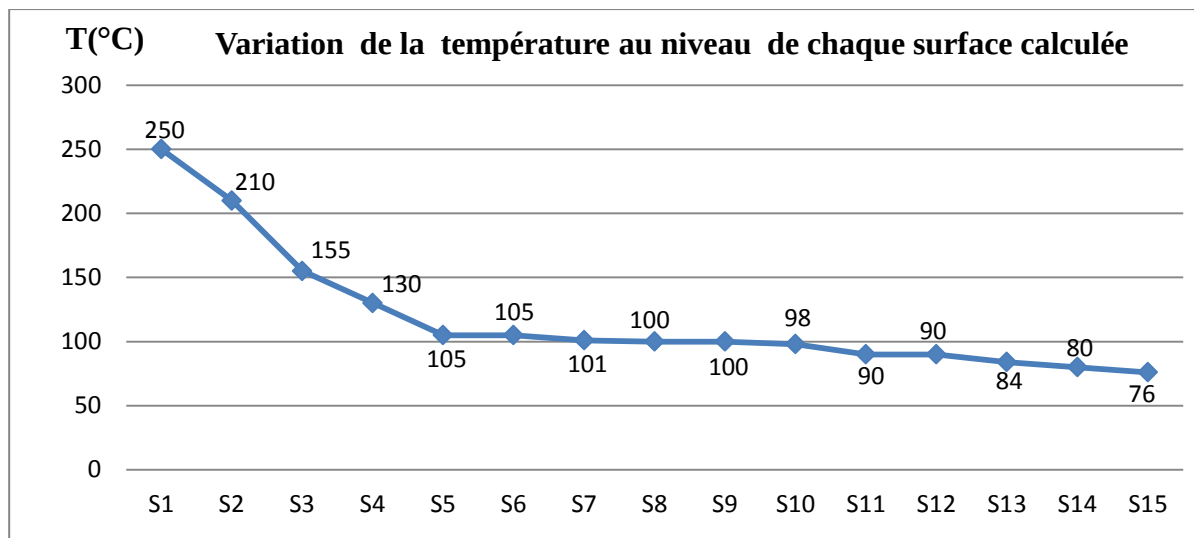


Figure 17 : Variation de la température au niveau de chaque surface calculée

On remarque que la température en amont de la gaine d'exhaure est élevée par ce que les gaz qui la traversent la gaine viendront du refroidisseur sont chauds et au fur et à mesure qu'on avance, la température diminue à cause de la présence du ventilateur.

II. Calcul des pertes par parois

Les pertes thermiques par parois jouent un rôle majeur dans le fonctionnement de la ligne parce qu'ils donnent une indication sur la ligne cuisson. Même s'il est équipé des caméras, la chute des briques réfractaires ne peut être détectée que par l'augmentation de la température dans les zones de la ligne de cuisson. Les analyses de la température de la surface peuvent être un moyen de contrôler le processus et de détecter les défaillances, tel que la chute de croûtage d'un réfractaire usé ou bien une faible épaisseur des briques. L'objectif de cette partie est d'analyser et de calculer les

pertes thermiques par les parois (Convection et rayonnement). Pour le calcul on a utilisé des fiches de calcul standard de Lafarge (Wall losses calculation kiln 2).

1. Les résultats

Pour faire l'évaluation des pertes thermiques, il existait des feuilles Excel standard de Lafarge qui sont préétablies par l'Audit. Il suffit donc de prendre des mesures des surfaces et températures sur des points prédéfinis pour obtenir le résultat voulu. La méthode de calcul des pertes (voir annexe H), dont les résultats sont rassemblés dans le tableau 15 :

Tableau 15 : Les pertes par parois au niveau de la ligne de cuisson N°2

	Perte kJ/kg kk	Perte kcal/kg kk
Tour (Cyclone + Boite a fumée)	132	31
Four	365	87
Capot de chauffe	2	1
Refroidisseur + Gaine d'exhaure	54	13

2. Analyse Pareto

Pour déterminer les éléments de la ligne de cuisson qui caractérisent par des pertes thermiques très importantes on a adopté une analyse Pareto. Le tableau 16 montre les pertes cumulées en Pourcentage :

Tableau 16: Perte cumulée

	Perte en kcal/kg kk	Perte en %	Perte cumulée en %
Four	87	65,91	65,91
Tour (Cyclone Boite à fumée)	31	23,48	89,39
Refroidisseur+ Gaine d'exhaure	13	9,85	99,2
Capot de chauffe	1	0,76	100

La figure 18 présente l'analyse Pareto des pertes par parois :

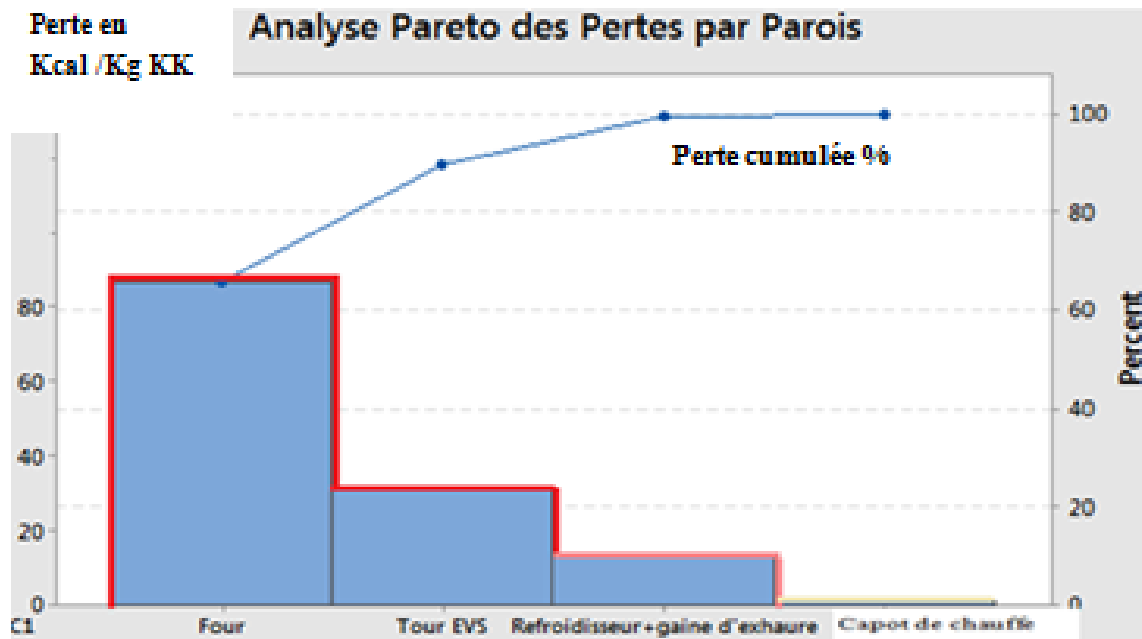


Figure 18: L'analyse Pareto des pertes par parois

D'après la figure 17 on peut distinguer trois zones :

➤ **Zone A**

Dans cette zone les pertes au niveau du Four et la Tour représentent respectivement 65.91 % et 23.48% des pertes totales. Il convient d'étudier sérieusement les possibilités de réduire ses pertes.

➤ **Zone B**

Dans cette zone les pertes au niveau du refroidisseur et Gaine d'exhaure représentent respectivement 9,85% des pertes totales.

➤ **Zone C**

Dans cette zone les pertes au niveau du capot de chauffe représentent 0,76% des pertes totales, elles sont négligeables.

III. Analyse des causes

1. Recherche des causes probables des problèmes constatés

Afin de déterminer les différentes causes des pertes par les parois au niveau du four et de la tour, on a procédé à une analyse Ishikawa. Toutefois pour compléter la liste des causes, on a effectué un Brainstorming avec les responsables du service procédé, la séance a duré 20 min et s'est

déroulée dans une ambiance agréable qui respecte les règles du brainstorming, dans le but de recenser le reste des causes susceptibles de créer cet effet. Après avoir récolté toutes les causes, on les a classée par type.

La figure 19 présente le diagramme d'Ishikawa :

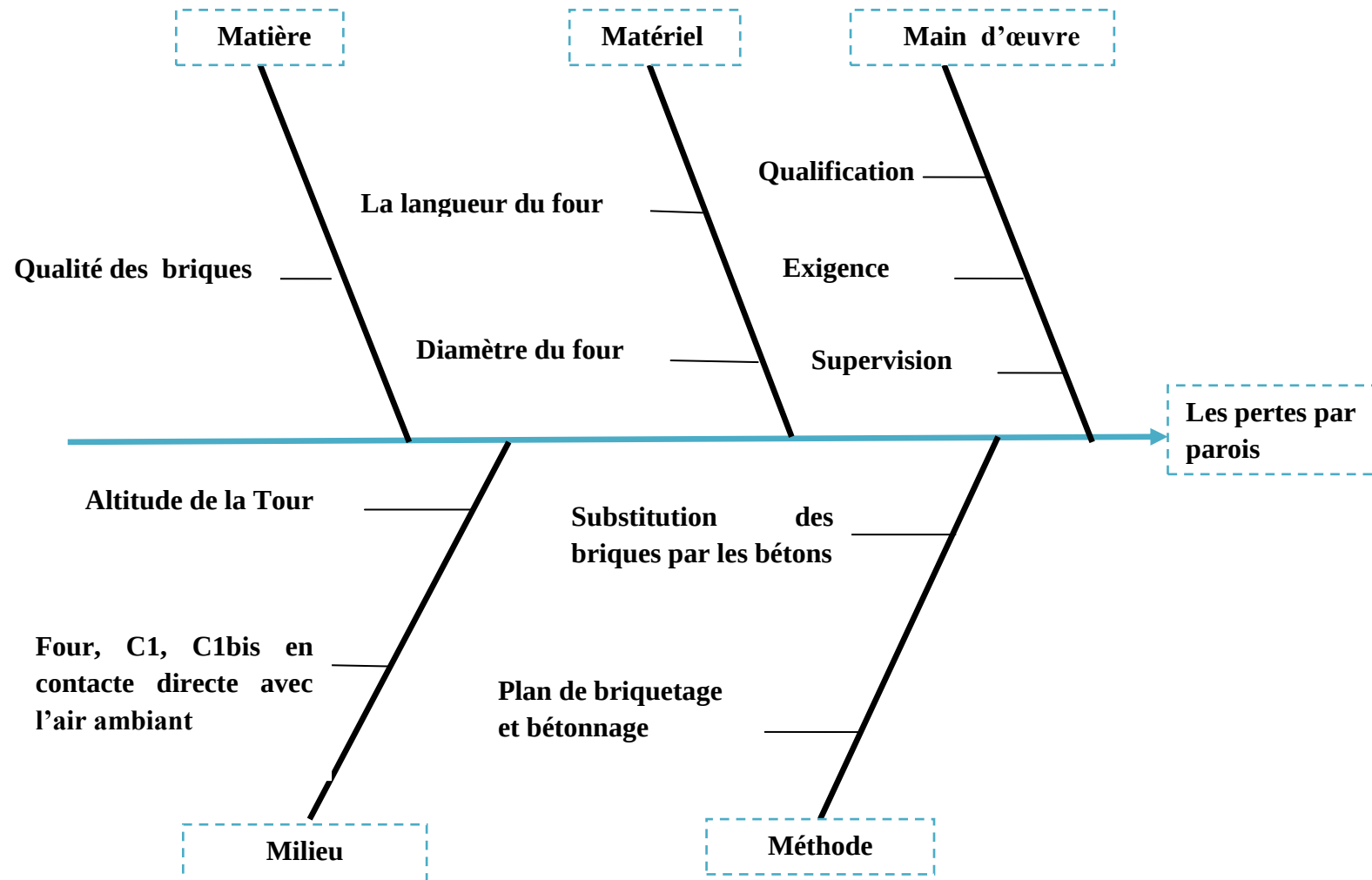


Figure 19 : Diagramme Ishikawa des pertes par parois

2. Vote Pondérée

Pour effectuer ce vote on a distribué des fiches de vote pondéré aux différents responsable de service procédé, spécialement chef de procédé Chaik, en raison de savoir l'impact de ses causes sur l'augmentation des pertes. La figure 20 montre la fiche de vote pondérée :

Service : Procédé	Vote Pondérée	
Date émission : 23 /04/2015	Date récupération : 24/04/2015	
Etude des causes d'augmentation des pertes par parois de four 2		
❖ Informations sur les participants : ☐ Madame ☐ Monsieur ☐ Mademoiselle Nom.....Prénom.....		
❖ Ce qui est demandé : Veuillez SVP de donner une note entre 1 à 11 aux causes ci-dessous suivant l'importance que vous juger : 1 à 4 : pas critique 4 à 7 : Un peu critique 7 à 11 : très critique		
N° de cause	Nature des causes	Poids (note)
1	Qualité des briques	
2	Substitution des briques par des bétons	
3	Plan des briquetages et bétonnage	
4	La longueur du four	
5	Diamètre du four	
6	Altitude de la tour	
7	Four, C1, C1bis en contact directe avec l'air ambiant	
8	Qualification	
9	Substitution	
10	Exigence	
Réaliser par : Aourabi sarra		Merci de votre collaboration

Figure 20: La fiche de vote pondérée

Après l'élaboration de cet outil, on regroupe les résultats dans le tableau 17 :

Tableau 17: Détail du vote pondéré

Cause / Participant	FADL	RBITE	CHAIK	WZUITI	HOSSAM	BOHO	TAIBI	LAKBALI	BABOUTI	MOAFI	Somme
Qualité des briques	10	9	11	10	11	10	10	11	9	11	102
Substitution brique par béton	11	10	11	10	10	9	11	11	10	11	104
Plan de briquetage et de bétonnage	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	12
Langueur du four	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	13
Diamètre du four	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	14
Altitude de la tour	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
Four C1, C1bis en contact avec l'air	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	12
Qualification	10	10	9	10	10	9	10	9	10	10	98
Supervision	1	2	1	1	1	3	1	2	1	2	15
Exigence	1	2	2	1	1	2	2	1	3	1	17

D'après le tableau 17 du vote pondéré, on a pu hiérarchiser les causes des pertes par les parois et on a calculé la somme des criticités qu'on va l'utiliser par la suite dans l'analyse Pareto.

3. Analyse Pareto

Les résultats d'analyse de Pareto sont regroupés sur le tableau 18 :

Tableau 18 : Tableau de Pareto

Les causes	Criticité	Pourcentage	% cumulés
Substitution des briques par les bétons	104	26,46	26,46
Qualité des briques	102	25,95	52,41
Qualification	98	24,93	77,34
Altitude de la tour	17	4,32	81,66
La longueur du four	15	3,81	85,47
Diamètre du four	14	3,56	89,03
Exigence	13	3,3	92,33
Plan de briquetage et bétonnage	12	3,05	95,38
Supervision	12	3,05	98,43
Four, C1, C1bis en contact direct avec l'air ambiant	10	2,54	100
	393		

Ensuite on trace l'histogramme de Pareto qui représente la courbe des pourcentages cumulés :

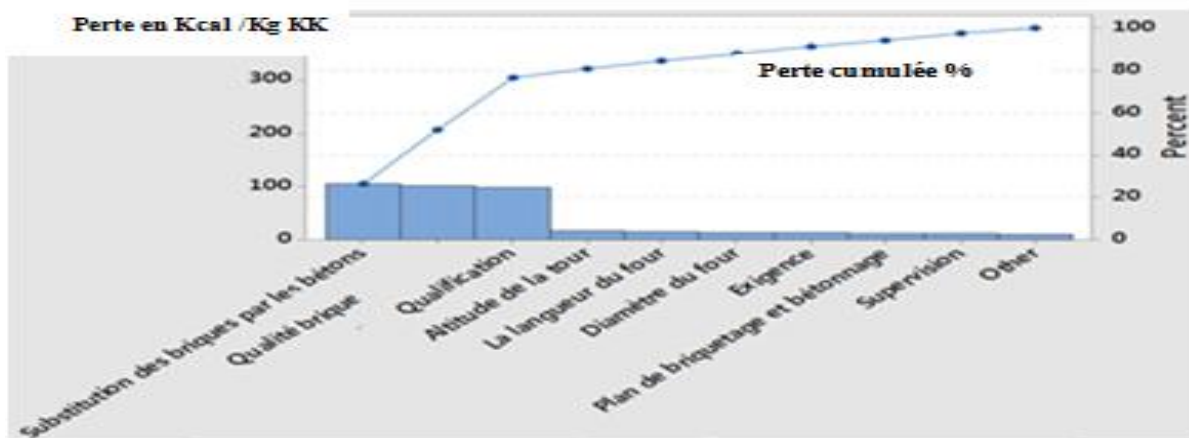


Figure 21: Analyse Pareto

D'après l'analyse Pareto on peut détecter les causes principales, parmi toutes les causes suggérées, toutefois on remarque que les causes principales sont :

- Qualité des briques
- Substitution des briques par les bétons
- Qualification

Chapitre IV :

Proposition de solution

I. Le plan à suivre pour réduit les pertes

- On va déterminer les différents types des briques utilisées à partir de l'historique de briquetage.
- On va calculer les résistances thermiques des réfractaires et on va comparer ces résultats avec les résistances des réfractaires utilisées précédemment
- On va calculer le temps de rentabilité.

II. Historique du briquetage

1. Four

La virole est protégée intérieurement par un revêtement réfractaire, la qualité de ce réfractaire est adaptée tout au long du four à la température de manière à assurer :

- Une bonne isolation à fin de réduire les pertes calorifiques par les parois.
- Une protection thermique pour éviter les déformations trop importantes et donc la destruction de la virole aux températures élevées.

Dans cette partie on va identifier les différents type des briques et bétons utilisé dans le briquetage du Four 2. La figure 22 présente le plan de briquetage :

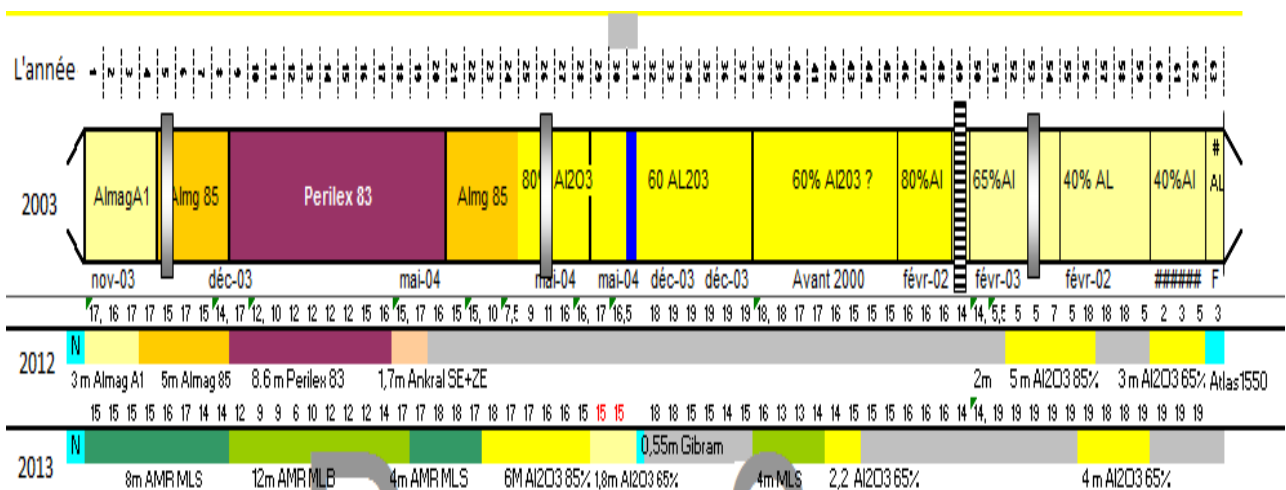


Figure 22: Plan de briquetage du four

1.1 Les caractéristiques des briques réfractaires

Les caractéristiques des briques réfractaires sont présentées sur le tableau 19 :

Tableau 19: Caractéristiques des briques

	Brique utilisé	Zone d'utilisation	Comportement
Les briques alumineuses (40 % -85%) en AL₂O₃	AL ((40 % -85%))	Zone de décarbonatation	*ils sont plus réfractaires quand le % d'alumine est élevé. * ont une porosité moyenne une conductibilité thermique faible. Elles sont relativement isolantes et se dilatent peu, avec une bonne tenue mécanique.
	Kronex 85(80% en AL)	Zone de sécurité	
Magnésie chrome (60 à 85 % de MgO) (4 à 15 %Cr₂O₃)	Perilex	Zone de Cuisson	*elles ont de bonnes tenues aux chocs thermiques et à l'abrasion. *Avec une porosité faible *Ils ont conductibilité thermique forte. *Elles sont très peu isolantes *Ils s'accrochent bien au croutage en fonction du type de brique. *elles se dilatent facilement
	MLB	Zone de cuisson	
Magnésie spinelle (88 % de MgO) (12% AL₂O₃)	Almag 85	Zone de transition aval Zone de transition amont	
	Almag A1/F1	Zone de transition aval	
	Ankral R2	Zone de transition ava	
	MLS	Zone de transition aval Zone de transition amont	

1.2 Calcul et comparaison des résistances thermiques

Pour éliminer les causes et arriver à une solution, on s'est confit a une comparaison des résistances thermiques des réfractaires tout le long du Four avec les résistances des années précédentes (voir annexe I). La figure 24 montre le suivie de la résistance thermique du four 2 :

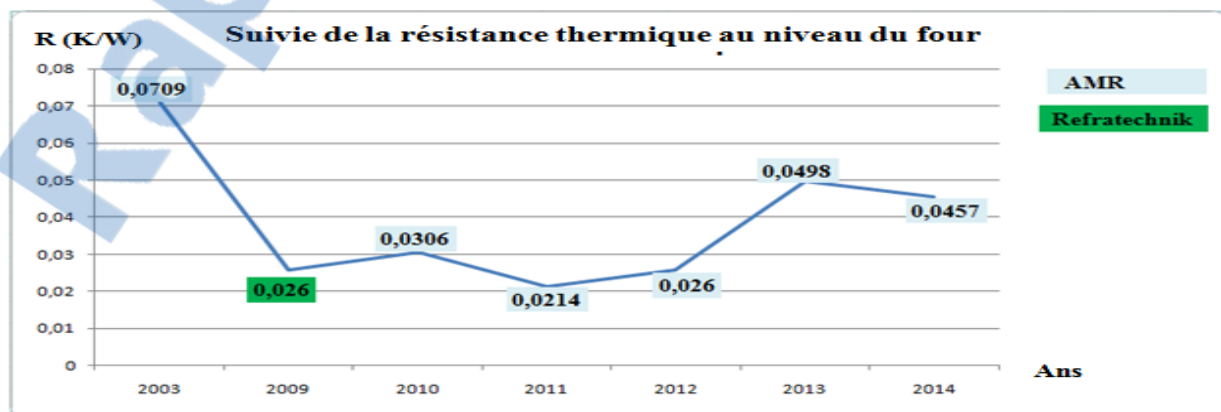


Figure 23 : Suivie de la résistance thermique du four 2

- On remarque que la résistance thermique du four en 2003 est meilleure par rapport à l'année 2014 (les pertes en 2003 est 50 kcal /kg kk, les pertes en 2014 est 87 kcal /kg kk).
- La chute très élevée de la résistance entre l'année 2003 à et 2009, cette chute est traduite par le changement du type de réfractaire utilisé pour le revêtement (changement de fournisseur ça veut dire changement dans la qualité des briques de l'AMR à Refratechnik)
- En 2013 la résistance du four a connu une hausse par rapport 2014 mais reste toujours faible si on le compare avec celle de 2003.
- Si on compare la résistance thermique en 2013 à celle de 2014 on n'observe que la résistance diminue. Cette diminution est expliquée par la substitution du brique de type ArmagA1 par béton 1550.
- Si on compare la résistance thermique en 2014 est celle de 2009 on n'observe que la résistance diminue. Cette diminution est expliquée par la substitution du brique de type PDZ70 par béton 1550.

2. La Tour de préchauffage

2.1 Calcul et comparaison des résistances thermiques

On peut pas menée une comparaison des résistances thermique au niveau de la tour, vue qu'il n'y avait pas un plan de briquetage et bétonnage détaillé pour qu'on puisse les calculés. On a juste les types des briques adopté dans la tour et il n'y a pas une répartition détail des briques (surface occupé par chaque type de brique ou la longueur de répartition).

Alors on se base sur une comparaison d'historique des pertes thermiques par parois de la tour entre l'année 2003 et 2014 comme le montre le tableau 20 :

Tableau 20: Historique des pertes

2003	2014
24 kcal/kg kk	31 kcal/kg kk

Pour précisé les éléments de la tour les plus concernés par cette étude on a calculé les pertes thermiques des éléments de la tour de préchauffage à partir de la fiche standard les résultats sont présenté dans la figure 25 :

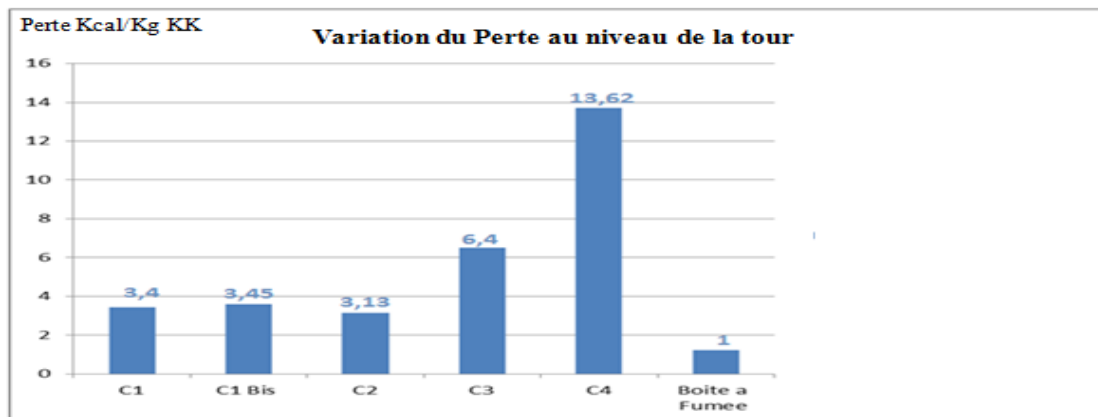


Figure 24 : Les pertes en kcal/kg kk

D'après la figure 25 on constate que les pertes au niveau de la boîte à fumer sont négligeables devant les pertes au niveau du cyclone.

III. Évaluations économiques du projet

1. Solution et proposition

D'après cette analyse on est abouti à une proposition de solution permettant de réduire ces pertes, et qui consiste à remplacer les briques AMR utilisée en 2014 par celles utilisées en 2003.

2. Étude économique pour le four

■ Quantité de brique

Pour une ranger on a besoin de 156 brique (2 brique clé pour la fermeture 77 brique de taille T1 et 77 brique de taille T2) comme le montre la figure 26 :

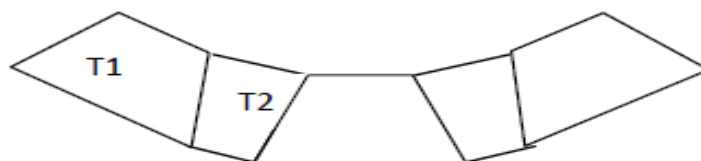


Figure 25 : Les différent taille du brique utilisée dans une ranger

Pour une longueur de 1 m on a besoin de 5 rangers de brique.

Alors le nombre de brique est : $5 \times 156 = 780$ de brique.

Les prix des briques de l'année 2003 et 2014 sont détaillés dans les tableaux 21 et 22 :

Tableau 21: Prix des briques 2003

2003				
Type Réfractaire	Métrage	Nombre de Brique	Prix Unit	Prix Totale

Almag A1	4	3120	136,15	424788
AMR-MLS	4	3120	114,26	356491,2
Perilex 83	12	9630	84,21	810950,4
Almag 85	4	3120	101,44	316492,8
AL 80%	7	5460	72,44	395522,4
AL 85%	10	7800	88,92	693576
AL 60%	12	9360	173,69	1625738,4
AL 65%	7	5460	173,70	948347,4
AL 40%	3	2340	173,70	406434,6
Béton 1550	1	780	11,13	8681,4
L'investissement		5987022,6 DH		

Tableau 22: Prix des briques 2014

2014				
Type Réfractaire	Métrage	Nombre de Brique	Prix Unit	Prix Totale
MLS	11	8580	114,2	980350,8
MLA	7	5460	103	562380
MLB	11	8580	111,47	956412,6
PDZ 70	6	4680	102	477360
Béton 1550	1	780	11,13	8681,4
AlmagA1	6	4680	136,45	638586
AL 65%	22	17160	91,1	1563276
L'investissement		5187046,8 DH		

L'investissement de changement des briques demande : **5987022,6 DH**

Si on compare se coût avec le coût d'investissement de l'année 2014 on aura une différence de :

$$5987022,6 - 5187046,8 = 799975,8 \text{ DH}$$

▪ Coût des pertes thermiques

Le calcul de coût des pertes thermiques au niveau du four est représenté dans le tableau 23:

Tableau 23 : Le Coût des pertes au niveau du four

Perte en 2003 (Kcal /Kg KK)	50
Perte en 2014 (Kcal /Kg KK)	87
Énergie minimisée (Kcal /Kg KK)	37
Production du ciment (t/J)	1143
Coût d'un 1 GJ d'énergie (DH)	42
Coût de 37 Kcal /Kg KK d'énergie thermique (DH/12 mois)	2672858,866

Le temps de retour est :

$$t = \frac{\text{Coût de l'investissement}}{\text{Économie projetée}} \longrightarrow t = \frac{799975,8}{2672858.866}$$

Le coût sera récupéré en : **2 ans et 5 mois**

3. Étude économique pour la tour

Les calculs des prix des briques de l'année 2003 et 2014 sont détaillés dans les tableaux 24 et 25 :

Tableau 24 : Prix de brique utilisée dans la tour en 2014

Type de briques	C1, C1 bis	C2	C3	C4	Gaine C1, C2	Gaine C2, C3	Gaine C4, Boîte à fumer	Prix Unit	Prix Totale
AL 40 %	5000	2780	2560	2000	3410	781	1911	2131	3573530,1
AL 80 %	412	413	515	780	0	0	0	0	153572,8
AL 85 %	196	0	118	413	0	0	0	0	64644,84
Alfran tix 35	1820	950	934	929	949	884	884	1050	135256,8
									3927004,5

Tableau 25 : Prix de brique utilisée dans la tour en 2003

Type de briques	C1, C1 bis	C2	C3	C4	Gaine C1, C2	Gaine C2, C3	Gaine C4, Boite à fumer	Prix Unit	Prix Totale
AL 40 %	5608	3193	3193	3193	3910	781	1911	2131	4068054
Kerlite 120 MP	780	250	250	250	949	884	884	1050	111237
C18 HR	320	175	175	175	0	0	0	0	15210
Gibram	200	180	180	180	0	0	0	0	12839
Ultracast KS 10	520	345	329	324	0	0	0	0	25806
									4233146

L'investissement de changement des briques demande : **4233146 DH.**

Si on compare ce coût avec le coût d'investissement de l'année 2014 on aura une différence de :

$$4233146 - 392704,54 = 3840441,46 \text{ DH}$$

▪ Coût des pertes thermiques

Le calcul de coût des pertes thermiques au niveau de la tour est représenté dans le tableau 26 :

Tableau 26 : Le coût des pertes au niveau de la tour

Perte en 2003 (Kcal /Kg KK)	24
Perte en 2014 (Kcal /Kg KK)	31
Énergie minimisée (Kcal /Kg KK)	7
Production du ciment (t/J)	1143
Coût d'un 1 GJ d'énergie (DH)	42
Coût de 37 Kcal /Kg KK d'énergie thermique (DH/12 mois)	505676,0016

Le temps de retour sera donc :

$$t = \frac{\text{Coûts de l'investissement}}{\text{Économie projetée}} \longrightarrow t = \frac{3840441,46}{505676,0016}$$

Le Coût sera récupéré en **7 mois**

Conclusion

Toute entreprise de cimenterie cherche à minimiser les pertes thermiques par parois afin d'optimiser la consommation calorifique. Au cours de mon stage j'ai l'occasion d'optimiser les pertes thermiques qui ont constitué ma mission de stage. Pour réussir cette mission, on a commencé par le calcul des surfaces de la ligne de cuisson puis les mesure de température et du vent ensuite on a calculé les pertes. Puis on a élaboré une analyse des causes par le diagramme d'Ishikawa ensuite on a mené une analyse Pareto pour déterminer les causes qui ont plus d'effet.

A l'étape d'optimisation nos efforts de recherches ont abouti aux propositions suivantes :

- ✚ Au niveau du four : la proposition de substitution des briques nous a permis de minimiser les pertes avec un taux de 37 kcal/kg KK, qui nous a permis un gain en énergie de **2672858.866 DH/12 mois** avec une rentabilité de 2 ans et 5 mois.
- ✚ Au niveau de la tour : la substitution des réfractaires nous a permis aussi de minimiser les pertes avec un taux de 7 Kcal/ kg dans la Tour .qui a permis à la société un gain de **505676,0016 DH /12 Mois**, avec une rentabilité de 7 mois.

