

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département de génie mécanique

Société des Ciments de Sour El Ghozlane SCSEG



SCSEG

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème

Analyse Énergétique de la Cimenterie de Sour El Ghozlane : Bilan
de la ligne de cuisson et solutions

Réalisé par :

M. Ahmed AYADI

M. Malik Hakim ELHAFIA

Dirigé par :

M. M. BENBRAIKA MA A

M. D. KARI Enseignant UMBB

Présenté et soutenu publiquement le 23/06/2018

Composition du Jury :

Président	M. A. SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur	M. M. BENBRAIKA	MA A	ENP
	M. D. KARI	Enseignant	UMBB
Examineur	M. B. BENKOUSSAS	Professeur	ENP
	M. S. LARBI	Professeur	ENP
Invités	M. H. BENNOUR	MA A	ENP
	M. N. MEFTAH	Ingénieur	SCSEG

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département de génie mécanique

Société des Ciments de Sour El Ghozlane SCSEG



SCSEG

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème

Analyse Énergétique de la Cimenterie de Sour El Ghozlane : Bilan
de la ligne de cuisson et solutions

Réalisé par :

M. Ahmed AYADI

M. Malik Hakim ELHAFIA

Dirigé par :

M. M. BENBRAIKA MA A

M. D. KARI Enseignant UMBB

Présenté et soutenu publiquement le 23/06/2018

Composition du Jury :

Président	M. A. SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur	M. M. BENBRAIKA	MA A	ENP
	M. D. KARI	Enseignant	UMBB
Examineur	M. B. BENKOUSSAS	Professeur	ENP
	M. S. LARBI	Professeur	ENP
Invités	M. H. BENNOUR	MA A	ENP
	M. N. MEFTAH	Ingénieur	SCSEG

ENP 2018

Dédicaces

*J*e dédie ce mémoire :

A mes parents bien aimés, pour leurs soutiens et leurs amours.

A mes frères, sœurs et à toute ma famille

A mon cher ami et binôme malik EL HAFIA

*A mon cher ami Rafid BENDIMERAD et à toute ma promotion de
'GM 2015-2018'*

A mes amis et à tous les gens qui m'aiment

Ahmed

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mes parents pour leur amour inconditionnel et inestimable, leurs sacrifices et leur soutien en continu dans tout ce que j'entreprends.

*A mon frère, ma sœur et la femme de mon frère
que je considère comme ma deuxième sœur !*

A mon ami et binôme Ahmed avec qui j'ai connu une aventure similaire aux montagnes russes, où il y a eu des hauts et des bas mais qui grâce à dieu s'est bien terminée.

A ma promotion avec qui j'ai passé 3 années inoubliables pleines de fous-rires et de moments de joies mais aussi des moments de travail intense avec d'innombrables soirées passées au département.

*A tous ceux que j'ai omis de citer mais qui comptent énormément
pour moi.*

Malik

REMERCEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce travail.

Nous remercions également toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

En commençant, en premier lieu, par remercier M. BENBRAIKA et M. KARI, de nous avoir fait l'honneur de nous encadrer. Nous tenons à les remercier pour tout le soutien qu'ils nous ont apporté, leur disponibilité, leurs conseils avisés et les connaissances qu'ils ont généreusement partagées avec nous afin de mener à bien ce présent travail.

Nos remerciements vont également aux employés de la cimenterie de Sour El Ghozlane pour toute l'aide qu'ils nous ont apportée et toutes les informations qu'ils nous ont donné : à M. DJELLALE Hamza pour nous avoir accueilli au sein de son département, à M. KENANE Mahmoud pour nous avoir aidé et fourni toutes les données nécessaires à notre travail, à M. MEFTAH Nabil pour son aide singulière et pour les précieux conseils qu'il nous a donnés qui se sont avérés payants.

De plus nous tenons aussi à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui nous ont aidé à faire aboutir ce projet. Nous tenons aussi à les remercier pour la formation de qualité qu'ils nous ont apportée.

Nos profondes gratitudes s'adressent à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement les ingénieurs de la cimenterie de Sour El Ghozlane pour leur soutien et toute l'aide qui nous ont apportée.

Nous remercions M. SMAILI pour avoir accepté de présider le jury, ainsi que M. BENKOUSSAS et M. LARBI pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Merci à vous tous.

ملخص

الهدف من هذا المشروع هو إجراء تحليل طاقي لنظام فرن مصنع إنتاج الإسمنت بسور الغزلان. أولاً أكد حساب الطاقة الحرارية النوعية للسنوات الأخيرة عن وجود خسائر معتبرة. قمنا بعد ذلك بإجراء موازنة طاوية لنظام الفرن وذلك بتحديد وحساب كل التدفقات الطاقوية الواردة والصادرة عن هذا النظام. إضافة إلى ذلك قمنا بتحديد المناطق التي كانت فيها خسائر الطاقة الحرارية أكثر. في الأخير قمنا بملخص للمشاكل الرئيسية المتعلقة بالاستهلاك المفرط للطاقة الحرارية بـإبراز النقاط المختلفة التي يجب معالجتها مع تقديم الحلول لتحسين الفعالية الطاقوية.

الكلمات الدالة : نظام الفرن، مصنع إسمنت سور الغزلان، الطاقة الحرارية النوعية، توازن الطاقة، الخسائر الحرارية، الفعالية الطاقوية.

Abstract

The aim of this work is to perform an energy analysis of the kiln system of Sour El Ghozlane cement plant. Firstly, the calculation of the specific thermal consumption for the last years has confirmed the existence of considerable losses. After that, we made the energy balance of the kiln system by identifying and quantifying the different incoming and outgoing flows. We have also located the areas where the heat losses were most important. Finally, we did a summary of the main problematics related to the overconsumption of heat while highlighting the different points that need to be addressed. We also recommended solutions to improve the energy efficiency of the cement plant.

Keys words : kiln system, Sour El Ghozlane cement plant, specific thermal consumption, energy balance, heat losses, energy efficiency.

Résumé

Le but de ce présent travail est de faire une analyse énergétique de la ligne de cuisson de la cimenterie de Sour El Ghozlane. D'abord, le calcul de la consommation spécifique thermique pour les dernières années a permis de confirmer l'existence de pertes considérables. Après cela, on a effectué le bilan énergétique de la ligne en définissant et en quantifiant les différents flux entrants et sortants. Nous avons également localisé les zones où les dissipations de chaleur étaient les plus importantes. On a terminé par un récapitulatif sur les principaux problèmes liés à la surconsommation calorifique en mettant en évidence les différents points sur lesquels il faut intervenir. Nous avons aussi recommandé des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique de la cimenterie.

Mots clés : ligne de cuisson, cimenterie de Sour El Ghozlane, consommation spécifique thermique, bilan énergétique, dissipation de chaleur, efficacité énergétique

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE	17
Chapitre 1 Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment	19
1.1 Introduction	20
1.2 Présentation du Groupe GICA	20
1.2.1 Missions du Groupe GICA	20
1.2.2 Historique du Groupe GICA	21
1.2.3 Filiales du groupe	22
1.2.4 GICA et le développement durable	22
1.3 Présentation de la cimenterie de Sour El Ghozlane	23
1.3.1 Situation géographique de SCSEG	24
1.3.2 Dates importantes	24
1.3.3 Assise territoriale	24
1.4 Généralités sur les cimenteries	25
1.5 Le ciment	26
1.5.1 Définition	26
1.5.2 Matières premières du ciment	26
1.5.2.1 Matières premières de base	26
1.5.2.2 Matières premières secondaires	27
1.6 Processus de fabrication du ciment de la SCSEG	27
1.6.1 Extraction des matières premières	28
1.6.2 Concassage et préhomogénéisation des matières premières	29
1.6.3 Broyage et homogénéisation de la farine crue	30
1.6.4 Cuisson de la farine crue	31
1.6.5 Broyage du clinker et des ajouts	33
1.6.6 Ensachage et expédition du ciment	33

1.7 Type de ciment fabriqué	33
Chapitre 2 Analyse des consommations énergétiques	35
2.1 Introduction	36
2.2 Historique de la consommation électrique	37
2.2.1 Introduction	37
2.2.2 Consommation d'énergie électrique par atelier	37
2.2.2.1 Atelier broyage cru	37
2.2.2.2 Atelier four	38
2.2.2.3 Atelier broyage ciment	39
2.2.3 Consommation électrique spécifique	40
2.2.4 Consommation électrique spécifique par atelier	41
2.3 Historique de la consommation thermique	42
2.3.1 Introduction	42
2.3.2 Consommation thermique spécifique	43
2.4 Consommation totale d'énergie	45
2.6 Conclusion	46
Chapitre 3 Description de la ligne de cuisson	47
3.1 Introduction	48
3.2 Définition de la ligne de cuisson de la SCSEG	48
3.3 Echangeur à cyclones	49
3.3.1 Description du procédé dans l'échangeur à cyclones	50
3.4 Four rotatif	51
3.3.1 Description du procédé dans le four rotatif	52
3.5 Refroidisseur à ballonnets	53
3.5.1 Description du procédé dans les ballonnets	55
Chapitre 4 Bilan énergétique de la ligne de cuisson	56
4.1 Introduction :	57
4.2 Partie théorique	58
4.2.1 Principe du bilan énergétique :	58

4.2.2	Volume de contrôle de la ligne de cuisson	59
4.2.3	Lois des mélanges	60
4.3	Partie mesures	61
4.3.1	Définition de la période du bilan	61
4.3.2	Mesures de paramètres du bilan	61
4.3.2.1	Paramètres du combustible	62
4.3.2.2	Paramètres de la farine	62
4.3.2.3	Paramètres de l'air théorique	63
4.3.2.4	Paramètres de l'air faux et excès d'air	63
4.3.2.5	Paramètres du clinker	64
4.3.2.6	Paramètre de poussières	64
4.3.2.7	Paramètres de fumées	65
4.4	Bilan massique	66
4.4.1	Détermination de la quantité d'air théorique	66
4.4.2	Détermination du débit de fumées et du débit d'air faux et excès d'air	67
4.4.3	Résultats bilan massique	69
4.5	Calcul des enthalpies totales	70
4.5.1	Calcul de l'enthalpie totale du combustible	70
4.5.2	Calcul de l'enthalpie totale de la farine	71
4.5.3	Calcul de l'enthalpie totale de l'air théorique	72
4.5.4	Calcul de l'enthalpie totale de l'air faux et excès d'air	72
4.5.5	Calcul de l'enthalpie totale du clinker	73
4.5.6	Calcul de l'enthalpie totale de la poussière	74
4.5.7	Calcul de l'enthalpie totale de la fumée	74
4.6	Résultats et analyse	75
4.6.1	Résultats du bilan énergétique	75
4.6.2	Quantification des pertes	76
4.6.3	Répartition de l'énergie fournie au système	77
4.6.4	Estimation de l'énergie perdue à cause des airs faux	78
4.7	Problématiques environnementales	79
4.7.1	Introduction	79
4.7.2	Gaz à effet de serre	79
4.7.3	Protocole de Kyoto	79
4.7.4	Émissions de la cimenterie	80

4.7.4.1 Émissions d'oxydes d'azote	80
4.7.4.2 Émissions de dioxyde de soufre	80
4.7.4.3 Émissions de CO	80
4.7.4.4 Émissions de particules (poussière)	80
4.7.4.5 Emissions de CO2 dans les cimenteries :	81
4.7.5 Composition des fumées émises par la cimenterie SCSEG	81
4.7.6 Actions pour réduire les émissions	83
4.7 Conclusion	83
Chapitre 5 Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson	84
5.1 Introduction	85
5.2 Partie théorique	85
5.2.1 Calcul du taux de chaleur dissipé	87
5.2.2 Calcul du taux de chaleur dissipé par convection « Q_{cv} »	87
5.2.2.1 Calcul du coefficient d'échange convectif « h_{cv} »	87
5.2.2.2 Coefficient d'échange convectif du four et des ballonnets	88
5.2.2.3 Coefficient d'échange convectif des cyclones de la tour de préchauffage	89
5.2.3 Calcul du taux de chaleur dissipé par rayonnement	90
5.3 Partie mesure	91
5.3.1 Profil de température sur la virole du four et des ballonnets	91
5.3.2 Profil de température sur la virole des cyclones	92
5.4 Partie calcul	93
5.4.1 Pertes des ballonnets	93
5.4.2 Pertes du four	94
5.4.3 Pertes des cyclones de la tour de préchauffage	96
5.3 Analyses des résultats	97
5.4 Conclusion	98
Chapitre 6 Recommandations aux problèmes trouvés	99
6.1 Introduction	100
6.2 Causes d'arrêts de la ligne de cuisson	100
6.3 Localisation des problèmes de la ligne de cuisson et recommandations	101
6.3.1 Problèmes liés au refroidisseur	101

6.3.2	Recommandation pour le refroidisseur	102
6.3.2.1	Installation d'un refroidisseur à grilles	102
6.3.2.2	Améliorations à apporter sur les ballonnets	103
6.3.3	Problèmes liés au four	104
6.3.4	Recommandation pour le four	104
6.3.5	Problèmes liés à la tour de préchauffage	104
6.3.6	Recommandation pour les cyclones	104
6.3.7	Problèmes liés aux airs faux	105
6.3.8	Recommandation pour les airs faux	105
6.4	Récupération de chaleur perdue dans les gaz de fumée	106
6.4.1	Systèmes de récupération de chaleur dans les cimenteries modernes	106
6.4.2	Estimation de l'énergie récupérable de la SCSEG	108
6.5	Conclusion	110
	CONCLUSION GENERALE	111
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113
	ANNEXES	115
	Annexe A : historique des données de marche pour 30/04/2018	115
	Annexe B : calcul des chaleurs spécifiques	116
	Annexe C : Schéma de la tour de préchauffage	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier broyage cru [6]	37
Tableau 2. 2 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier four [6]	38
Tableau 2. 3 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier broyage ciment [6]	39
Tableau 2. 4 Consommation électrique spécifique de la SCSEG des 5 dernières années	40
Tableau 2. 5 Consommation électrique et spécifique par atelier pour l'année 2017	41
Tableau 2. 6 Consommation thermique spécifique des 5 dernières années	44
Tableau 2. 7 Surconsommations pour les années 2015, 2016 et 2017	45
Tableau 2. 8 Consommation d'énergie totale depuis 2013	45
Tableau 3. 1 Caractéristiques des cyclones de la tour de préchauffage de la SCSEG [6]	50
Tableau 3. 2 Caractéristiques du four de la SCSEG [6]	53
Tableau 3. 3 Caractéristiques du refroidisseur de la SCSEG [6]	55
Tableau 4. 1 Paramètres de marche le jour du bilan	61
Tableau 4. 2 Conditions atmosphériques	61
Tableau 4. 3 Paramètres du gaz naturel	62
Tableau 4. 4 Paramètres de la faine	62
Tableau 4. 5 Paramètres de l'air théorique	63
Tableau 4. 6 Paramètres de l'air faux et excès d'air	63
Tableau 4. 7 Paramètres du clinker	64
Tableau 4. 8 Paramètres de poussières	64
Tableau 4. 9 Paramètres des fumées	65
Tableau 4. 10 Paramètres de l'air théorique de combustion	67
Tableau 4. 11 Paramètres des fumées et d'air faux et excès d'air	69
Tableau 4. 12 Bilan massique de la ligne de cuisson	69
Tableau 4. 13 Composition chimique du gaz naturel Algérien	70
Tableau 4. 14 Calcul de l'enthalpie totale du gaz	71
Tableau 4. 15 Composition chimique de la farine	71
Tableau 4. 16 Calcul de l'enthalpie totale de la farine	72
Tableau 4. 17 Calcul de l'enthalpie totale de l'air théorique	72
Tableau 4. 18 Calcul de l'enthalpie totale de l'air faux et excès d'air	72
Tableau 4. 19 Composition chimique du clinker	73
Tableau 4. 20 Calcul de l'enthalpie totale du clinker	73
Tableau 4. 21 Calcul de l'enthalpie totale de la poussière	74
Tableau 4. 22 Calcul de l'enthalpie totale de la fumée	74
Tableau 4. 23 Bilan énergétique de la ligne de cuisson	75
Tableau 4. 24 Déperditions thermiques lors des années précédentes	76
Tableau 4. 25 Equivalent des déperditions de chaleur en argent (DA)	76
Tableau 4. 26 Taux d'énergie entrants et sortants de la ligne de cuisson	77
Tableau 4. 27 Estimation de l'énergie perdue par air faux	78
Tableau 4. 28 Composition de fumées émises par le four de la cimenterie SCSEG	81
Tableau 5. 1 Température de l'air et du ciel pour du 30/04/2018 à la SCSEG	93
Tableau 5. 2 Chaleur moyenne dissipée par un seul ballonnet	93
Tableau 5. 3 Chaleur dissipée par tous les ballonnets	94
Tableau 5. 4 Chaleur dissipée à travers la longueur du four	95
Tableau 5. 5 Chaleur dissipée à travers les cyclones de la tour de préchauffage	96
Tableau 5. 6 Répartition des déperditions thermiques dans la ligne de cuisson	97

Tableau 6. 1 Durées des arrêts imprévus de la ligne de cuisson	100
Tableau 6. 2 Comparaison entre le refroidisseur à grilles et à ballonnets [11]	102
Tableau 6. 3 Comparaison entre les différents cycles de Rankine [1]	107
Tableau 6. 4 Potentiel d'énergie utilisable si l'on refroidi les gaz de fumée jusqu'à 150 °C	109
Tableau 6. 5 Potentiel d'énergie récupérable pour le premier trimestre de 2018	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 Configuration du GROUPE GICA [4].....	22
Figure 1. 2 Cimenterie de Sour El Ghozlane	23
Figure 1. 3 Vue satellite de la SCSEG	25
Figure 1. 4 Les composants du ciment	26
Figure 1. 5 Procédé de la fabrication du ciment de la voie sèche	28
Figure 1. 6 Extraction du calcaire au niveau d'une carrière.....	28
Figure 1. 7 Préhomogénéisation du calcaire par pont gratteur	29
Figure 1. 8 Préhomogénéisation du sable par gratteur à portique	29
Figure 1. 9 Broyeur à boulets de l'atelier broyage cru de la SCSEG.....	30
Figure 1. 10 Tour de préchauffage de la SCSEG	31
Figure 1. 11 Four rotatif de la SCSEG	31
Figure 1. 12 Silos de clinker de la SCSEG	32
Figure 2. 1 Plaque signalétique du moteur « atelier broyage cru »	38
Figure 2. 2 Plaque signalétique du ventilateur « atelier broyage cru »	38
Figure 2. 3 Plaque signalétique du moteur « atelier four »	38
Figure 2. 4 Plaque signalétique du ventilateur « atelier four ».....	38
Figure 2. 5 Plaque signalétique du ventilateur « atelier broyage ciment »	39
Figure 2. 6 Consommation électrique spécifique annuelle entre 2013 et 2017	40
Figure 2. 7 Consommation électrique par atelier pour l'année 2017	42
Figure 2. 8 Standards des consommations thermique spécifique [1].....	43
Figure 2. 9 Consommation thermique spécifique par tonne de clinker produit depuis 2013... 44	44
Figure 2. 10 Répartition de la consommation d'énergie totale	46
Figure 3. 1 Les cinq opérations principales de cuisson du clinker.....	48
Figure 3. 2 Ligne d'un préchauffeur à 4 étages de cyclones [9]	49
Figure 3. 3 La couronne d'entraînement et une station de roulement du four de la SCSEG ... 51	51
Figure 3. 4 Usure non uniforme d'un galet de support du four de la SCSEG.....	51
Figure 3. 5 Coupe transversale d'un four rotatif [10]	52
Figure 3. 6 Refroidisseur à ballonnets de la SCSEG.....	53
Figure 3. 7 Schéma du refroidisseur à ballonnets (Constructeur FLSmidth) [11]	54
Figure 3. 8 Portion briquetée du ballonnet	54
Figure 4. 1 Schéma représentatif du volume de contrôle de la ligne de cuisson [14].....	59
Figure 4. 2 Pyromètre "ULTIMAX"	62
Figure 4. 3 Mesure de température du clinker	64
Figure 4. 4 Thermomètre.....	64
Figure 4. 5 Bilan massique de la ligne de cuisson.....	70
Figure 4. 6 Equivalent des déperditions en argent (DA).....	76
Figure 4. 7 Représentation du bilan énergétique par le diagramme de Sankey	78
Figure 4. 8 Bilan massique de la ligne de cuisson pour une tonne de clinker.....	82
Figure 4. 9 Emission de CO2 par source.....	82
Figure 5. 1 Distributions de températures dans des murs accolés à faces non isothermes	85
Figure 5. 2 Représentation des briques réfractaires et du croutage à l'intérieur du four [12].. 86	86
Figure 5. 3 Dissipation de chaleur à travers la paroi du four	87
Figure 5. 4 Cyclone du 3ème étage de la tour de préchauffage (voir Annexe C)	90
Figure 5. 5 Profil de température Moyenne de la surface du four et des ballonnets.....	91
Figure 5. 6 Caméra thermique FLUKE TI125	92

Figure 5. 7 Profil de température de la partie conique du cyclone 51B	92
Figure 5. 8 Profil de température de la partie conique du cyclone 52A.....	93
Figure 5. 9 Profil de température de la partie cylindrique du cyclone 53B	93
Figure 5. 10 Chaleur dissipée par unité de longueur pour les 3 zones de ballonnets.....	94
Figure 5. 11 Chaleur dissipée par unité de longueur pour chaque zone du four	95
Figure 5. 12 Répartition des pertes thermiques dans la tour de préchauffage.....	97
Figure 5. 13 Répartition des pertes thermiques sur les 3 parties de la ligne de cuisson	98
Figure 6. 1 Répartition des durées des arrêts selon la cause pour l'année 2017	101
Figure 6. 2 Répartition des refroidisseurs en France et en Europe de l'ouest [11]	102
Figure 6. 3 Refroidisseur à grilles [11].....	103
Figure 6. 4 Différents flux d'air dans le refroidisseur à grilles.....	103
Figure 6. 5 Porte visite d'un cyclone de la tour de préchauffage.....	105
Figure 6. 6 Joint amont du four rotatif	105

NOMENCLATURE

Liste des symboles

\dot{E}_e	: Taux d'énergie totale entrante [W]	\overline{Nu}	: Nombre de Nusselt moyen
\dot{E}_s	: Taux d'énergie totale sortante [W]	Re	: Nombre de Reynolds
\dot{q}	: Taux de chaleur dissipé vers l'extérieur [W]	Ri	: Nombre Richardson
\dot{w}	: Puissance fourni pour faire tourner le four [W]	Gr	: Nombre de Grashof
\dot{m}	: Débit massique [Kg/s]	Pr	: Nombre de Prandtl
\dot{V}	: Débit volumique [m ³ /s]	Ra	: Nombre de Rayleigh
h	: Enthalpie totale [KJ/Kg]	D	: Diamètre extérieur du cylindre [m]
h_f^0	: Enthalpie de formation [KJ/Kg]	L	: Longueur du cylindre [m]
C_p	: Chaleur spécifique [KJ/Kg.K]	V	: Vitesse d'écoulement de l'air [m/s]
T	: Température [K]	λ	: Conductivité thermique [W/m.K]
x_i	: Fraction molaire	g	: Accélération de la pesanteur [m/s ²]
n	: Nombre de moles [moles]	β	: Coefficient d'expansion thermique [1/K]
mf_i	: Fraction massique	ν	: Viscosité cinématique [m ² /s]
M	: Masse molaire [kg/kmole]	μ	: Viscosité dynamique [kg/m.s]
ρ	: Masse volumique [kg/m ³]	T_s	: Température de la surface extérieure [K]
R	: Constante des gaz parfaits [J/mole.K]	T_∞	: Température de l'air ambiant [K]
\dot{q}_{cv}	: Taux de chaleur dissipé par convection [W]	T_f	: Température du film [K]
\dot{q}_r	: Taux de chaleur dissipé par rayonnement [W]	ε	: Emissivité de la surface extérieure
S	: Surface d'échange [m ²]	σ	: Constante de Stephan Boltzmann [W/m ² .k ⁴]
h_{cv}	: Le coefficient d'échange convectif [W/m ² .K]	h_r	: Coefficient d'échange radiatif [W/m ² .k]
$\overline{h_{cv}}$: Le coefficient d'échange convectif moyen [W/m ² .K]	\dot{q}	: Déperdition spécifique [J/ kg de clinker]

Abréviations

IEA	:	International Energy Agency
SCSEG	:	Société des Ciments de Sour El Ghozlane
CES	:	Consommation électrique spécifique [<i>kWh/t.ciment</i>]
CTS	:	Consommation thermique spécifique [<i>GJ/t.clinker</i>]
PCI	:	Pouvoir calorifique inférieur [<i>KJ/Kg</i>]
PCS	:	Pouvoir calorifique supérieur [<i>KJ/Kg</i>]
Indices		
<i>e</i>	:	Entrée du volume de control
<i>s</i>	:	Sortie du volume de control
<i>fum, th</i>	:	Fumées sans considération d'excès d'air et d'air faux
<i>gaz</i>	:	Gaz
<i>far</i>	:	Farine crue
<i>air, th</i>	:	Air théorique
<i>air, ef</i>	:	Excès d'air et air faux
<i>ck</i>	:	Clinker
<i>fum</i>	:	Fumées
<i>pous</i>	:	Poussières

Formules chimiques

SiO_2	:	Le dioxyde de silicium
Al_2O_3	:	L'alumine ou oxyde d'aluminium
Fe_2O_3	:	Oxyde de fer
$CaCO_3$:	Carbonate de calcium
$MgCO_3$:	Carbonate de magnésium
CaO	:	La chaux ou l'oxyde de calcium
MgO	:	L'oxyde de magnésium
CH_4	:	Le méthane
C_2H_6	:	L'éthane
C_3H_8	:	Le propane
C_4H_{10}	:	Le butane
N_2	:	Le diazote

INTRODUCTION GENERALE

Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé au monde. C'est le liant hydraulique qui, mélangé avec des granulats (sable, gravier, etc.) et l'eau, forme le béton. Plus de trois tonnes de béton sont produites chaque année par personne pour l'ensemble de la population mondiale, ce qui en fait le produit manufacturé le plus utilisé dans le monde. [1]

calorifique et électrique. En 2016, l'IEA estime que le secteur du ciment a consommé 10.5 EJ d'énergie, ce qui est l'équivalent de presque 251 millions de TEP. Pour cette même année où la production mondiale de ciment était de 4150 millions de tonnes, la consommation thermique spécifique (CTS) moyenne était de 3.4 GJ/tonne de clinker et la consommation électrique spécifique (CES) moyenne était de 91 kWh/ tonne de ciment. L'industrie cimentière est aussi fortement émettrice de dioxyde de carbone, provenant des besoins énergétiques, mais aussi du procédé de fabrication du ciment. Pour 2016, l'IEA estime que les émissions mondiales globales du CO₂ étaient de 2.2 Gt. [2]

Les cimenteries du groupe GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie) ont consommé plus de 1 140 562 TEP d'énergies électrique et gazière lors de l'année 2016. La CTS moyenne était de 4.23 GJ/tonne de clinker et la CES moyenne était de 121 kWh/ tonne de ciment. [3]

En comparant les chiffres des consommations spécifiques thermique et électrique de la GICA avec les chiffres mondiaux, on constate qu'il y a un écart considérable qui se traduit par d'importantes pertes financières. Face à une hausse tendancielle du prix de l'énergie et en tenant compte des objectifs de la GICA, qui vise à l'amélioration des taux de capacités de ses installations et à un positionnement sur l'exportation, la GICA doit anticiper et investir dans l'efficacité énergétique afin de gagner en compétitivité.

Etant très intéressé par les problématiques énergétiques et environnementales et ayant conscience de leurs impacts socioéconomique, nous nous sommes intéressés au cas de la cimenterie de Sour El Ghozlane. Cette cimenterie a été réalisé en 1979 par le constructeur danois FLSmidth avec une technologie qui est en retard par rapport à celle des cimenteries modernes.

C'est dans ce contexte qu'on a voulu faire une analyse énergétique, où on a plus particulièrement traité les problèmes liés à la consommation thermique, en mettant en évidence les points sur lesquels il faut intervenir. On a aussi voulu souligner les émissions excessives de dioxyde de carbone, dues aux activités de la cimenterie.

L'objectif de ce travail, est de faire une analyse énergétique de la ligne de cuisson dans le but de quantifier et de localiser les déperditions thermiques et d'illustrer les imperfections énergétiques. A travers cette analyse, on voudrait trouver les pistes permettant l'optimisation de la consommation calorifiques et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Le présent document est structuré de la manière suivante :

Tout d'abord, nous présenterons dans le premier chapitre, l'organisme GICA et la SCSEG où notre stage de fin d'études s'est effectué. Nous introduirons ensuite quelques généralités sur le ciment, et nous parlerons des principales étapes du processus de fabrication du ciment dans la cimenterie de Sour El Ghozlane.

Dans le deuxième chapitre, on fera une analyse des principaux indicateurs énergétiques de la cimenterie qui sont les consommations spécifiques thermiques et électriques et on les comparera avec les standards internationaux.

Ensuite dans le chapitre trois, on décrira en détail la ligne de cuisson qui est considérée comme la zone la plus énergivore de toute la cimenterie et sur laquelle notre étude s'est principalement basée.

Le chapitre quatre sera consacré au bilan énergétique de la ligne de cuisson. L'objectif de ce chapitre sera de déterminer tous les flux d'énergie entrants et sortants de l'atelier de cuisson afin de pouvoir quantifier les déperditions thermiques et le potentiel de récupération chaleur dans les gaz de fumées. On parlera aussi des problèmes environnementaux liés aux émissions de la cimenterie.

Dans le chapitre cinq on va essayer de localiser les secteurs de la ligne de cuisson où les déperditions thermiques sont les plus importantes.

Finalement, dans le dernier chapitre on proposera des solutions et des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de la ligne de cuisson de la SCSEG.

Et nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1

Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

1.1 Introduction

Situées en amont des secteurs du BTPH (bâtiment travaux public et hydraulique), les entreprises du portefeuille GICA en tant que pourvoyeuses de matières de base, capitalisent une technicité avérée et détiennent un vivier de compétences appréciables, qui constituent un atout de taille pour un domaine à très forte valeur capitalistique.

Conjugué à la richesse du sous-sol algérien très prometteur en calcaire, gypse, agrégats, minerais de fer et pouzzolane, ces mêmes entreprises, deviennent l'instrument par excellence pour la création de richesse et de la croissance durable.

Dans ce qui suit nous allons introduire la GICA, nous allons parler de ces différentes activités et de ces différentes filiales. Nous présenterons ensuite la cimenterie de Sour El Ghozlane. [4]

1.2 Présentation du Groupe GICA

Le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie "Groupe GICA" a été créé par décision de l'Assemblée Générale Extraordinaire, suite à la transformation juridique de l'ex Société de Gestion des participations « Industrie des Ciments » le 26 novembre 2009. Le "Groupe GICA", est une société par actions au capital de : 25.358.000.000 dinars. [4]

1.2.1 Missions du Groupe GICA

Les domaines et champs d'activité découlant pour l'essentiel des missions et prérogatives du Groupe GICA, se résument à ce qui suit : [4]

- La conception de la stratégie de développement du groupe en matière industrielle, commerciale, financière et ressources humaines des activités des ciments, granulats et béton prêt à l'emploi.
- L'élaboration et le suivi de plans (d'actions, recherches, et allocations financières...), afférents à la mise en œuvre de cette stratégie et assurer leurs actualisations le cas échéant.
- La gestion et la fructification du portefeuille d'actions et des participations détenues sur les entreprises affiliées.
- La promotion et le développement des activités dans le cadre des partenariats.
- La mise en œuvre de toutes les mesures appropriées, visant l'expansion du groupe.
- L'insertion harmonieuse de son activité dans le cadre de la protection de l'environnement et de la valorisation des ressources nationales.

Le groupe détient à ce titre, une triple vocation : Industrielle, économique et financière, à travers, notamment, le pilotage, le suivi et le contrôle des actions liées, entre autres, aux programmes d'intérêt public, telles que : [4]

- L'approvisionnement régulier en ciment, destiné notamment aux projets structurants.
- Le développement durable.
- La participation aux actions de solidarité nationale, en cas de besoin.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

1.2.2 Historique du Groupe GICA

L'évolution de l'industrie cimentière est passée par plusieurs étapes dont les plus importantes demeurent : [4]

- **La période entre 1962 et 1967**

Période marquée par la nationalisation et la création de la Société nationale des matériaux de construction (SNMC). Avant sa fermeture en 1972 pour rénovation, la cimenterie de Meftah produisait 50.000 t/an, celle de Zahana : 200.000 t/an et Raïs Hamidou : 400.000 t/an. Durant cette période, la gestion demeurait entre les mains du propriétaire (Lafarge) et ce jusqu'en 1967 date à laquelle fut décrétée la nationalisation et la création de la Société nationale des matériaux de construction « SNMC », qui en plus du ciment récupéra également les produits rouges et le béton ainsi que la céramique et les agrégats.

- **La Période entre 1967 et 1983 :**

Cette période a connu la restructuration de la Société de matériaux de construction (SNMC). La SNMC engagea un vaste programme d'investissement pour la rénovation des lignes héritées de Lafarge et la réalisation de 12 nouvelles lignes de production en voie sèche, procédé plus moderne que celui de la voie humide. La capacité globale est passée alors à 10.000.000 t/an.

- **La période entre 1983 à 2009 :**

Cette période a vu le lancement de deux nouvelles lignes à Aïn Touta (Batna) et Elma Labiod (Tébessa), portant la capacité productive à 11.5 millions de tonnes /an.

Durant cette période le secteur est passé par plusieurs phases de réorganisation dont les principales sont :

- **1983 :** La SNMC fut réorganisée par secteurs d'activité et la filière ciment éclatée en 4 entreprises à raison d'une entreprise par région : Ouest – Chlef – Centre – Est.
- **1996 :** Mise en place des holdings publics en remplacement des fonds de participation. Les sociétés de ciment ont alors été mises dans le portefeuille du Holding (BMC) Bâtiment et Matériaux de construction.
- **1997 :** Lancement, par le holding Bâtiment et matériaux de construction, d'un vaste programme de désengagement de l'Etat des unités de production,
- **1998 :** Transformation juridique des unités de production en société par actions, filiales des groupes régionaux (ERCE, ERCC, ECDE et ERCO).
- **2002 :** Mise en place des sociétés de gestion des participations en remplacement des holdings et mise en œuvre de la privatisation des EPE. La SGP GICA « Industrie des Ciments » a hérité, des quatre groupes régionaux et leurs filiales.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

- **2009** : Création du Groupe industriel des ciments d'Algérie « GICA », sous forme de Société par actions au capital de 25.358.000.000 DA, avec la vocation de la gestion du portefeuille de 23 filiales et 02 prises de participations.

1.2.3 Filiales du groupe

Le groupe GICA est la société mère de 23 filiales : [4]

- 12 cimenteries et 2 projets de construction de cimenterie.
- 3 sociétés de granulats et de sable concassé.
- 1 société de distribution des matériaux de construction
- 2 sociétés de maintenance
- 1 centre d'études technologiques
- 1 centre de formation
- 1 société de gardiennage et de sécurité

Le schéma résumant les activités du groupe est représenté ci-dessous :

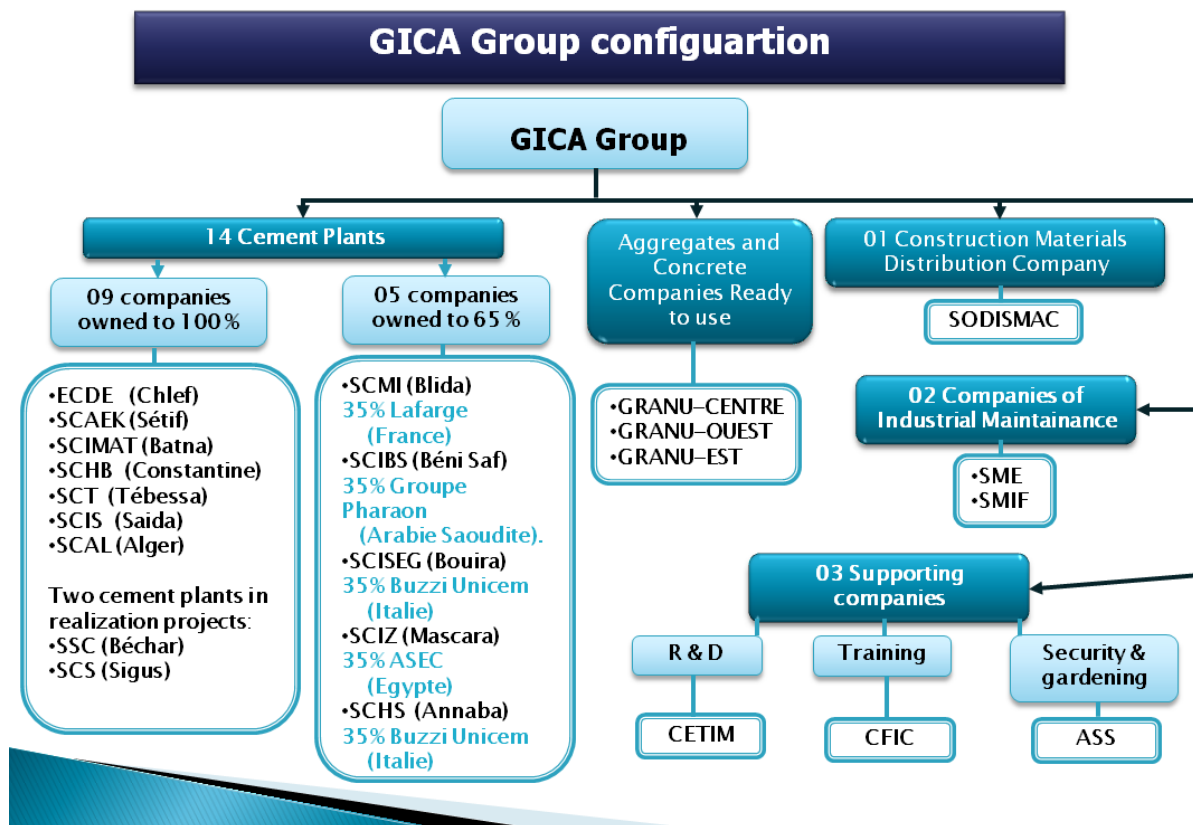


Figure 1. 1 Configuration du GROUPE GICA [4]

1.2.4 GICA et le développement durable

Au plan de l'environnement, la gestion des rejets, l'élimination des poussières, la remise en état des carrières et la réduction des consommations énergétiques constitueront, les principales priorités du groupe.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Pour ce faire, le groupe GICA, a identifié les actions pour concilier les exigences du développement industriel de la filière ciment avec ceux du développement durable. Ces actions portent sur :

- Accord avec l'APRUE pour la réalisation d'économie d'énergie et sa mise en œuvre via des contrats d'exécution avec les cimenteries du groupe.
- Réduction de la consommation d'eau industrielle par la remise en état des stations de traitement des eaux, installées au niveau des usines,
- Respect des normes environnementales par la poursuite du programme de remplacement des électro-filtres par des filtres à manches.
- Réaménagement des carrières dont le but est de valoriser le site exploité sur les plans paysager et environnemental.
- Faire certifier l'ensemble des filiales de production aux différentes normes ISO, ainsi que la certification des produits fabriqués.

1.3 Présentation de la cimenterie de Sour El Ghozlane



Figure 1. 2 Cimenterie de Sour El Ghozlane

La société des ciments de Sour El Ghozlane est une SPA dont 65 % des actions sont détenues par le groupe GICA et 35 % des actions sont détenues par le groupe italien Buzzi Unicem. Filiale du groupe GICA, la cimenterie a été construite par F.L. Smith Danemark.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Son capital s'élève à 1 900 000 000 DA, le chiffre d'affaires est de 4 429 615 310 DA avec un effectif en 2018 de 360 employés.

La SCSEG a été créée en 1979 suite à la restructuration de la société nationale des matériaux de construction. L'usine a été mise en production le 20/10/1983 avec une capacité nominale de 3000 tonnes de clinker /jour et de 1 000 000 de tonnes de ciment par année.

1.3.1 Situation géographique de SCSEG

La cimenterie est située au nord de la ville de Sour El Ghozlane, elle occupe une place stratégique en se situant à 7 km de la ville de Sour El Ghozlane, à 25 km de la gare des chemins de fer de Bouira (chef-lieu de wilaya) et à 134 km du port d'Alger.

Implantée à côté de la route de wilaya N° 27, cette position lui permet de jouer un rôle économique très important dans la région centre du pays. Elle assure aussi la satisfaction des besoins en ciment de plusieurs wilayas :

- Au nord : Alger, Médéa, Tizi ousou, Bejaia.
- Au centre : Djelfa, Laghouat, Msila.
- Au sud : Ghardaïa, Tamanrasset, Ouargla.

1.3.2 Dates importantes

- Signature du contrat le 26/11/1979
- Mise en vigueur du contrat le 26/02/1980
- Ouverture du chantier le 26/08/1980
- Première production de clinker le 25/09/1983
- Première production de ciment le 20/10/1983
- Premier sac expédié le 05/11/1983
- Réception provisoire le 26/02/1984
- Réception performance le 26/08/1984
- Réception définitive le 20/02/1986
- Partenariat avec les italiens de Buzzi Unicem en 2008
- Filiale du groupe GICA en 2009

1.3.3 Assise territoriale

- Surface non bâtie : 300 000 m²
- Chaîne de fabrication : 105 790 m²
- Bâtiments administratifs : 570 m²
- Magasins : 3 440 m²
- Bâtiments sociaux : 1 200 m²
- Total assiette usine : 411 000 m²



Figure 1. 3 Vue satellite de la SCSEG

1.4 Généralités sur les cimenteries

La fabrication du ciment passe par un processus complexe qui englobe plusieurs étapes. Dans l'industrie cimentière, il existe 4 types de process différents :

- La fabrication du ciment par voie humide ;
- La fabrication du ciment par voie semi-humide ;
- La fabrication du ciment par voie semi-sèche ;
- La fabrication du ciment par voie sèche.

Historiquement, le choix entre la voie sèche et la voie humide dépendait essentiellement des propriétés mécaniques des calcaires et des argiles utilisés. Si ceux-ci sont peu compacts, la voie humide demande moins d'énergie mécanique, car la mise en suspension des particules se fait assez facilement. A l'opposé, si la matière première est très compacte, la voie sèche est préférée. Toutefois, il faut souligner que la voie humide nécessite une plus grande quantité de chaleur pour l'évaporation de l'eau, qui est près du double de celle de la voie sèche.

Le développement des techniques a donc conduit à l'abandon progressif des voies humides et semi-humides au profit des voies sèches et semi-sèches. Ceci principalement en raison de cette demande en énergie thermique trop importante.

Dans ce chapitre nous allons essentiellement parler des principales étapes du procédé de fabrication de la SCSEG, qui est une cimenterie à voie sèche. [5]

1.5 Le ciment

1.5.1 Définition

Le ciment est un matériau inorganique, non métallique, de couleur grise ou blanche, finement broyé et qui, lorsqu'il est mélangé à de l'eau, forme une pâte fluide qui prend et durcit pour former une roche artificielle (mortiers et bétons). Ce durcissement hydraulique est principalement dû à la formation de silicates calciques hydratés qui se produit en raison d'une réaction entre l'eau et les constituants du ciment. Cette propriété de liant hydraulique en fait un matériau de construction de base, indispensable pour la construction et la création d'infrastructures.

1.5.2 Matières premières du ciment

Le ciment est fabriqué à partir d'un mélange de clinker (résultat de la calcination jusqu'à la fusion partielle de mélanges de calcaires et d'argiles) et de plâtre (gypse) qui agit comme régulateur de prise. On peut en outre y ajouter d'autres types d'adjuvants actifs tels que du laitier de haut-fourneau, du calcaire, des pouzzolanes, du sable ou des minerais de fer.

Les

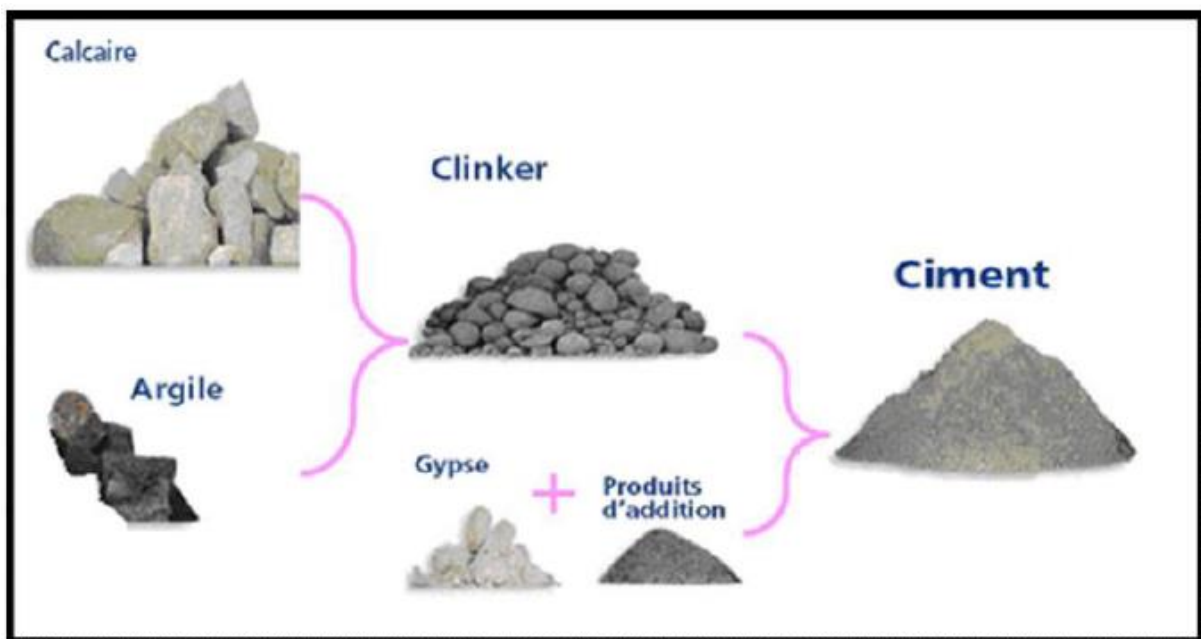


Figure 1. 4 Les composants du ciment

1.5.2.1 Matières premières de base

- Les principales matières premières pour la fabrication de clinker sont les suivantes :

- Un apport de carbonate : généralement des calcaires ou marnes, qui se chargent d'apporter le CaO qui réagit postérieurement dans le four pour former les silicates, c'est-à-dire les composants réellement actifs du clinker ;
- Un apport de fondants : généralement des argiles ou ardoises, qui se chargent d'apporter les oxydes qui agissent comme fondants et contribuent à la formation de phase liquide dans le four, ce qui favorise les réactions.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

- Pour la production de ciment, du gypse est ajouté au clinker comme contrôleur de prise.

1.5.2.2 Matières premières secondaires

Il est très habituel de devoir faire appel à d'autres matières premières, soit naturelles (matériaux pouzzolaniques, minerai de fer, sable, etc.), soit sous-produits ou déchets d'autres procédés de fabrication (cendres, laitier de haut fourneau, fumée de silice, etc.).

Pour corriger la composition des composés souhaités dans les matières premières, la SCSEG utilise des correcteurs naturels qui apportent les principaux oxydes appelés à composer les phases principales du clinker (silicates de calcium - tri et dicalciques – et aluminates de calcium). Ces correcteurs sont : le minerai de fer (Fe_2O_3) et le sable (SiO_2).

En plus du gypse, la pouzzolane est aussi ajoutée au clinker, ce qui va produire des hydrates du silicate de calcium qui sont les constituants qui dotent le ciment de sa résistance mécanique.

L'ajout de ces matériaux permet d'obtenir la qualité et les propriétés souhaitées du ciment.

1.6 Processus de fabrication du ciment de la SCSEG

Comme on l'a cité plus haut, le procédé de fabrication du ciment est un procédé assez complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des techniques de production et des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le clinker est le constituant le plus important et le plus coûteux en termes d'énergie du ciment. Il est obtenu en cuisant le mélange de calcaire, d'argile, de sable et de minerai de fer à environ $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Ce clinker est ensuite broyé avec du gypse et quelques ajouts pour obtenir le ciment.

Pour la voie sèche, de la carrière jusqu'à l'expédition du ciment, il y a 6 étapes principales :

- Extraction des matières premières.
- Concassage et préhomogénéisation des matières premières.
- Broyage et homogénéisation de la farine crue.
- Cuisson de la farine crue pour obtention du clinker.
- Broyage du clinker et des ajouts et stockage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

Ces différentes étapes sont schématisées dans la figure 1.5 ci-dessous :

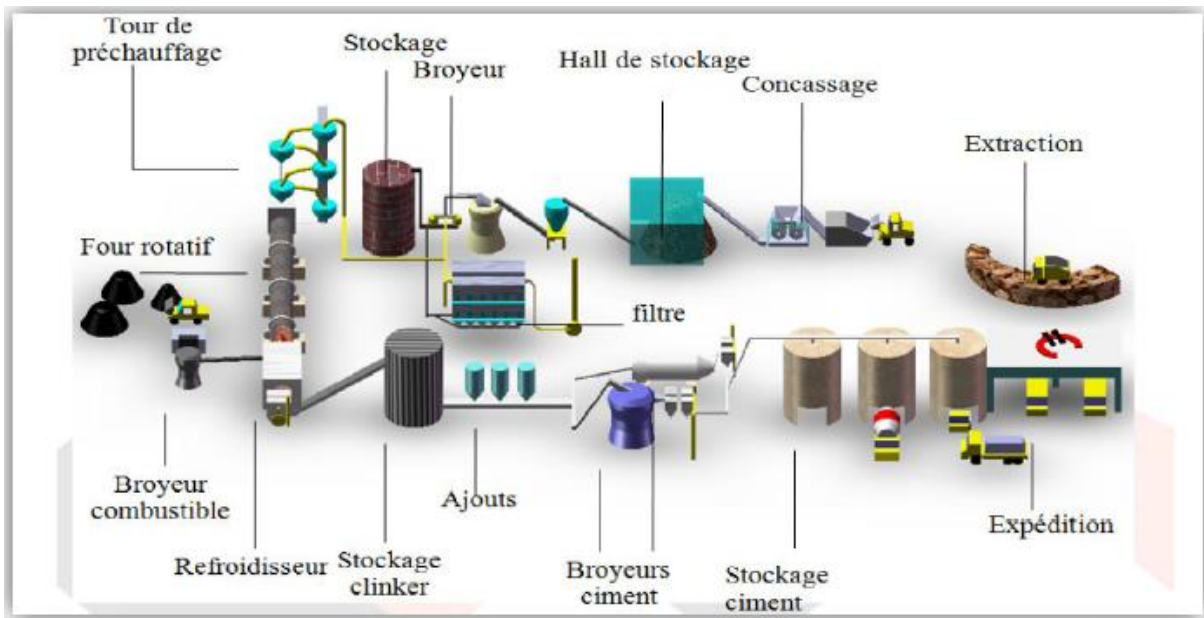


Figure 1. 5 Procédé de la fabrication du ciment de la voie sèche

1.6.1 Extraction des matières premières

Les matières premières principales qui sont le calcaire et l'argile, sont extraites de la carrière qui se trouve à quelques centaines de mètres de l'usine. Le calcaire est extrait par abattage à l'explosif et chargé dans des dumpers au moyen de chargeurs sur pneus. L'argile est extraite par ripage aidé de tirs d'ébranlement éventuels et chargée dans des dumpers au moyen de chargeurs sur pneus.



Figure 1. 6 Extraction du calcaire au niveau d'une carrière

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Les autres matières premières tel que le sable et le minerai de fer sont achetées, et acheminées à l'usine par des camions.

1.6.2 Concassage et préhomogénéisation des matières premières

Le concasseur a pour rôle de réduire le volume des matières premières dans le but de faciliter leur stockage. Les matières premières sont concassées séparément sur des concasseurs à marteaux.

Après leur concassage, les matières premières de base sont amenées en usine par un transporteur à bande en caoutchouc. Ce transporteur déverse la matière sur stacker qui dessert les stocks de calcaire et d'argile en se déplaçant sur rails parallèlement à ces stocks. C'est ainsi que les tas de calcaires et d'argile sont formés. Le minerai de fer et le sable sont aussi amenés du concassage par transporteurs à bande en caoutchouc. Un transporteur à bande réversible réalise la mise en tas de ces matières dans le hall.

La préhomogénéisation qui a pour but d'avoir un mélange régulier se fait transversalement au moyen d'un pont grateur pour le calcaire. Elle se fait latéralement au moyen d'un grateur à portique pour l'argile, le minerai de fer et le sable.



Figure 1. 7 Préhomogénéisation du calcaire par pont grateur



Figure 1. 8 Préhomogénéisation du sable par grateur à portique

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

1.6.3 Broyage et homogénéisation de la farine crue

Les matières premières sont amenées séparément par des transporteurs à bande aux trémies respectives de l'atelier de broyage cru. Les trémies ont pour rôle de stocker et de réguler le dosage des matières premières avant leur broyage. Les matières sont extraites des trémies et sont mélangées avec un dosage précis sur des transporteurs à bande peseuse. Il y a 2 lignes d'extraction, chaque ligne alimente un broyeur au moyen de transporteurs à bande en caoutchouc.

Les broyeurs sont horizontaux de type broyeur à boulets, ils ont un double rôle :

- Le Séchage : c'est-à-dire sécher les matières premières, pour qu'ils aient une humidité nettement inférieure à 1% à la sortie. Le séchage est réalisé par une partie des fumées extraites du four et entrant avec les matières premières dans les broyeurs.
- Le Broyage : où la matière est broyée et écrasée, dans le but d'avoir une finesse et une distribution granulométrique des particules crues bien précises.



Figure 1. 9 Broyeur à boulets de l'atelier broyage cru de la SCSEG

Les broyeurs fonctionnent en circuit fermé. Pour chaque broyeur, la matière sortante est amenée par élévateur à un séparateur qui a pour rôle de séparer les particules fines des particules non fines selon la finesse désirée. Le refus est renvoyé dans le premier compartiment du broyeur. La fraction fine sortante du séparateur est récupérée dans un cyclone et transportée par aéroglossière et airlift jusqu'aux silos d'homogénéisation.

Après le cyclonage de chacune des lignes de broyage, qui a pour rôle de séparer les gaz de fumées des particules fines de farine, les gaz de fumées sont dépoussiérés dans un filtre.

La farine crue est stockée et homogénéisée dans 2 silos de capacité de 8000 tonnes chacun.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

1.6.4 Cuisson de la farine crue

Cette partie du processus est la plus importante du point de vue des émissions potentielles, de la qualité du produit et du coût. La farine crue, est acheminée à la ligne de cuisson où elle est séchée, préchauffée, calcinée et frittée (clinkérisée) pour produire le clinker de ciment. Le clinker est refroidi à l'air, puis il est stocké.

La ligne de cuisson est divisée en 3 parties principales :

- **La tour de préchauffage** : C'est un échangeur à cyclones composé de 2 lignes et chaque ligne dispose de 4 étages de cyclones. La farine est injectée à la partie supérieure et descend par gravité alors que les gaz chauds du four sont tirés par des ventilateurs et entrent dans la partie inférieure de la tour. L'effet cyclonique permet un bon échange thermique entre les gaz et la farine, tout en évitant un entrainement de la farine hors de la tour.
- **Le four rotatif** : C'est un réacteur en forme de tube rotatif qui est incliné de 3.5% pour favoriser l'avance de la matière. Le chauffage est assuré par une flamme qui est à son extrémité et dont la température dépasse les 2000 °C. La farine sortant de la tour entre par son autre extrémité et subit une succession de réactions chimiques complexes tout au long du four jusqu'à la clinkérisation qui s'effectue au voisinage de 1450 °C.
- **Le refroidisseur à clinker** : Il est de type planétaire et se compose de 10 tubes, fixés au four rotatif sur l'extrémité du déchargement. Son rôle est d'effectuer la trempe du clinker par l'air qui est aspiré de l'atmosphère et de restituer cette chaleur dans le four. Plus le refroidissement est rapide plus c'est bénéfique pour le clinker car ça améliore sa broyabilité et ça optimise la réactivité du ciment.



Figure 1.10 Tour de préchauffage de la SCSEG



Figure 1.11 Four rotatif de la SCSEG

Du point de vue des procédés physiques et chimiques, le procédé de cuisson se subdivise en cinq étapes :

Séchage : le séchage implique l'évaporation de l'humidité de la matière première à une température de 110 °C. Lors de cette étape, il se produit l'évaporation de l'eau liquide retenue et absorbée. Elle se produit essentiellement au niveau du broyeur cru.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Préchauffage (jusqu'à 700 °C) : après le séchage, arrive le préchauffage qui a lieu dans la tour de préchauffage et dont le but est d'augmenter la température de la matière jusqu'à sa déshydratation à des températures supérieures à 450 °C.

Décarbonatation (700 à 1 000 °C) : la dissociation des carbonates de calcium et de magnésium se termine et une quantité considérable d'oxyde de calcium (chaux) libre fait son apparition. Ceci est représenté par les réactions chimiques suivantes :



Il se produit de même une décomposition des minéraux argileux déshydratés dans les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Cette étape se déroule en partie dans la tour de préchauffage, et elle se termine dans les premiers trçons du four.

Clinkérisation (1 000-1 450 °C) : au cours de cette étape se produisent les réactions de phase solide. Les oxydes de fer d'alumines et de scilice réagissent avec la chaux pour former les phases cristallines du clinker. Les principales phases sont :

- C_3S : Silicate tricalcique
- C_2S : Silicate bicalcique
- C_3A : Aluminate tricalcique
- C_4AF : Ferro-aluminate tétracalcique

Ces réactions sont exothermiques, ce qui provoque une augmentation intense de la température dans cette partie du four.

Refroidissement (1 450 à 130 °C) : le refroidissement du clinker commence dans la zone de pré-refroidissement du four avant l'entrée dans le refroidisseur. Le clinker sort du four à des températures allant de 1 350 °C à 1 150 °C. Il entre ensuite dans le refroidisseur, qui effectuera sa trempé par l'air ambiant. Pendant cette phase se forment complètement la structure et la composition définitive du clinker. Le clinker et les caractéristiques du ciment peuvent en outre être affectés positivement par une grande vitesse de refroidissement, en particulier dans la zone de pré-refroidissement du four.

Le clinker est transporté depuis le refroidisseur jusqu'au sommet des silos à clinker. Le stock de clinker consiste en 3 silos d'une capacité utile de 15 000 tonnes chacun.



Figure 1. 12 Silos de clinker de la SCSEG

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

1.6.5 Broyage du clinker et des ajouts

Le clinker est amené à l'atelier de broyage de ciment par transporteurs à bande. L'installation de broyage comporte 4 trémies, chacune avec 2 sorties ce qui permet d'alimenter parallèlement les 2 broyeurs à ciment. Il y a 2 trémies à clinker, une à gypse et une à ajout (calcaire ou autre). Sous chaque trémie d'extraction est placé un doseur qui va permettre de réguler le dosage dans le but d'avoir la composition de ciment voulu. Pour chaque ligne les doseurs se déversent sur un transporteur à bande placé sous les trémies. Un transporteur incliné placé à la suite alimente le broyeur.

Comme pour l'atelier de broyage cru, les broyeurs sont horizontaux à boulets. Ils sont équipés d'un système d'injection d'eau, ce qui permet de maintenir la température intérieure du broyeur en dessous de 115 °C.

Les broyeurs travaillent en circuit fermé. Le ciment sortant d'un broyeur est transporté par un élévateur et des aéroglissières à un séparateur dynamique. Le refus de ce séparateur est conduit à l'entrée du broyeur. L'air de ventilation est dépoussiéré dans un cyclone. Le ciment précipité dans le cyclone est transporté par aéroglissières directement à une pompe. Le but de ce circuit est de garantir un ciment broyé à une finesse de 3000 cm²/g.

Pour éviter une fausse prise causée par la déshydratation du gypse, le ciment passe par un refroidisseur secondaire cylindrique sur la paroi extérieure duquel ruisselle de l'eau. Le ciment sort de ce refroidisseur à une température de 80 °C.

Le ciment est transporté aux silos au moyen de pompes et d'un système de tuyauterie fermée. Pour le stockage du ciment, il a été prévu au total 4 silos d'une capacité utile unitaire de 8000 t.

1.6.6 Ensachage et expédition du ciment [6]

Le ciment est extrait des silos, et est amené par des transporteurs à vis soit aux ateliers d'ensachages soit à la station de chargement en vrac des camions.

Ateliers d'ensachages : Il y a 5 ateliers d'ensachage où les ensacheuses sont du type RU-12. L'ensachage se fait dans des sacs de 50 kg avec un débit maximal de 5 x 100 tonnes/h. Après leurs ensachage, les sacs de ciment sont transportés à l'installation de chargement de camions.

Chargement en vrac : Le ciment est amené à 2 élévateurs qui alimentent 2 aéroglissières qui déversent dans 2 silos en tôle qui sont équipés d'appareils de chargement. Le débit maximal de chargement en vrac des camions est de 2 x 200 tonnes /h.

1.7 Type de ciment fabriqué

Le ciment qui y est fabriqué est le CPJ-CEM II/A 42,5. C'est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et processus de fabrication du ciment

Le domaine d'utilisation de ce ciment est le suivant :

- Béton courant (non armé ou faiblement armé : fondations, portées réduites, décoffrage différé).
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...)
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc.)
- Béton routier.

Chapitre 2

Analyse des consommations énergétiques

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

2.1 Introduction

L'industrie cimentière est grande consommatrice d'énergies thermique et électrique dont les coûts au niveau mondial fluctuent. Si la dépense énergétique est réduite, elle produit immédiatement des avantages économiques et environnementaux, et par conséquent, l'optimisation de la consommation d'énergie est un objectif prioritaire de l'industrie du ciment.

Afin d'assurer une bonne gestion, il est indispensable d'effectuer une étude complète et de remonter aux causes de la surconsommation énergétique pour trouver des solutions efficaces.

Dans ce chapitre on va faire une étude sur les dépenses énergétiques de notre cimenterie, un historique de ces dépenses joue un rôle principal permettant la comparaison de l'évolution des consommations d'une année à l'autre. Afin de mener une étude complète, on va faire un suivi de l'historique des consommations calorifique et électrique depuis l'année 2013 jusqu'à 2017 et les comparer avec les consommations énergétiques standards des cimenteries du même type. On déterminera la répartition des consommations totales afin de localiser les opérations qui consomment plus d'énergie.

Finalement, on parlera aussi des problématiques environnementales des émissions dans la production du ciment et on essaiera de proposer quelques alternatives pour les réduire.

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

2.2 Historique de la consommation électrique

2.2.1 Introduction

La cimenterie est alimentée en énergie électrique par deux lignes haute tension de 60 kV. L'énergie électrique haute tension (60 kV) est transformée en moyenne tension (5,5 kV) dans une salle électrique à l'aide des deux transformateurs de hautes tensions.

La distribution intérieure de l'usine utilise deux tensions différentes. La tension 5.5 kV est utilisée pour l'alimentation des récepteurs de grande puissance et la tension 380 V assure l'alimentation des récepteurs les moins puissants.

L'usine est équipée d'un groupe électrogène pour alimenter les organes critiques tels que le vireur du four, les ventilateurs du refroidisseur en cas de défaut d'alimentation dans une salle ou en cas de coupures électriques.

2.2.2 Consommation d'énergie électrique par atelier

Après avoir terminé la visite de la ligne de production et comprendre le fonctionnement de chaque atelier, on a pu repérer tout équipement électrique énergivore, car pour chaque atelier il y a des équipements principaux et il y a d'autres qui sont secondaires en termes de consommation électrique.

Les ateliers les plus énergivores sont :

2.2.2.1 Atelier broyage cru

Les matières premières sont broyées très finement (de l'ordre du micron) dans des broyeurs à boulets, cet atelier dispose de deux broyeurs qui marchent en parallèle, ces derniers sont entraînés par deux moteurs similaires de grandes puissances.

L'atelier nécessite aussi deux ventilateurs de tirage pour assurer l'écoulement de la matière première broyée.

Tableau 2. 1 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier broyage cru [6]

	Équipement	Puissance (kW)	Tension (V)
Broyeur cru R1	Moteur du broyeur	3000	5500
	Ventilateur de tirage	750	5500
Broyeur cru R2	Moteur du broyeur	3000	5500
	Ventilateur de tirage	750	5500

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

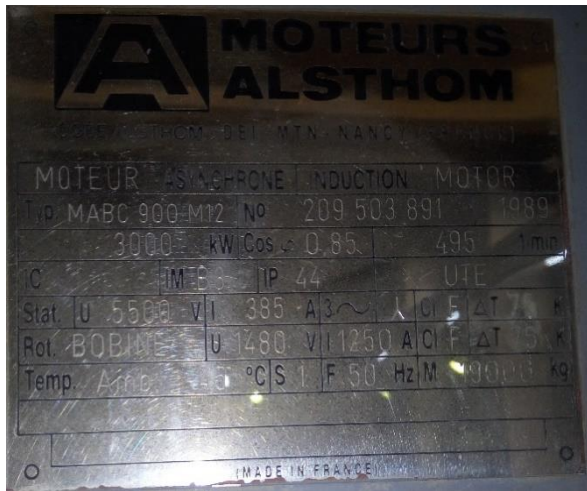


Figure 2. 1 Plaque signalétique du moteur « atelier broyage cru »



Figure 2. 2 Plaque signalétique du ventilateur « atelier broyage cru »

2.2.2.2 Atelier four

Pendant son fonctionnement, le four doit être toujours en rotation pour assurer l'évacuation de la matière à cuire, et surtout pour éviter le phénomène de flexion sous l'effet de la matière chaude à l'intérieur.

Cet atelier nécessite deux moteurs pour faire tourner le four, et deux ventilateurs pour l'évacuation des gaz de fumées à l'intérieur.

Tableau 2. 2 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier four [6]

Équipement	Puissance (kW)	Tension (V)
Moteur four 1	425	740
Moteur four 2	425	740
Ventilateur de tirage 1	1100	750
Ventilateur de tirage 2	1100	750



Figure 2. 3 Plaque signalétique du moteur « atelier four »



Figure 2. 4 Plaque signalétique du ventilateur « atelier four »

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

2.2.2.3 Atelier broyage ciment

La consommation d'énergie électrique nécessaire à l'étape de broyage ciment dépend fortement de la dureté de la matière première (calcaire, clinker, pouzzolane, etc.) et de la finesse requise du produit final, ainsi que de la quantité d'adjuvants utilisés.

Cet atelier contient deux broyeurs à boulets qui sont entraînés par deux moteurs de grandes puissances. L'écoulement de la matière broyée est assuré par deux ventilateurs de tirage.

Tableau 2. 3 Equipements consommateurs d'électricité de l'atelier broyage ciment [6]

	Équipement	Puissance (kW)	Tension (V)
Broyeur ciment Z1	Moteur du broyeur	3520	5500
	Ventilateur de tirage	315	5500
Broyeur ciment Z2	Moteur du broyeur	3520	5500
	Ventilateur de tirage	315	5500

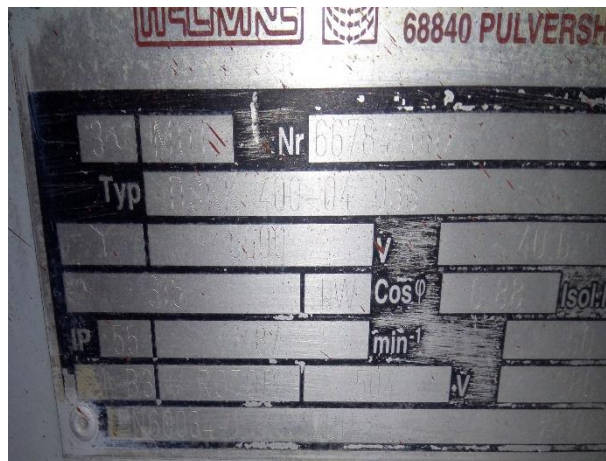


Figure 2. 5 Plaque signalétique du ventilateur « atelier broyage ciment »

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

2.2.3 Consommation électrique spécifique

Pour suivre la consommation électrique de la cimenterie, on détermine la consommation électrique spécifique CES, ce paramètre est utilisé dans le secteur des cimenteries et il dépend du type du procédé, composition de la matière première et la finesse désirée lors du broyage.

$$CES = \frac{\text{Consommation Electrique}(kWh)}{\text{Production du ciment}(tonne)} \quad (2.1)$$

Dans le cas de notre cimenterie on est censé à ne pas dépasser la valeur de 105(kWh/t.ciment) cette valeur concerne les procédés à voie sèche avec préchauffeur, refroidisseur planétaire (à ballonnets) et broyeur à boulets. [7]

Tableau 2. 4 Consommation électrique spécifique de la SCSEG des 5 dernières années

	2013	2014	2015	2016	2017
Consommation d'électricité (kWh)	97987513	113750313	97091160	112737948	130334977
Production ciment (Tonne)	855591	1010078	834616	1041074	1175102
CES (kWh/t.ciment)	114,53	112,62	116,33	108,29	110,91
% Ecart	9,07	7,25	10,79	3,13	5,63

Les résultats sont représentés dans la figure ci-dessous :

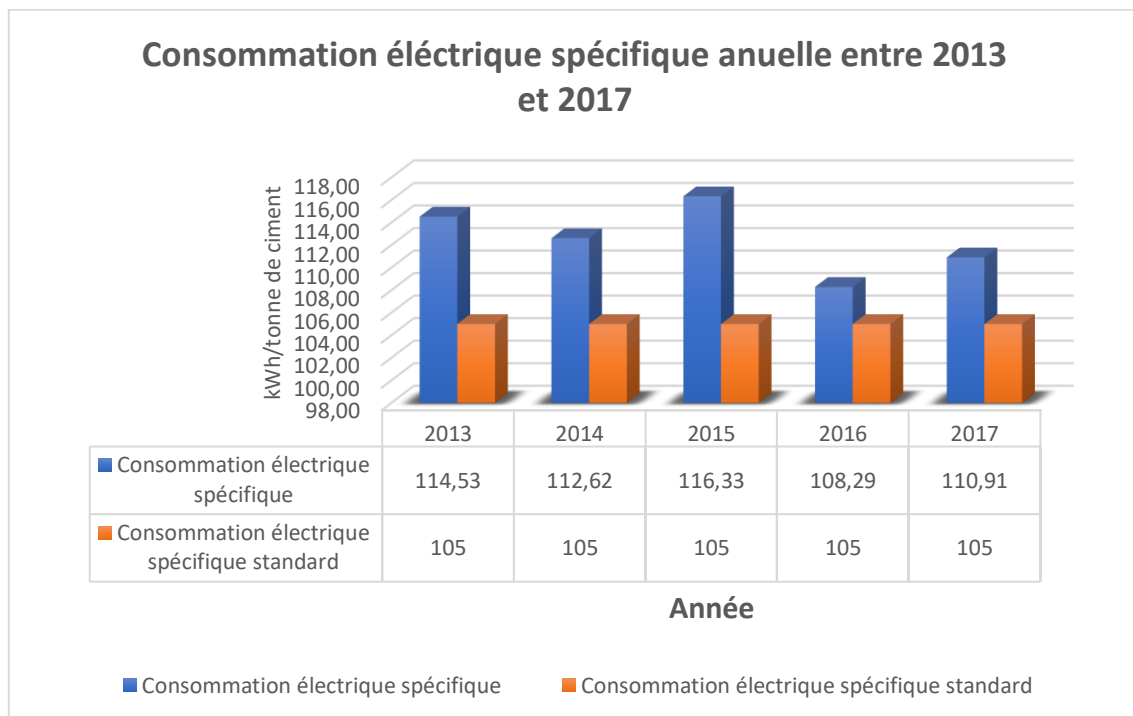


Figure 2. 6 Consommation électrique spécifique annuelle entre 2013 et 2017

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

La (figure 2.6) représente les fluctuations de l'énergie électrique consommée depuis l'année 2013 à 2017 par tonne de ciment produit par rapport aux valeurs standards.

Les écarts des consommations électrique par rapports aux standards sont jugées élevée en 2013, 2014 et 2015 par rapport à ceux des années 2016 et 2017, ceci est expliqué par le fait que la cimenterie s'est équipée de nouveaux moteurs asynchrones en 2016.

On remarque que la consommation électrique spécifique dépasse la valeur standard qui est 105 (*kWh/t.ciment*) durant ces dernières années, cela se traduit par des pertes considérables de l'énergie électrique.

2.2.4 Consommation électrique spécifique par atelier

Afin de déterminer la répartition des consommations électriques le long du procédé, on a pris la répartition des consommations pour l'année 2017 illustrée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2. 5 Consommation électrique et spécifique par atelier pour l'année 2017

Ateliers	Consommation électrique (<i>kWh</i>)	Production (<i>Tonne</i>)	Consommation spécifique (<i>kWh/t</i>)	%
Carrière	1791270	1370812	1,31	1,48
Concasseur et concasseur sécheur	714930	340972	2,10	0,59
Broyage Cru	46160877	1386838	33,28	35,58
Four	24459985	905024	27,03	17,66
Broyage Ciment	54314255	1175102	46,22	42,31
Expédition	2088000	1155066	1,81	1,72
Systèmes auxiliaires	805660	/	/	0,67
Total	130334977	/	/	100

Les résultats obtenus sont représentés dans le diagramme suivant :

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

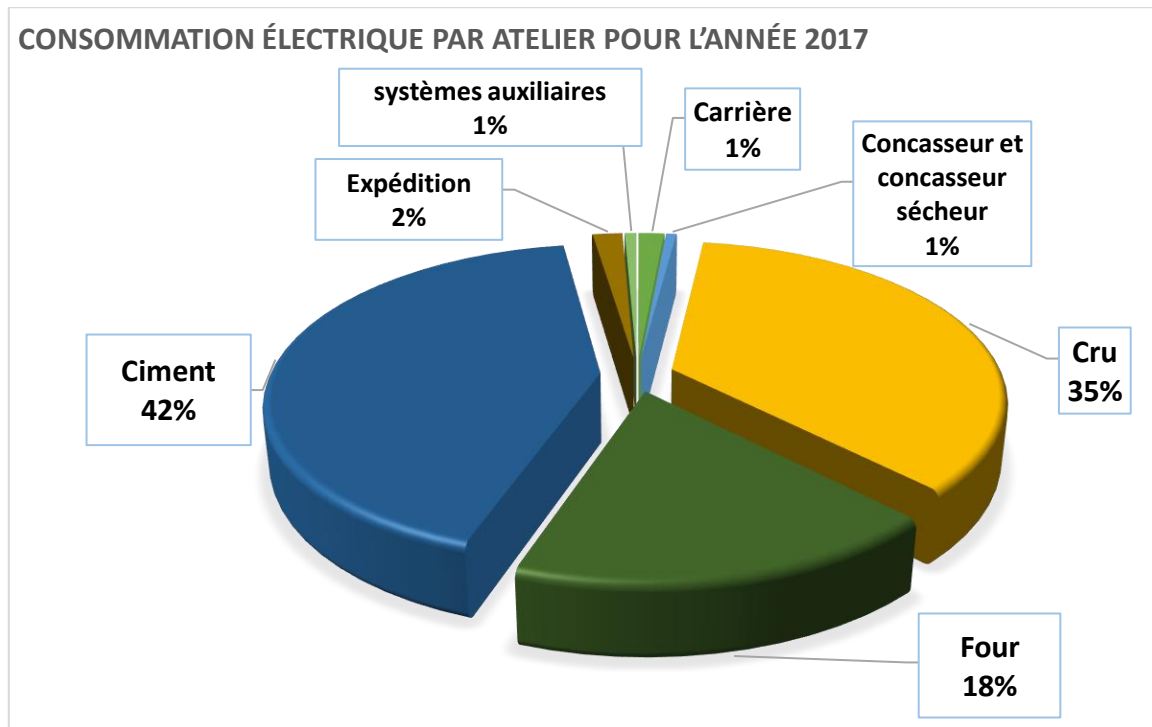


Figure 2. 7 Consommation électrique par atelier pour l'année 2017

Comme on peut le constater en analysant le diagramme précédent, l'électricité est consommée globalement dans les trois grands ateliers cités avant (plus de 95% de la consommation totale), ceci est dû aux équipements énergivores utilisés dans ces ateliers.

Les deux ateliers du broyage cru et ciment consomment plus de 75% de l'énergie électrique, la grande partie de cette énergie est utilisée pour entrainer les broyeurs qui sont les équipements les plus énergivores de l'usine avec une puissance de 3000 (kW) et 3520 (kW) respectivement.

2.3 Historique de la consommation thermique

2.3.1 Introduction

Les besoins thermiques d'une cimenterie sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1450 à 1500 °C.

Les besoins thermiques dépendent principalement des facteurs suivants :

- type du procédé (voie humide, semi-humide, semi sèche, sèche).
- Conception des équipements (type du refroidisseur, nombres d'étages du préchauffeur, longueur du four).
- Fiabilité de fonctionnement de la ligne de cuisson (les arrêts fréquents entraînent une surconsommation calorifique importante). [8]

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

2.3.2 Consommation thermique spécifique

Pour suivre la consommation thermique de la cimenterie, on détermine la consommation thermique spécifique CTS , ce paramètre est utilisé dans le secteur des cimenteries et sa valeur change d'un procédé à un autre.

$$CTS = \frac{\text{Consommation thermique}(GJ)}{\text{Production du clinker (tonne)}} = \frac{\text{Consommation gaz naturel} * PCI_{gaz}}{\text{Production clinker}} \quad (2.2)$$

CTS : Consommation thermique spécifique (GJ/t de clinker)

Consommation du gaz naturel : (Nm^3/ans)

PCI_{gaz} : Pouvoir calorifique inférieur du gaz (GJ/Nm^3)

$Production clinker$: Quantité du clinker produite ($tonnes/ans$)

Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel algérien est de :

$$PCI_{gaz} = 37442.82 \text{ (} GJ/Nm^3 \text{)}$$

Pour le cas de notre cimenterie, la consommation thermique (calorifique) spécifique standard d'un atelier de cuisson en voie sèche à quatre étages de cyclones (tour de préchauffage) et sans précalcinateur est de 3550 ($MJ/tonne$ de clinker) c à d 3.55 ($GJ/tonne$ de clinker).

La figure suivante récapitule les données importantes concernant la consommation thermique spécifique standard des différents procédés de cuisson.

Table 4: Specific Thermal Energy Consumption by Rotary Kiln Type		
Kiln Type	Heat Input, MJ/tonne of clinker	Heat Input, MMBtu/tonne of clinker
Wet	5,860 – 6,280	5.55 – 5.95
Long Dry (LD)	4,600	4.36
1 Stage Cyclone Preheater (SP)	4,180	3.96
2 Stage Cyclone Preheater (SP)	3,770	3.57
4 Stage Cyclone Preheater (SP)	3,550	3.36
4 Stage Cyclone Preheater plus Calciner (NSP)	3,140	2.97
5 Stage Cyclone Preheater plus Calciner (NSP) plus high efficiency cooler	3,010	2.85
6 Stage Cyclone Preheater plus Calciner (NSP) plus high efficiency cooler	<2,930	2.78

Source: Based on Madloul 2011; 1055.87 MJ = 1 MMBtu

Figure 2. 8 Standards des consommations thermique spécifique [1]

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

Le tableau suivant présente la consommation totale du gaz naturel, la production totale du clinker et la consommation totale d'énergie thermique par tonne de clinker produite des 5 dernières années :

Tableau 2. 6 Consommation thermique spécifique des 5 dernières années

	2013	2014	2015	2016	2017
Consommation gaz naturel (Nm^3/ans)	66017270	77389806	69743307	78639265	89760159
Production du clinker (tonne/ans)	673014	805684	664302	771700	905024
PCI (GJ/Nm^3)	0,03744	0,03744	0,03744	0,03744	0,03744
Consommation thermique (GJ/ans)	2471687	2897474	2611189	2944254	3360620
CTS (GJ/t de clinker)	3,673	3,596	3,931	3,815	3,713
% Surconsommation (par rapport au standard)	3,45	1,30	10,72	7,47	4,60

Les résultats sont représentés dans la figure ci-dessous :

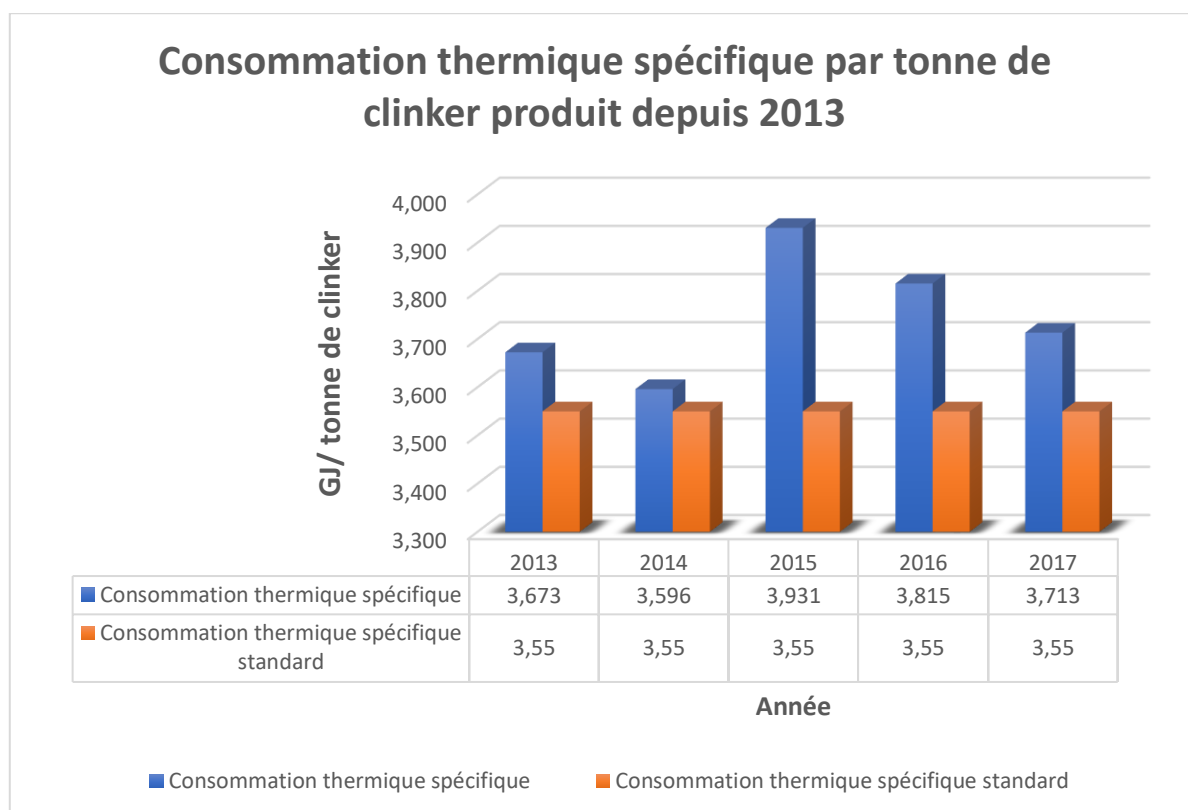


Figure 2. 9 Consommation thermique spécifique par tonne de clinker produit depuis 2013

Chapitre 2 : Analyse des consommations énergétiques

La figure 2.9 représente les fluctuations de l'énergie thermique consommée depuis l'année 2013 à 2017 par tonne du clinker produit en la comparant aux valeurs standards qu'on est censé ne pas dépasser pour éviter les pertes thermiques.

On remarque que la consommation thermique spécifique dépasse la valeur standard des cimenteries du même type qui est 3.55 (*GJ/t.clinker*) durant ces dernières années, cela se traduit par des pertes considérables de l'énergie thermique.

On remarque que la surconsommation thermique a atteint des valeurs importantes durant ces 3 dernières années où elle atteint en 2015 une valeur de plus de 10%. Cela veut dire qu'il y a un écart important par rapport aux cimenteries modernes.

On peut évaluer les écarts de consommation durant ces années par rapport aux consommations standards en termes de puissance en les multipliant par le débit de clinker moyen annuel. Le tableau suivant présente ces écarts en *MW* :

Tableau 2. 7 Surconsommations pour les années 2015, 2016 et 2017

	2015	2016	2017
CTS (<i>GJ/t de clinker</i>)	3,931	3,815	3,713
CTS standard (<i>GJ/t de clinker</i>)	3,55	3,55	3,55
Ecarts (<i>GJ/t de clinker</i>)	0,381	0,265	0,163
Débit de clinker moyen annuel (<i>tonne/h</i>)	118,93	126,26	130,13
Ecarts de consommation (<i>MW</i>)	12,58	9,30	5,90

On remarque que les écarts sont importants, cela montre l'existence des imperfections dans le processus de cuisson des matières premières.

2.4 Consommation totale d'énergie

Le tableau suivant présente la consommation d'énergie totale entre 2013 et 2017, ainsi sa répartition entre énergie électrique et thermique.

Tableau 2. 8 Consommation d'énergie totale depuis 2013

	2013	2014	2015	2016	2017
Consommation thermique(<i>GJ</i>)	2471687	2897474	2611189,414	2944254	3360620
Consommation électrique(<i>GJ</i>)	352755	409501,1	349528,176	405856,6	469205,9
Consommation Totale(<i>GJ</i>)	2824442	3306975	2960717,59	3350111	3829826
%Consommation thermique	87,51	87,62	88,19	87,89	87,75
%Consommation électrique	12,49	12,38	11,81	12,11	12,25

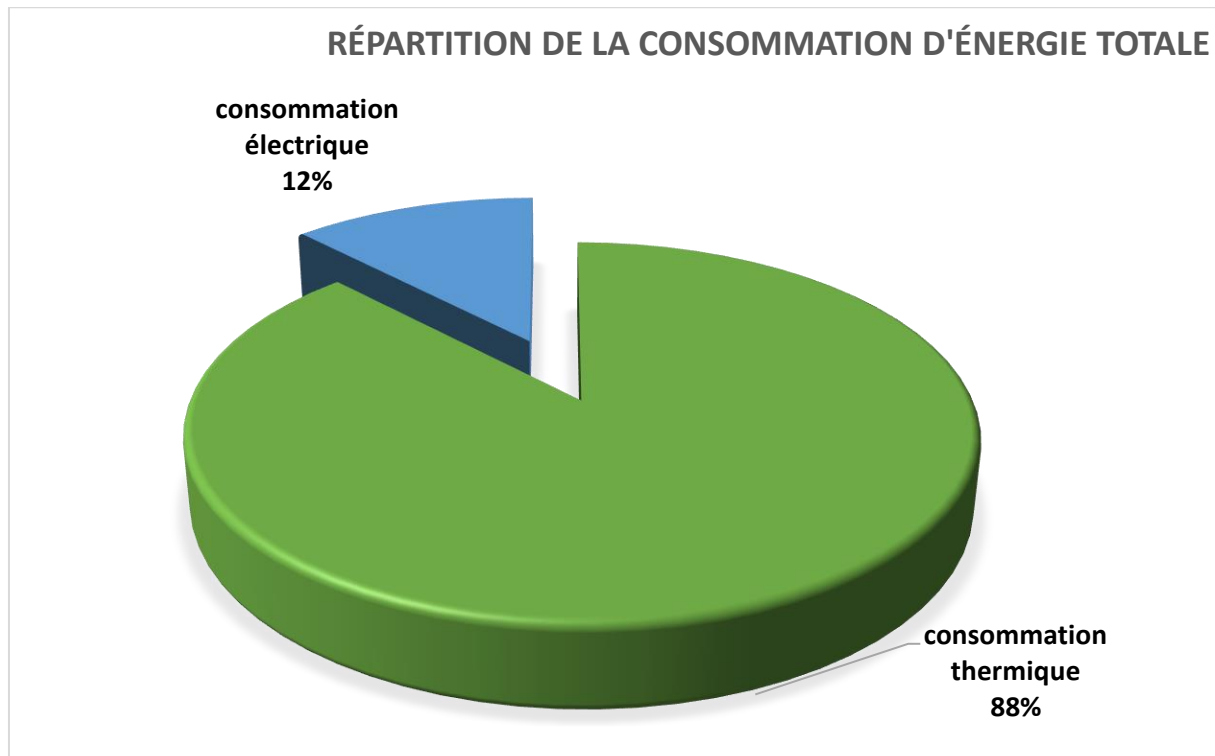


Figure 2. 10 Répartition de la consommation d'énergie totale

L'analyse de la consommation totale d'énergie de la cimenterie montre que la consommation thermique est plus importante, soit 88 % de l'énergie totale. L'électricité vient en deuxième position, elle représente les 12% qui restent. Cela montre que la cuisson des matières premières est l'opération la plus énergivore de tout le processus de fabrication.

2.6 Conclusion

Notre analyse nous a permis de conclure que près de 88% de l'énergie totale est consommée dans l'atelier de cuisson. On a aussi déduit qu'il y a des surconsommations considérables dans cette ligne de cuisson par rapport aux standards internationaux. Ceci nous pousse à mieux se pencher sur ce problème par l'établissement d'un bilan énergétique sur cet atelier.

Chapitre 3

Description de la ligne de cuisson

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

3.1 Introduction

Comme on l'a souligné lors des chapitres précédents, la ligne de cuisson et plus particulièrement le four rotatif représente le cœur du process. Ceci est dû au fait que cette partie représente près de 88 % des consommations énergétiques totales de l'usine, et aussi au fait qu'elle a une importance capitale dans le processus, car elle permet de transformer, par traitement thermique, un matériau « cru » en un semi-produit désigné sous le nom de clinker.

En se basant sur cela, on va faire un bilan énergétique qui englobe toute la ligne de cuisson. Cette ligne est divisée en 3 parties :

- La tour de préchauffage
- Le four rotatif
- Le refroidisseur à clinker

Avant d'introduire le bilan énergétique sous un aspect thermodynamique dans le chapitre 4, on va présenter la ligne de cuisson plus en détail.

Dans ce qui suit, nous décrirons cette ligne de cuisson et définirons les principaux équipements qui entrent en jeu.

3.2 Définition de la ligne de cuisson de la SCSEG

C'est l'atelier qui a le rôle de faire la cuisson des matières crues pour l'obtention du clinker. La conception de cet atelier diffère d'un type de process à un autre. Pour le procédé à voie sèche de la SCSEG, il est divisé en 3 parties :

- L'échangeur à cyclones (tour de préchauffage)
- Le four rotatif
- Le refroidisseur à ballonnets

Les différentes opérations de cuisson se déroulent le long de cet atelier, comme le montre la figure 3.1 ci-dessous : [9]

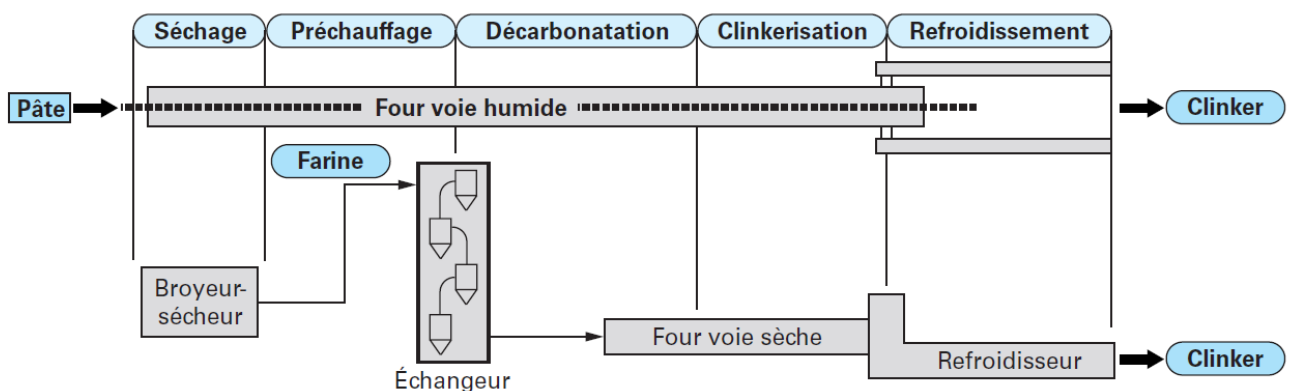


Figure 3. 1 Les cinq opérations principales de cuisson du clinker

Remarque : le broyeur sécheur ne fait pas parti de l'atelier de cuisson, mais il est représenté dans cette figure car dans le procédé à voie humide, le séchage s'effectue dans le four alors que dans la voie sèche il s'effectue dans le broyeur à crue.

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

3.3 Echangeur à cyclones

L'échangeur à cyclones de la SCSEG est constitué de 4 étages de cyclones. Ce nombre d'étages a été retenu par les constructeurs au début du développement du procédé par voie sèche, car à l'époque des années 60 il était le meilleur compromis entre coût d'investissement et coût d'exploitation.

Le nombre d'étages peut être porté à 5 voire 6 dans les configurations où les matières premières relativement sèches ne nécessitent pas un apport thermique très important pour effectuer leur séchage. L'échangeur à 4 étages permet l'équilibre entre chaleur disponible dans les fumées sortant de l'échangeur et besoin en chaleur pour évaporer l'humidité de matières premières dans l'atelier de broyage cru.

L'échangeur est à 4 étages de cyclones qui sont répartis en 2 lignes parallèles « A » et « B ». Les 2 lignes sont identiques et disposent chacune de 5 cyclones. Pour chaque ligne, dans le premier étage, qui est celui du dessus il y a 2 cyclones jumeaux. Pour le deuxième, troisième et quatrième étage il y a un seul cyclone par étage et par ligne. L'ensemble des cyclones d'une ligne est lié par des conduites et des gaines de liaisons.

Le dispositif des cyclones pour une seule ligne est représenté par la figure 3.2 ci-dessous :

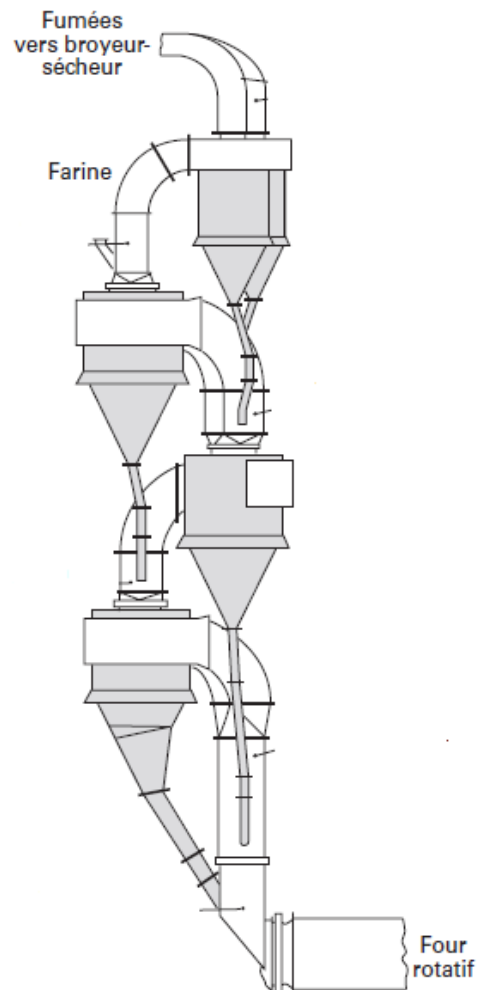


Figure 3. 2 Ligne d'un préchauffeur à 4 étages de cyclones [9]

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

3.3.1 Description du procédé dans l'échangeur à cyclones

La farine crue est extraite des silos d'homogénéisation, par une aéroglissière et un élévateur. Elle est amenée à une trémie tampon de fabrication Schenck. La trémie Schenk comporte 2 sorties, dont une de réserve, chacune comportant une vanne de fermeture tout ou rien, une vanne de réglage et un débitmètre. Après son dosage, la farine crue passe par 2 airlifts qui la transportent en haut des 2 lignes de cyclones. La capacité maximale de chaque ligne est de 120 t/h. [6]

A l'entrée de la tour de préchauffage la farine crue possède les caractéristiques suivantes :

- Débit maximal : 240 t/h
- Humidité maximale : ≤ 0.5 % H₂O
- Densité : 0.8

Une fois que la farine entre par la partie supérieure de la tour, elle commence sa descente qui est due à la gravité à travers les cyclones. Les gaz chauds de combustion sortant du four, sont aspirés par les ventilateurs de tirage et commencent leurs ascension à travers les cyclones. Ceci va créer un mouvement de contre-courant entre les gaz d'échappements et la farine et va donc conduire à un échange thermique entre les deux. Cet échange est favorisé par les cyclones qui jouent un double rôle :

- Maximiser l'échange de chaleur à travers la trajectoire cyclonique des gaz.
- Séparer les particules de poussières qui sont transportées avec les gaz grâce à ce même mouvement cyclonique.

Une fois que les gaz arriveront à la sortie de la tour avec des températures comprises entre 330 et 350 °C, on va les utiliser pour le séchage des matières premières à l'atelier broyage cru. Après cela, ils traverseront un filtre à manche qui aura pour but de les dépoussiérer et seront refoulés dans l'atmosphère.

Quant à la farine, lorsqu'elle aura atteint l'entrée du four, elle aura effectué une bonne partie de sa décarbonatation et elle aura atteint des températures comprises entre 800 et 900 °C.

Les caractéristiques principales des cyclones sont données par le tableau ci-dessous : [6]

Tableau 3. 1 Caractéristiques des cyclones de la tour de préchauffage de la SCSEG [6]

Etage	Nb cyclones	Diamètre (m)	T °C des gaz à la sortie	Qualité acier NF
Etage 1	4	4.35	330 - 350	A35 501
Etage 2	2	6.6	530 - 550	A35 501
Etage 3	2	6.6	690 - 720	A35 501
Etage 4	2	6.6	820 - 840	A35 501

3.4 Four rotatif

Le four rotatif de la SCSEG consiste en un tube métallique en appui sur 4 stations de roulement, 3 stations de roulement se situant avant le refroidisseur à ballonnets et une station de roulement se situant après le refroidisseur qui est dans le prolongement du four. Il a une inclinaison de 3.5 % par rapport à l'horizontale et possède une vitesse de rotation en régime nominal de 2 tours/minutes. La mise en rotation du four est assurée par 2 moteurs électriques qui sont accouplées à 2 réducteurs à grande précision. Chaque réducteur, transmet le mouvement à un pignon qui attaque une couronne dentée fixée sur la virole du four.



Figure 3. 3 La couronne d'entraînement et une station de roulement du four de la SCSEG

Il y a un guidage axial du four qui est assuré par un dispositif hydraulique. Ce mouvement longitudinal du four a pour but de répartir, de façon uniforme, l'usure des surfaces de contact entre bandages et galets.



Figure 3. 4 Usure non uniforme d'un galet de support du four de la SCSEG

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

3.3.1 Description du procédé dans le four rotatif

A l'intérieur du four, la température des fumées évolue de 2 000 - 2 200 °C (température de la flamme) à des températures de l'ordre de 1000 °C à la sortie du four, tandis que la matière passe de températures comprises entre 800 et 900 °C à des températures au voisinage de 1450 °C. Alors un revêtement réfractaire est impératif, afin de protéger la virole et de réduire les pertes de chaleur. Le revêtement réfractaire utilisé est de type briquetage, et le type de brique employé diffère selon la température de la zone concernée.

La farine se déplace à l'intérieur par gravité, en raison de l'inclinaison du four et de la rotation de ce dernier. Elle progresse peu à peu, de l'entrée par la partie supérieure jusqu'à la sortie par la partie inférieure, en étant exposée à toutes les phases de la réaction pour former le clinker. Le lit de matière couvre entre 10 à 12 % de la section intérieure du four.

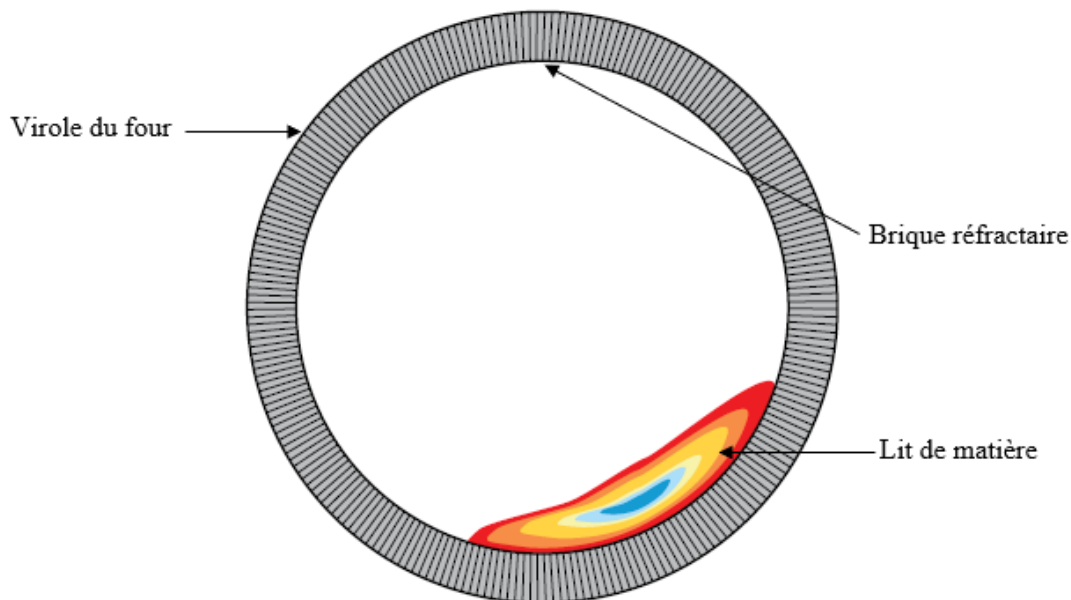


Figure 3. 5 Coupe transversale d'un four rotatif [10]

Le flux de farine crue dans le four avance à contre-courant par rapport aux gaz chauds provenant de la combustion, ce qui va favoriser l'échange thermique entre les deux flux.

Le combustible est injecté par l'extrémité inférieure du four à travers une tuyère. Cette tuyère est alimentée par un mélange d'air primaire et de gaz naturel. Il y a aussi une quantité d'air secondaire qui entre à travers la partie inférieure du four.

Le débit de gaz est réglé de façon à avoir une température de flamme comprise entre 2000-2200 °C selon les besoins. Le débit de l'air (primaire et secondaire) est réglé selon celui du gaz de façon à avoir une combustion complète. Un analyseur de gaz est placé à la sortie du four et mesure le pourcentage de CO dans la fumée, ceci va permettre de contrôler si la combustion est complète.

Les caractéristiques principales du four de la SCSEG sont :

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

Tableau 3. 2 Caractéristiques du four de la SCSEG [6]

Capacité nominale de production	3000 tonnes de clinker / jour
Longueur du four	89 m
Diamètre intérieur du tube	5.5 m
Pente du four	3.5 %
Nombre de supports (stations de roulement)	4
Vitesse de rotation	0.2 - 2 tours / minute
Qualité de l'acier de la virole	Acier de construction E 242
Constructeur	FLSmidth

3.5 Refroidisseur à ballonnets

Le clinker à la sortie du four rotatif a une température comprise entre 1 200 et 1 400 °C. Il doit subir un traitement thermique sous la forme d'une trempe à l'air pour des raisons de facilité de transport, de stockage, de récupération d'énergie et de qualité. Par conséquent, le refroidisseur par sa fonction d'échange thermique permet d'atteindre ces trois objectifs :

- Le refroidissement du clinker, pour faciliter sa manutention ;
- Une récupération d'énergie thermique à travers l'air qui sera réinjecté dans le four
- La trempe du clinker, dans le but d'améliorer sa qualité.

C'est à ce titre, que le refroidisseur à clinker est considéré comme l'un des 3 constituants importants de la ligne de cuisson.

Le refroidisseur de la SCSEG est un refroidisseur à ballonnets ou autrement dit refroidisseur à planétaires, il est monté sur le four entre la troisième et la quatrième station de roulement. Il est composé de 10 tubes qui sont répartis autour de la virole de décharge du four et positionnés parallèlement à l'axe du four. La virole du four possède des ouvertures circulaires où sont soudées des collerettes qui reçoivent les ballonnets par l'intermédiaire de brides boulonnées.



Figure 3. 6 Refroidisseur à ballonnets de la SCSEG

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

Les pipes d'entrées des ballonnets ont des formes spéciales, empêchant le retour, dans le four, du clinker admis dans le refroidisseur. Chaque ballonnet, est monté entre 2 appuis qui sont posés sur le prolongement de la virole du four. Ces supports sont équipés d'attaches à colliers assurant le maintien du ballonnet. La rotation du four provoque la chute du clinker au niveau de la virole de décharge dans les pipes des ballonnets puis son cheminement jusqu'à la sortie du refroidisseur.

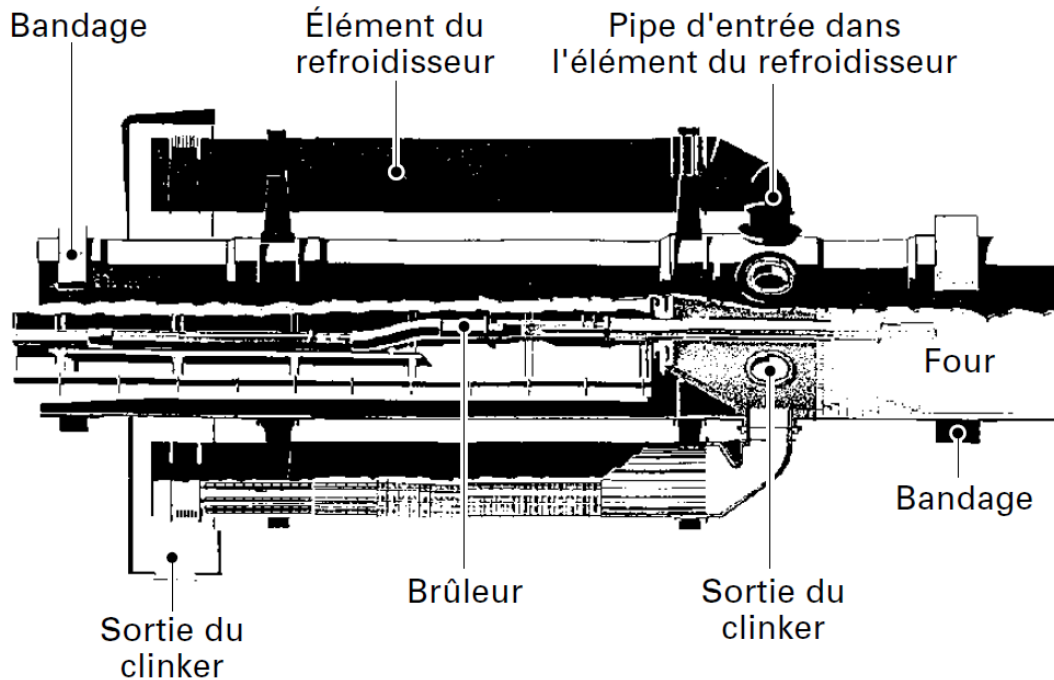


Figure 3. 7 Schéma du refroidisseur à ballonnets (Constructeur FLSmidth) [11]

Pour garantir un bon échange thermique, l'intérieur des ballonnets est composé de briques réfractaires sur sa partie la plus chaude qui représente environ 20% de sa longueur.

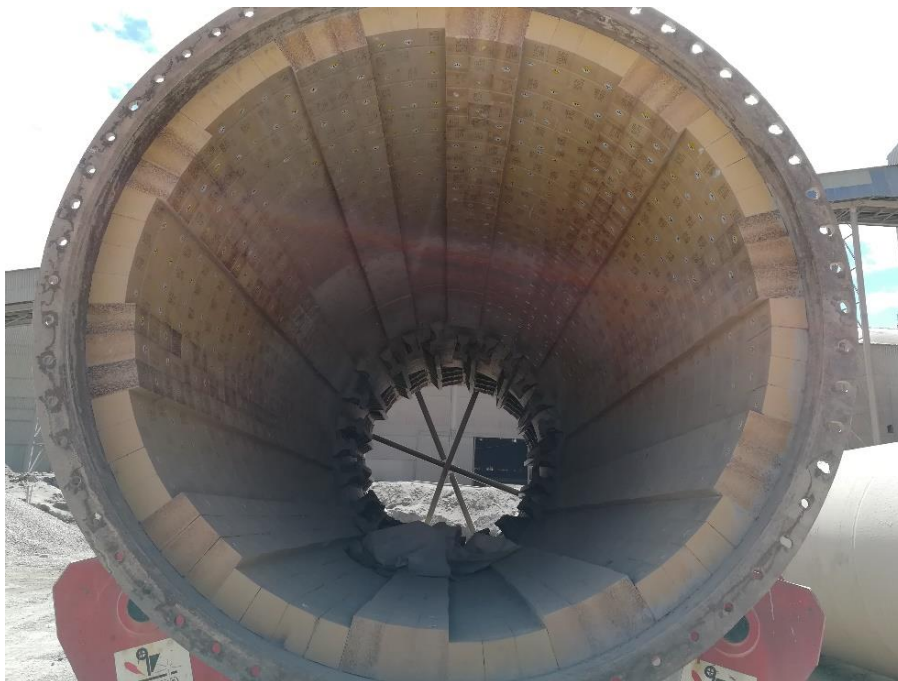


Figure 3. 8 Portion briquetée du ballonnet

Chapitre 3 : Description de la ligne de cuisson

3.5.1 Description du procédé dans les ballonnets

Un flux d'air ambiant entre par la partie gauche du ballonnet, la partie par laquelle sort le clinker. L'air va circuler à contre-courant par rapport au clinker, ce qui va favoriser l'échange entre les 2 flux. Le clinker va se refroidir et sortir du refroidisseur à des températures de l'ordre des 200 °C, et l'air qui entre dans le four comme air secondaire, va lui se réchauffer et apporter cette chaleur au four.

Le débit d'air est garanti par 2 ventilateurs de tirage qui se situent à la sortie de la tour de préchauffage. Les ventilateurs travaillent en parallèle, car chaque ventilateur est relié à une ligne de cyclones. Ils mettent le circuit de la ligne de cuisson en dépression, de telle sorte que l'air est aspiré depuis les ballonnets, elle traverse le refroidisseur et le four, elle monte à travers les cyclones et sort du circuit.

Les principales caractéristiques du refroidisseur à ballonnets de la SCSEG sont :

Tableau 3. 3 Caractéristiques du refroidisseur de la SCSEG [6]

Type de refroidisseur	UNAX
Nombre de ballonnets	10
Longueur du ballonnet	25.2 m
Diamètre du ballonnet	2.25 m
Constructeur	FLSmidth

Chapitre 4

Bilan énergétique de la ligne de cuisson

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.1 Introduction :

La production de ciment est un processus long qui consomme de grandes quantités de combustibles fossiles et d'électricité. Le procédé comprend plusieurs étapes dont la production de clinker dans le four rotatif est l'étape la plus énergivore, représentant environ 88% de l'utilisation totale d'énergie (cas de la cimenterie SCSEG).

Les calculs effectués lors du chapitre 2 montrent que la SCSEG a enregistré une augmentation de la consommation énergétique thermique ces derniers temps. Cette surconsommation a des impacts économiques et environnementaux d'où l'établissement d'un bilan énergétique de la ligne de cuisson est nécessaire car il peut donner des informations utiles sur l'efficacité énergétique.

L'optimisation de la consommation énergétique est la raison principale pour effectuer un bilan énergétique de la ligne de cuisson composée par le four rotatif, la tour de préchauffage et le refroidisseur.

Le bilan énergétique donne une meilleure évaluation de la consommation thermique, il indique où et comment la chaleur produite par le combustible est consommée, ceci est basé sur le principe :

$$\sum \dot{E}_e = \sum \dot{E}_s \quad (4.1)$$

Telle que : \dot{E}_e, \dot{E}_s sont les taux d'énergies entrantes et sortantes respectivement.

Il constitue donc le point de départ à partir duquel nous pourrions tirer les conclusions et proposer des pistes pour réduire les pertes calorifiques qui sont jugées excessives et par conséquent optimiser la consommation énergétique.

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.2 Partie théorique

4.2.1 Principe du bilan énergétique :

L'approche de base est de considérer la ligne de cuisson composée par le four rotatif, la tour de préchauffage et le refroidisseur comme un volume de contrôle avec des limites spatiales bien définies. L'application du bilan énergétique est basée sur la première loi de la thermodynamique nommée aussi loi de conservation d'énergie.

Au cours de l'analyse, les hypothèses suivantes sont faites : [12]

- (1) Le système est supposé être stable et les débits sont constants.
- (2) Les énergies cinétiques et potentielles des matériaux d'entrée et de sortie sont négligeables.
- (3) Les gaz à l'intérieur du four sont supposés être des gaz parfaits.
- (4) L'énergie électrique produit le travail de l'arbre dans le système.
- (5) Les températures de surface moyennes et de l'air sont constantes pendant toute la période de mesure.

À partir de là on peut écrire :

$$\sum \dot{E}_e = \sum \dot{E}_s \quad (4.1)$$

$$\dot{q} - \dot{w} = \sum \dot{m}_s h(T, p) - \sum \dot{m}_e h(T, p) \quad (4.2)$$

Avec :

\dot{q} : taux de transfert de chaleur vers l'extérieur.

\dot{w} : puissance pour faire tourner le four.

\dot{m} : débit massique.

$h(T, p)$: enthalpie totale.

$$h(T, p) = h_f^0 + \Delta h \quad (4.3)$$

h_f^0 : enthalpie de formation.

$$\Delta h = \int_{T_0}^T C_p dT \quad (4.4)$$

$$\text{Pour le cas des matériaux :} \quad C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (4.5)$$

$$\text{Pour le cas des gaz :} \quad C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4.6)$$

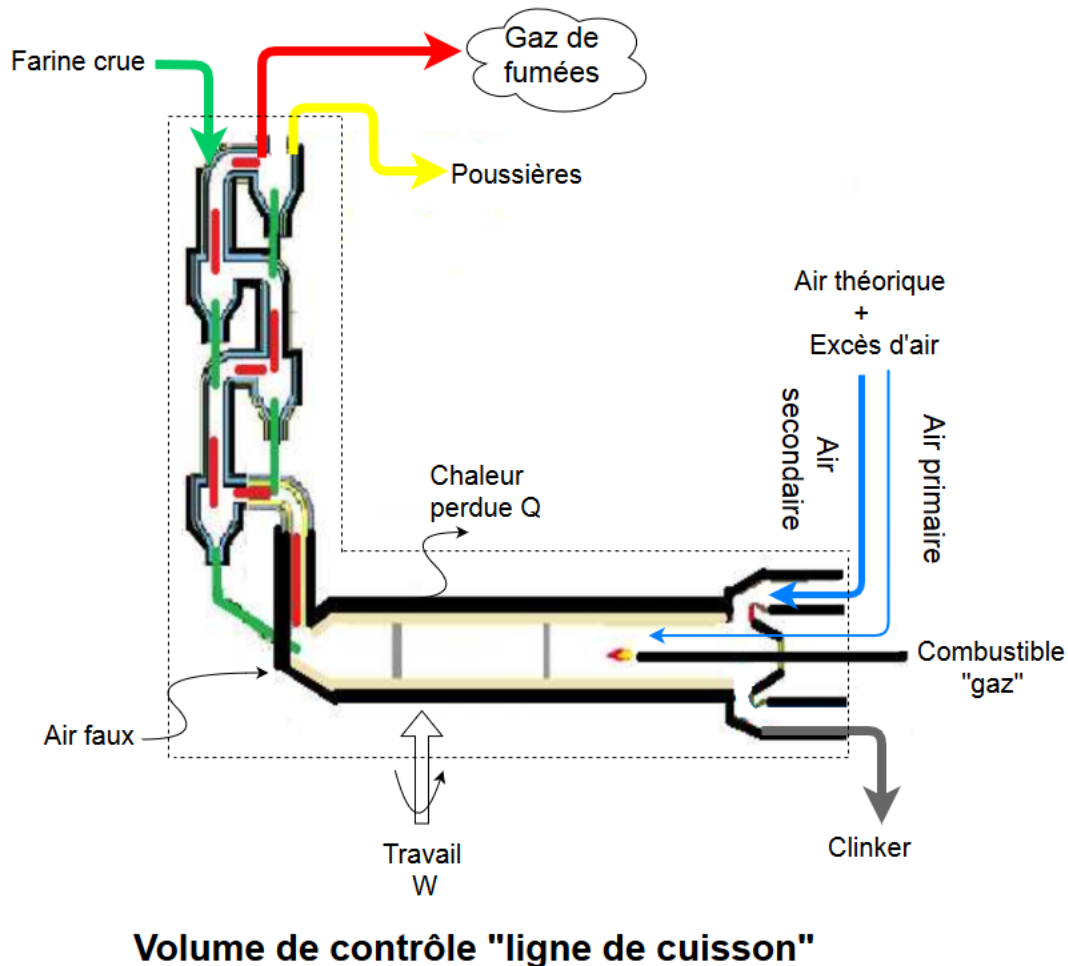
Les coefficients a, b, c et d sont données dans des tables pour chaque type de matériau et de gaz (voir Annexe A, Annexe B)

Les chaleurs de de formations sont obtenues à partir de [13]

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.2.2 Volume de contrôle de la ligne de cuisson

La figure (4.1) représente le volume de contrôle de la ligne de cuisson composée par le four rotatif, la tour de préchauffage et le refroidisseur :



Volume de contrôle "ligne de cuisson"

Figure 4. 1 Schéma représentatif du volume de contrôle de la ligne de cuisson [14]

L'application de la loi de conservation d'énergie (4.2) sur le bilan s'écrit comme suit :

$$\dot{q} - \dot{w} = \dot{m}_{ck}h_{ck} + \dot{m}_{pous}h_{pous} + \dot{m}_{fum}h_{fum} - \dot{m}_{gaz}h_{gaz} - \dot{m}_{far}h_{far} - \dot{m}_{air,th}h_{air,th} - \dot{m}_{air,ef}h_{air,ef} \quad (4.7)$$

Les températures et les débits des flux entrants et sortants sont déterminés dans la partie mesure (voir 4.3). Les enthalpies sont déterminées dans la partie de calcul des enthalpies totales (voir 4.5).

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.2.3 Lois des mélanges

La quantité d'un composant « i » dans un mélange peut être indiquée soit par sa fraction molaire ou bien sa fraction massique. La fraction molaire est définie par le rapport entre le nombre de moles de ce composant et le nombre de moles total dans le mélange. [15]

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (4.8)$$

Une définition analogue pour la fraction massique d'un composant est le rapport entre sa masse et la masse totale du mélange.

$$mf_i = \frac{m_i}{m} \quad (4.9)$$

Elle s'exprime aussi par :

$$mf_i = \frac{n_i M_i}{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \dots} \quad (4.10)$$

La masse molaire moyenne du mélange est donnée par :

$$M = \frac{m}{n} = x_1 M_1 + x_2 M_2 + \dots \quad (4.11)$$

Pour un mélange de gaz parfaits à une température et une pression donnée on a :

Pour chaque composant :

$$PV_i = n_i RT \quad (4.12)$$

Pour le mélange :

$$PV = nRT \quad (4.13)$$

Le rapport de ces deux équations donne :

$$x_i = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} \quad (4.14)$$

La masse volumique du mélange est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{m}{V} = x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2 + \dots \quad (4.15)$$

L'enthalpie totale d'un mélange est donnée par la relation :

$$h = \sum mf_i h_i \quad (4.16)$$

Avec :

$$h_i = h_{f_i}^0 + \Delta h_i \quad (4.17)$$

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.3 Partie mesures

4.3.1 Définition de la période du bilan

Le bilan s'est déroulé sur 5 heures le 30/04/2018. La marche du four était plus au moins stable et caractérisée par une production journalière moyenne de 124.24 t/h. Cette valeur est proche du débit nominal de 3000 t/j (125 t/h).

Le tableau suivant représente les données de base lors du déroulement du bilan, les débits inscrits sont des débits moyens calculés pendant le jour du bilan :

Tableau 4. 1 Paramètres de marche le jour du bilan

Date du bilan	30/04/2018
Durée	5h
Consommation moyenne du gaz naturel (Nm ³ /h)	11963.33
PCI gaz naturel (kJ/kg)	44.698
PCI gaz naturel (GJ/Nm ³)	0.037173
Production moyenne de clinker (t/h)	124.24

Les différentes mesures que nous avons effectuées étaient dans les conditions atmosphériques indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 4. 2 Conditions atmosphériques

Conditions atmosphériques	
Température	$T_0 = 14^\circ\text{C} = 287.15\text{k}$
Pression atmosphérique	$P_0 = P_{atm} = 1\text{atm}$

4.3.2 Mesures de paramètres du bilan

Durant la prise des mesures, un ensemble de paramètres ont été fournis par la salle de contrôle, le profil de température aussi en utilisant un scanner qui donne la variation de la température le long de la virole du four.

Les températures qui ne sont pas fournies par la salle ont été mesurées en utilisant un pyromètre « ULTIMAX » et une caméra thermique « FLUKE ».

Les compositions chimiques ont été fournies par le laboratoire de l'usine.

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.3.2.1 Paramètres du combustible

Les paramètres du gaz consommé lors du bilan ont été pris de la salle de contrôle. Les mesures du débit et de température sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 4. 3 Paramètres du gaz naturel

Paramètres du gaz naturel	
Température	$T_{gaz} = 14^{\circ}\text{C} = 287.15\text{k}$
Débit	$\dot{V}_{gaz} = 11963.33(\text{Nm}^3/\text{h})$
	$\dot{m}_{gaz} = 9829.50(\text{kg}/\text{h})$

4.3.2.2 Paramètres de la farine

Le débit de farine qui alimente le système est délivré à partir de la salle de contrôle, il est mesuré à chaque instant en utilisant des compteurs. La salle ne fournit pas la température de la farine, on l'a mesuré en utilisant un pyromètre.



Figure 4. 2 Pyromètre "ULTIMAX"

Les mesures du débit et de température sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 4. 4 Paramètres de la farine

Paramètres de la farine	
Température	$T_{far} = 56^{\circ}\text{C} = 329.15 (K)$
Débit	$\dot{m}_{far} = 216333.33(\text{kg}/\text{h})$

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.3.2.3 Paramètres de l'air théorique

La quantité d'air théorique est celle calculée sur une base de combustion complète. La température de l'air est celle de l'air ambiant.

Le calcul du débit d'air théorique est développé dans la partie bilan massique (voir 4.4.1). Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau 4. 5 Paramètres de l'air théorique

Paramètres de l'air théorique	
Température	$T_{air,th} = 14^{\circ}\text{C} = 287.15 \text{ K}$
Débit	$\dot{V}_{air,th} = 121822.19(\text{Nm}^3/\text{h})$
	$\dot{m}_{air,th} = 149893.68 (\text{kg}/\text{h})$

4.3.2.4 Paramètres de l'air faux et excès d'air

Le débit d'air faux et excès d'air est calculé en se basant sur l'analyse de l'oxygène contenu dans les fumées. On suppose que cette quantité d'oxygène vient totalement de l'excès d'air et des airs faux car la quantité d'oxygène contenue dans l'air théorique a réagi totalement dans le processus de combustion.

La procédure du calcul est développée dans la partie bilan massique (voir 4.4.2).

Tableau 4. 6 Paramètres de l'air faux et excès d'air

Paramètres d'air faux et excès d'air	
Température	$T_{air,ef(entrée)} = 14^{\circ}\text{C} = 287.15 \text{ K}$
	$T_{air,ef(sortie)} = 338.875^{\circ}\text{C} = 612.025 \text{ K}$
Débit	$\dot{V}_{air,ef} = 64932.19 (\text{Nm}^3/\text{h})$
	$\dot{m}_{air,ef} = 83989.12 (\text{kg}/\text{h})$

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.3.2.5 Paramètres du clinker

Le débit de clinker est obtenu du service de production. Il est donné en fonction de la production journalière et les heures de marche. La température du clinker a été mesurée en utilisant un thermomètre pour plusieurs échantillons.

Les mesures obtenues sont inscrites dans le tableau suivant :

Tableau 4. 7 Paramètres du clinker

Paramètres du clinker	
Température	$T_{ck} = 213.2^{\circ}\text{C} = 486.35\text{ K}$
Débit	$\dot{m}_{ck} = 124240\text{ (kg/h)}$



Figure 4. 3 Mesure de température du clinker



Figure 4. 4 Thermomètre

4.3.2.6 Paramètre de poussières

Une quantité de la farine qui alimente le système sort avec les fumées sous forme de poussières, on estime que sa température est la même que celle des gaz de fumées. La quantité est estimée par le service de production à 12% de la quantité totale de farine.

Tableau 4. 8 Paramètres de poussières

Paramètres de poussières	
Température	$T_{pous} = 338.875^{\circ}\text{C} = 612.025\text{ K}$
Débit	$\dot{m}_{pous} = 25960\text{ (kg/h)}$

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.3.2.7 Paramètres de fumées

La température des fumées a été mesurée dans les conduites principales des fumées derrière la tour de préchauffage, cette mesure est un paramètre de marche pour le contrôleur au niveau de la salle de contrôle.

Le débit des fumées n'est pas mesuré par la cimenterie et on a pas trouvé de moyens de le mesurer donc on était obligé de l'approcher à partir du bilan massique. (Voir 4.4.2)

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau 4. 9 Paramètres des fumées

Paramètres des fumées	
Température	$T_{fum} = 338.875^{\circ}\text{C} = 612.025\text{ K}$
Débit	$\dot{V}_{fum} = 492635.70\text{ (m}^3/\text{h)}$
	$\dot{m}_{fum} = 309845.63\text{ (kg/h)}$

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.4 Bilan massique

Pour l'établissement du bilan massique on considère tout ce qui rentre dans le système est sorti. Le bilan massique du système s'écrit comme suit :

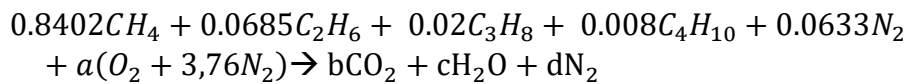
$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (4.18)$$

$$\dot{m}_{gaz} + \dot{m}_{far} + \dot{m}_{air,th} + \dot{m}_{air,ef} = \dot{m}_{ck} + \dot{m}_{pous} + \dot{m}_{fum} \quad (4.19)$$

4.4.1 Détermination de la quantité d'air théorique

Le débit d'air de combustion est calculé en faisant la réaction de combustion du gaz naturel. Cette dernière est considérée complète en se basant sur la composition de la fumée donnée par l'analyseur. Ce dernier indique une valeur nulle pour le monoxyde de carbone « CO », cette valeur est très importante pour l'opérateur responsable de la conduite du four et elle est considérée comme un paramètre de marche.

La réaction de combustion prendra la forme suivante : [16]



On calcule les coefficients a , b , c et d en équilibrant cette réaction de combustion.

Le nombre de moles total du gaz naturel par heure dans les conditions normales est donné par :

$$n_{gaz} = \frac{p_{gaz} \dot{V}_{gaz}}{RT_{gaz}} \quad (4.20)$$

En multipliant l'équation de combustion par le nombre de moles de gaz on obtient le nombre de moles d'air théorique par heure comme suit :

$$n_{air,th} = 4,76 * a * n_{gaz} \quad (4.21)$$

Dans les conditions normales de température et de pression on calcule le débit d'air théorique comme suit :

$$\dot{V}_{air,th} = \frac{n_{air,th} M_{air,th}}{\rho_{air,th}} \quad (4.22)$$

$$\dot{m}_{air,th} = \rho_{air,th} \dot{V}_{air,th} = n_{air,th} M_{air,th} \quad (4.23)$$

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau suivant :

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

Tableau 4. 10 Paramètres de l'air théorique de combustion

Coefficients		Gaz naturel		Air théorique	
a	2.07215	$\dot{V}_{gaz} (\frac{Nm^3}{h})$	11963.33	$n_{air,th} (\frac{kmole}{h})$	51956
b	1.06920	$p_{gaz} (bar)$	1.01325	$M_{air,th} (\frac{g}{mole})$	28.8479
c	2.0059	$T_{gaz} (°C)$	14	$\rho_{air,th} (\frac{kg}{Nm^3})$	1.23043
d	7.854584	$n_{gaz} (\frac{kmole}{h})$	526.79	$\dot{V}_{air,th} (\frac{Nm^3}{h})$	121822.19
$R (\frac{J}{kmole})$	8.314			$\dot{m}_{air,th} (\frac{kg}{h})$	149893.68

4.4.2 Détermination du débit de fumées et du débit d'air faux et excès d'air

Les fumées sont composées des gaz résiduels de la combustion du gaz naturel, de la quantité de CO₂ produite lors du processus de décarbonatation, de la quantité d'air en excès et des airs faux.

On a calculé le débit de fumées sur deux étapes :

Etape1 : Sans considération de l'excès d'air et des airs faux

Tout d'abord on considère que les fumées ne sont composées que des gaz de combustion (CO₂, H₂O et N₂) et du CO₂ produit de la décarbonatation, Cette quantité est représentée par l'indice « *fum, th* » tel que :

$$\dot{m}_{fum,th} = \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{N_2,gaz} \quad (4.24)$$

En ajoutant à cette quantité la quantité d'excès d'air et d'air faux on obtient la fumée totale comme suit :

$$\dot{m}_{fum} = \dot{m}_{fum,th} + \dot{m}_{air,ef} \quad (4.25)$$

En introduisant (4.25) dans (4.19) on peut déduire cette quantité de fumées comme suit :

$$\dot{m}_{fum,th} = \dot{m}_{gaz} + \dot{m}_{far} + \dot{m}_{air,th} - \dot{m}_{ck} - \dot{m}_{pous} \quad (4.26)$$

Etape2 : calcul de l'excès d'air et des airs faux

L'analyseur des fumées à la sortie de la tour de préchauffage donne le pourcentage volumique de l'oxygène contenu dans la fumée totale. Cette quantité d'oxygène vient totalement de l'excès d'air et des airs faux, car selon les valeurs de l'analyseur du CO qui sont nulles, la combustion est complète et donc la quantité d'oxygène de l'air théorique a totalement été consommée.

Remarque : La quantité de fumée « *fum, th* » ne contient pas d'oxygène.

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

$$\%O_2 = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{fum,th} + \dot{V}_{air,ef}} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{fum,th} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{N_2(air,ef)}} \quad (4.27)$$

Avec :

$$\dot{V}_{N_2(air,ef)} = 3.76 \dot{V}_{O_2} \quad (4.28)$$

$$\dot{V}_{fum,th} = \frac{\dot{m}_{fum,th}}{\rho_{fum,th}} \quad (4.29)$$

La masse volumique de « *fum, th* » est calculée en la considérant comme un gaz parfait :

$$\rho_{fum,th} = x_{CO_2}\rho_{CO_2} + x_{H_2O}\rho_{H_2O} + x_{N_2}\rho_{N_2} \quad (4.30)$$

Les fractions molaires x_{CO_2} , x_{H_2O} et x_{N_2} sont calculées sur la base des réactions chimiques produites le long de la ligne cuisson. La procédure du calcul est développée sur Excel.

Donc on peut calculer le volume d'oxygène comme suit :

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{\%O_2 * \dot{V}_{fum,th}}{1 - \%O_2 * 4.76} \quad (4.31)$$

On déduit le débit d'air faux et excès d'air comme suit :

$$\dot{V}_{air,ef} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{0.21} \quad (4.32)$$

$$\dot{m}_{air,ef} = \rho_{air,ef} \dot{V}_{air,ef} \quad (4.33)$$

Donc on a pu évaluer les deux débits manquants dans l'équation du bilan :

- le débit des fumées théorique
- le débit d'air faux et d'excès d'air

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

Tableau 4. 11 Paramètres des fumées et d'air faux et excès d'air

La quantité « fum, th »	$\dot{m}_{fum,th} (\frac{kg}{h})$	225856.51
	$\rho_{fum,th} (\frac{kg}{m^3})$	0,6290
	$\dot{V}_{fum,th} (m^3/h)$	359098.12
Excès d'air et air faux	$\dot{V}_{O_2} (\frac{m^3}{h})$	14883.77
	$\dot{V}_{N_2(air,ef)} (\frac{m^3}{h})$	55991.33
	$\dot{V}_{air,ef} (\frac{m^3}{h})$	70875.10
	$\rho_{air,ef} (\frac{kg}{m^3})$	1.18503
	$\dot{m}_{air,ef} (\frac{kg}{h})$	83989.12
Fumées totales	$\dot{m}_{fum} (\frac{kg}{h})$	309845.63

4.4.3 Résultats bilan massique

Les résultats du bilan massique de la ligne de cuisson sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4. 12 Bilan massique de la ligne de cuisson

	Matière	Débit (Kg/h)
Entrées	Farine crue	216333.33
	Gaz naturel	9829.50
	Air théorique de combustion	149893.68
	Air faux et excès d'air	83989.12
	Total des entrées	460045.63
Sorties	Clinker	124240
	Fumées	309845.63
	Poussières	25960
	Total des sorties	460045.63

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

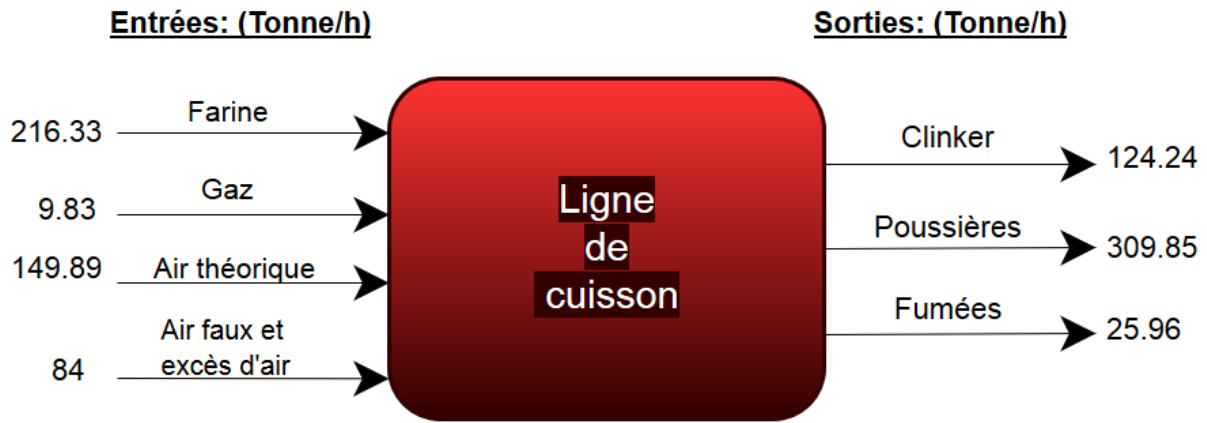


Figure 4. 5 Bilan massique de la ligne de cuisson

4.5 Calcul des enthalpies totales

4.5.1 Calcul de l'enthalpie totale du combustible

Le combustible utilisé dans la cimenterie est le gaz naturel algérien, dont la composition chimique est donnée sur le tableau suivant :

Tableau 4. 13 Composition chimique du gaz naturel Algérien

Composition	$x_i(\%)$	M (kg/Kmole)	$mf_i(\%)$
CH_4	84.02	16.043	72.24
C_2H_6	6.85	30.07	11.04
C_3H_8	2	44.097	4.73
C_4H_{10}	0.8	58.124	2.49
N_2	6.33	28.01	9.50

L'enthalpie totale du gaz naturel est calculée comme suit :

$$h_{gaz} = mf_{CH_4} h_{CH_4} + mf_{C_2H_6} h_{C_2H_6} + mf_{C_3H_8} h_{C_3H_8} + mf_{C_4H_{10}} h_{C_4H_{10}} + mf_{N_2} h_{N_2} \quad (4.34)$$

Avec :

$$h_i = h_{f_i}^0 + \Delta h_i \quad (4.35)$$

$$\Delta h_i = \int_{T_0}^{T_{gaz}} C_{p_i} dT \quad (4.36)$$

$$C_{p_i} = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4.37)$$

« i » représente les composants: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} et N_2

Les coefficients a , b , c et d sont donnés dans la table pour chaque composant (voir Annexe B)

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

Tableau 4. 14 Calcul de l'enthalpie totale du gaz

Composition	$h_f \left(\frac{kJ}{kmole} \right)$	$h_f \left(\frac{kJ}{kg} \right)$	$\Delta h \left(\frac{kJ}{kg} \right)$	$h_i \left(\frac{kJ}{kg} \right)$	$mf_i (\%)$	$h_{gaz} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$
CH_4	-74850	-4665.59	-24.068	-4689.65	72.24	-3868,53
C_2H_6	-84680	-2816.10	-18.796	-2834.89	11.04	
C_3H_8	-103850	-2355.04	-17.779	-2372.81	4.73	
C_4H_{10}	-126150	-2170.36	-18.233	-2188.59	2.49	
N_2	0	0	-11.407	-11.41	9.50	

4.5.2 Calcul de l'enthalpie totale de la farine

Le laboratoire de l'usine fait l'analyse de la farine chaque heure, la composition chimique de la farine le jour du bilan est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 4. 15 Composition chimique de la farine

Composition	$x_i (\%)$	$M (kg/Kmole)$	$mf_i (\%)$
SiO_2	20.01	60.08	13.17
Al_2O_3	3.00	101.96	3.34
Fe_2O_3	1.29	159.69	2.27
$CaCO_3$	70.73	100	77.48
$MgCO_3$	3.80	84.3	3.51
$H_2O_{(g)}$	1.17	18.015	0.23

L'enthalpie totale de la farine est calculée comme suit :

$$h_{far} = mf_{SiO_2} h_{SiO_2} + mf_{Al_2O_3} h_{Al_2O_3} + mf_{Fe_2O_3} h_{Fe_2O_3} + mf_{CaCO_3} h_{CaCO_3} + mf_{MgCO_3} h_{MgCO_3} + mf_{H_2O} h_{H_2O} \quad (4.38)$$

On a utilisé la même procédure pour le calcul des enthalpies h_i des composants du mélange que précédemment (voir 4.5.1) :

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

Tableau 4. 16 Calcul de l'enthalpie totale de la farine

Composition	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$\Delta h(\frac{kJ}{kg})$	$h_i(\frac{kJ}{kg})$	$mf_i(\%)$	-12479.25
SiO_2	-910860	-15160.79	23.852	-15136.93	13.17	
Al_2O_3	-1669800	-16377.01	25.268	-16351.74	3.34	
Fe_2O_3	-824200	-5161.25	20.888	-5140.36	2.27	
$CaCO_3$	-1206900	-12069.00	26.297	-12042.70	77.48	
$MgCO_3$	-1095797	-12998.78	26.002	-12972.78	3.51	
H_2O	-285800	-15864.56	125.430	-15739.13	0.23	

4.5.3 Calcul de l'enthalpie totale de l'air théorique

L'enthalpie totale de l'air théorique est calculée comme suit :

$$h_{air,th} = h_{f_{air,th}}^0 + \Delta h_{air,th} \quad (4.39)$$

Tableau 4. 17 Calcul de l'enthalpie totale de l'air théorique

	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$C_p(\frac{kJ}{kg K})$	$\Delta h_{air,th}(\frac{kJ}{kg})$	$h_{air,th}(\frac{kJ}{kg})$
Air théorique	0	0	1.0064	-11.07	-11.07

4.5.4 Calcul de l'enthalpie totale de l'air faux et excès d'air

L'enthalpie totale de l'air faux et excès d'air se calcule de la même façon que celle de l'air théorique, les deux flux d'air entrent dans le système à la même température avec des débits différents.

$$h_{air,ef} = h_{f_{air,ef}}^0 + \Delta h_{air,ef} \quad (4.40)$$

Tableau 4. 18 Calcul de l'enthalpie totale de l'air faux et excès d'air

	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$C_p(\frac{kJ}{kg K})$	$\Delta h_{air,ef}(\frac{kJ}{kg})$	$h_{air,ef}(\frac{kJ}{kg})$
Air faux et excès d'air	0	0	1.0064	-11.07	-11.07

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.5.5 Calcul de l'enthalpie totale du clinker

Le laboratoire de l'usine fait l'analyse du clinker chaque heure, la composition chimique du clinker le jour du bilan est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 4. 19 Composition chimique du clinker

Composition	$x_i(\%)$	$M (kg/kmole)$	$mf_i(\%)$
SiO_2	22.51	60.08	22.59
Al_2O_3	3.04	101.96	5.18
Fe_2O_3	1.43	159.69	3.81
CaO	73.02	56.08	68.41

L'enthalpie totale du clinker est calculée comme suit :

$$h_{ck} = mf_{SiO_2} h_{SiO_2} + mf_{Al_2O_3} h_{Al_2O_3} + mf_{Fe_2O_3} h_{Fe_2O_3} + mf_{CaO} h_{CaO} \quad (4.41)$$

La même procédure utilisée pour le calcul des enthalpies h_i que précédemment (voir 4.5.1)

Tableau 4. 20 Calcul de l'enthalpie totale du clinker

Composition	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$\Delta h(\frac{kJ}{kg})$	$h_i(\frac{kJ}{kg})$	$mf_i(\%)$	$h_{ck}(\frac{kJ}{kg})$
SiO_2	-910860	-15160.79	170.35	-14990.43	22.59	-12058.60
Al_2O_3	-1669800	-16377.01	173.33	-16203.68	5.18	
Fe_2O_3	-824200	-5161.25	139.78	-5021.47	3.81	
CaO	-635090	-11324.71	156.40	-11168.31	68.41	

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.5.6 Calcul de l'enthalpie totale de la poussière

La poussière est supposée avoir la même composition que la farine.
L'enthalpie totale de la poussière est calculée comme suit :

$$h_{pous} = m_{f_{SiO_2}} h_{SiO_2} + m_{f_{Al_2O_3}} h_{Al_2O_3} + m_{f_{Fe_2O_3}} h_{Fe_2O_3} + m_{f_{CaCO_3}} h_{CaCO_3} + m_{f_{MgCO_3}} h_{MgCO_3} \quad (4.42)$$

Tableau 4. 21 Calcul de l'enthalpie totale de la poussière

Composition	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$\Delta h(\frac{kJ}{kg})$	$h_i(\frac{kJ}{kg})$	$m_{f_i}(\%)$	$h_{pous}(\frac{kJ}{kg})$
SiO_2	-910860	-15160.79	318.17	-14842.61	13.20	-12191.73
Al_2O_3	-1669800	-16377.01	304.96	-16072.05	3.35	
Fe_2O_3	-824200	-5161.25	246.87	-4914.38	2.27	
$CaCO_3$	-1206900	-12069.00	307.37	-11761.63	77.66	
$MgCO_3$	-1095797	-12998.78	263.27	-12735.50	3.52	

4.5.7 Calcul de l'enthalpie totale de la fumée

L'enthalpie totale de la fumée est calculée comme suit :

$$h_{fum} = m_{f_{CO_2}} h_{CO_2} + m_{f_{H_2O}} h_{H_2O} + m_{f_{N_2}} h_{N_2} + m_{f_{O_2}} h_{O_2} \quad (4.43)$$

La même procédure utilisée pour le calcul des enthalpies h_i (voir 4.5.1).

Les fractions massiques m_{f_i} sont données pour chaque composant dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4. 22 Calcul de l'enthalpie totale de la fumée

Composition	$h_f(\frac{kJ}{kmole})$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$\Delta h(\frac{kJ}{kg})$	$h_i(\frac{kJ}{kg})$	$m_{f_i}(\%)$	$h_{fum}(\frac{kJ}{kg})$
CO_2	-393520	-8943.64	313.78	-8629.85	31.80	-3323,22
H_2O	-241820	-13423.26	606.97	-12816.29	6.08	
N_2	0	0	326.09	326.09	56.05	
O_2	0	0	302.00	302.00	6.06	

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.6 Résultats et analyse

4.6.1 Résultats du bilan énergétique

Tableau 4. 23 Bilan énergétique de la ligne de cuisson

		$T(K)$	$\dot{m}(\frac{kg}{h})$	$h(\frac{kJ}{kg})$	$\dot{m} * h(MW)$
Entrées	Farine	329.15	216333.33	-12479.25	-749.91
	Gaz	287.15	9829,50	-3868,53	-10.56
	Air théorique	287.15	149893,68	-11.07	-0.46
	Air faux et excès d'air	287.15	83989,12	-11.07	-0.26
	Total des entrées	/	460045,63	/	-761,19
Sorties	Clinker	486.35	124240	-12058.60	-416.16
	Fumées	612.03	309845,63	-3323,22	-286.02
	Poussières	612.03	25960	-12191.73	-87.92
	Travail	/	/	/	-0.85
	Total des sorties	/	460045,63	/	-790,95

Selon l'équation (4.2) le taux de chaleur total dissipé dans la ligne de cuisson se déduit comme suit :

$$\dot{q} = \sum \dot{m}_s h_{T,p} - \sum \dot{m}_e h_{T,p} + \dot{w} \quad (4.44)$$

A partir des résultats inscrits dans le tableau précédent :

$$\dot{q} = -29.76 (MW)$$

On voit que les déperditions sont de quasiment 30 MW, ce qui représente une quantité d'énergie considérable. Si on essaye de quantifier ces pertes par rapport à la production de clinker, on trouve qu'il y a une dissipation de 0.86 MJ/kg de clinker.

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.6.2 Quantification des pertes

En utilisant nos résultats, on va estimer les pertes thermiques par année :

Tableau 4. 24 Déperditions thermiques lors des années précédentes

Année	\dot{q} (MJ/kg clinker)	Production de clinker (tonne/ans)	\dot{Q}_{annuel} (TJ/an)
2015	0.86	664302	572
2016	0.86	771700	665
2017	0.86	905024	780

En se basant sur les factures du gaz et les consommations thermiques spécifiques des années précédentes on va déterminer le prix équivalent à une unité d'énergie (DA/TJ). En multipliant ce prix par les déperditions thermiques annuelles (\dot{Q}_{annuel}) on déterminera l'équivalent de ces pertes en argent.

Tableau 4. 25 Equivalent des déperditions de chaleur en argent (DA)

Année	Production clinker (t/ans)	Facture du gaz (DA /t ck)	CTS (TJ/t ck)	Prix du gaz (DA/TJ)	\dot{Q}_{annuel} (TJ/ans)	Pertes en Argent (DA /ans)
2015	664302	188.79	$3.93 * 10^{-3}$	48038.59	572.71	27 512 180
2016	771700	227.60	$3.82 * 10^{-3}$	59581.75	665.30	39 639 739
2017	905024	228.29	$3.71 * 10^{-3}$	61533.65	780.24	48 011 013

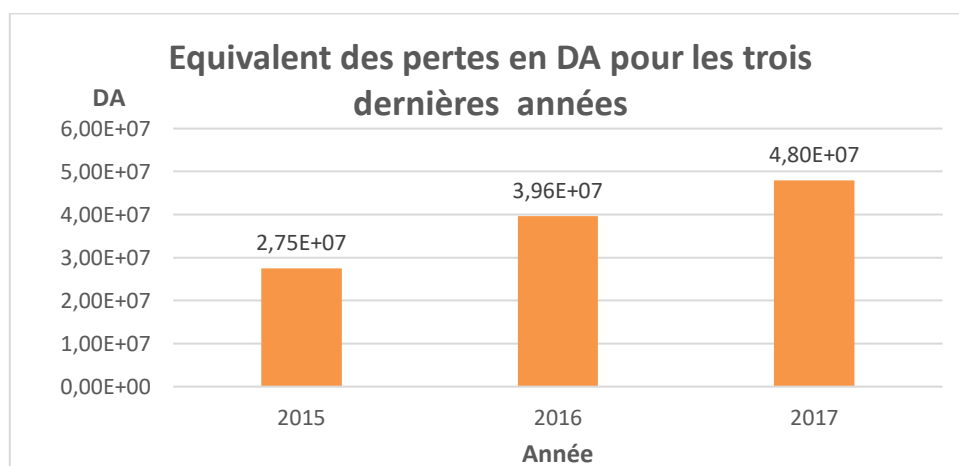


Figure 4. 6 Equivalent des déperditions en argent (DA)

On voit que l'équivalent des pertes en argent est considérable durant les trois dernières années. Pour l'année 2017, une réduction des pertes de 10% aurait permis d'économiser aux alentours de quatre millions de dinars algériens (4 000 000 DA).

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.6.3 Répartition de l'énergie fournie au système

Afin de mieux illustrer ces pertes, on va voir ce qu'elles représentent en termes de pourcentage par rapport à l'énergie totale fournie au système. Pour cela on va utiliser le diagramme de Sankey.

Dans notre représentation, on va considérer les points suivants :

- La température de 25 °C sera prise comme température de référence.
- On considèrera que le gaz et l'air qui entrent à des températures inférieures à 25 °C vont prendre une certaine quantité d'énergie du système pour pouvoir atteindre la température de 25 °C.
- Le gaz fournira une énergie au système qui sera égale au produit de son PCI avec son débit massique.
- L'énergie des produits et des réactifs, sera la chaleur sensible qui sera calculée par rapport à la température de référence.

Tableau 4. 26 Taux d'énergie entrants et sortants de la ligne de cuisson

		$\dot{m}(\frac{kg}{h})$	$\sum \dot{E} (MW)$	%
Energie Entrante	Combustion du gaz	/	122.05	98.06
	Farine	216333.33	1.56	1.26
	Travail	/	0.85	0.68
	Total	/	124.46	100
Energie sortante	Chaleur de clinkérisation	/	57.14	45.91
	Fumées	309845.63	29.07	23.36
	Chaleur dissipée	/	29.75	23.91
	Clinker	124240	5.51	4.43
	Poussières	25960	2.21	1.77
	Air	233882.80	0.72	0.58
	Gaz	9829.50	0.06	0.05
	Total	/	124.46	100

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

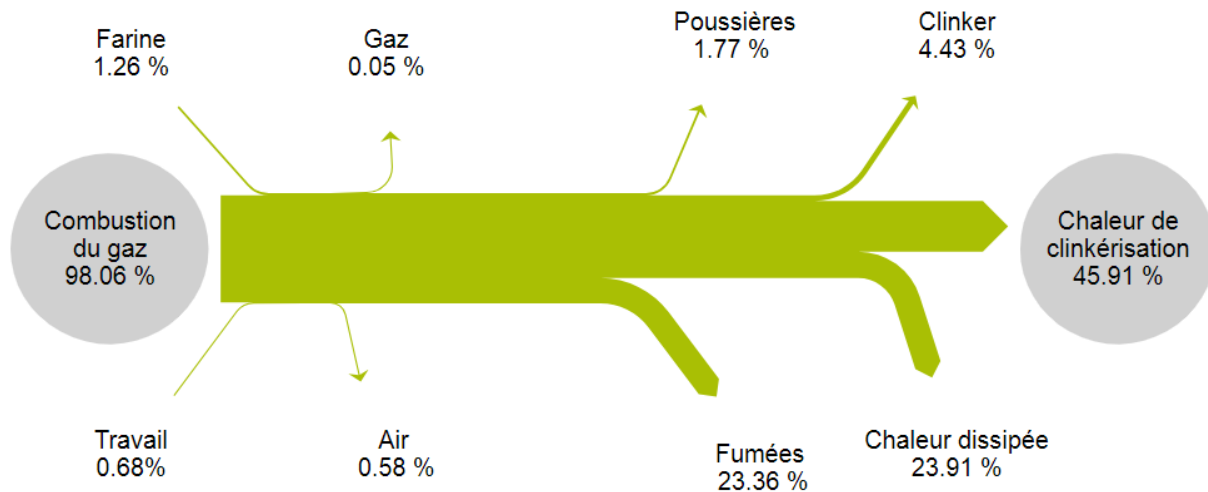


Figure 4. 7 Représentation du bilan énergétique par le diagramme de Sankey

On voit que la quasi-totalité de l'énergie fournie au système provient du gaz naturel, cela veut dire que l'énergie apportée par le travail et la farine est négligeable. Près de la moitié de l'énergie fournie (45.91%) est utilisée pour le processus de clinkérisation. 24% de l'énergie totale fournie est perdue à travers les parois de la ligne de cuisson. Il y a aussi une quantité considérable d'énergie (23.36%) qui est évacuée par les gaz de fumées. Un peu plus de 6% de l'énergie totale est perdue dans le clinker et les poussières.

On peut dire qu'il y a une quantité considérable d'énergie qui n'est pas exploitée.

4.6.4 Estimation de l'énergie perdue à cause des airs faux

Pour quantifier ce que représente ces airs faux en termes d'énergie, on a estimé leur quantité :

Dans le chapitre 5, on a calculé le débit d'excès d'air et d'air faux « $\dot{m}_{air\ faux}$ » et en approchant la quantité d'excès d'air à 10 % d'air théorique, on aura :

$$\dot{m}_{air\ faux} = \dot{m}_{air,ef} - 0.1\dot{m}_{air,th} \quad (4.45)$$

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 4. 27 Estimation de l'énergie perdue par air faux

$\dot{m}_{air\ faux} (kg/h)$	$T_{entrée}(K)$	$T_{sortie}(K)$	$\Delta h (kJ/kg)$	$\dot{E} (kW)$	$\dot{E} (MW)$
68999.75	287.15	612.03	345.40	6620.10	6.62

On trouve que la quantité d'énergie qui est perdue à cause des airs faux, représente 5.32 % de l'Énergie totale fournie au système. Donc c'est un problème important qu'il faut traiter.

Ces airs faux conduisent à une diminution de température à l'intérieur du système qu'on est obligé de compenser par une surconsommation de gaz.

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.7 Problématiques environnementales

4.7.1 Introduction

Il existe différentes problématiques environnementales issues des processus de fabrication du ciment, mais elles dépendent en grande partie des matières premières et des combustibles utilisés, ainsi que des processus mis en œuvre dans ladite industrie.

Les aspects environnementaux associés à l'industrie du ciment peuvent être divisés en deux groupes : ceux qui sont associés à l'étape d'extraction des matières premières et ceux qui sont associés aux étapes de production du clinker et du ciment.

Les aspects environnementaux associés à l'extraction des matières premières regroupent principalement la détérioration des paysages et du milieu naturel, le bruit, les vibrations et la poussière produite par les explosions, et les activités de la carrière elle-même

Les principaux aspects environnementaux associés à la production de clinker et de ciment sont les émissions dans l'atmosphère (poussière, NOx, SO2 et principalement le CO2).

4.7.2 Gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre possèdent la propriété de capter le rayonnement infrarouge émis par la surface du globe terrestre, réchauffé par incidence du rayonnement solaire. Ce phénomène naturel est celui qui a permis que les conditions de température dans la troposphère (partie basse de l'atmosphère) conviennent au développement de la vie sur Terre, être humain compris.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre provoquée par les activités humaines (combustibles fossiles, agriculture et élevage) déséquilibre le bilan du rayonnement thermique entre le soleil et la Terre ; c'est-à-dire qu'elle modifie le bilan entre le rayonnement solaire qui arrive sur la Terre et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace. En résumé, il est possible d'affirmer que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre entraîne le globe terrestre à émettre moins d'énergie vers l'espace et que, par conséquent, la quantité d'énergie présente dans l'atmosphère augmente. Cela provoque une augmentation des températures de l'atmosphère et des océans, ce qui affecte le régime des pluies, le développement des forêts et l'environnement dans son ensemble. [5]

4.7.3 Protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto de 1997 a pris le nom de la ville japonaise où fut célébrée la conférence des parties de la Convention à la fin de ladite année.

Le protocole de Kyoto définit un partage international de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour trente-huit pays, afin d'atteindre un objectif de réduction d'au moins 5 % des émissions conjointes de ces pays, par rapport aux émissions de 1990, pendant une période d'engagement comprise entre 2008 et 2012. [5]

Les gaz à effet de serre concernés par le protocole de Kyoto sont au nombre de six :

-Le dioxyde de carbone (CO₂) ;

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

- Le méthane (CH_4) ;
- L'oxyde nitreux (N_2O) ;
- L'hexafluorure de soufre (SF_6) ;
- Les hydrofluorocarbures (HFC) ;
- Les perfluorocarbures (PFC).

4.7.4 Émissions de la cimenterie

4.7.4.1 Émissions d'oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) sont les oxydes d'azote prédominants dans les gaz émis par le four à ciment. Les oxydes d'azote se forment par la réaction entre l'oxygène et l'azote contenus soit dans l'air de combustion soit dans le combustible.

Donc plus la quantité d'oxygène est importante (l'excès d'air et les airs faux) plus la formation des Nox est importante.

4.7.4.2 Émissions de dioxyde de soufre

Les émissions de dioxyde de soufre dans les cimenteries sont directement liées aux composés soufrés contenus dans les matières premières.

Le dioxyde de soufre (SO_2) est le principal composé soufré émis, bien que de petites quantités de (SO_3) et de (H_2S) soient générées.

Dans la matière première, les composés soufrés sont essentiellement présents sous forme de sulfates (comme par exemple le sulfate de calcium CaSO_4) ou de sulfures (comme par exemple la pyrite, FeS_2).

4.7.4.3 Émissions de CO

L'émission de CO est liée aux matières organiques contenues dans les matières premières et aux conditions du processus de fabrication, elle peut également provenir d'une combustion incomplète du combustible.

4.7.4.4 Émissions de particules (poussière)

Les principales sources de particules émises par les cheminées sont les fours, les broyeurs de cru, les refroidisseurs de clinker et les broyeurs de ciment. Dans tous ces processus, de grands volumes de gaz circulent à travers des matériaux pulvérulents et, par conséquent, ces gaz se chargent en particules et doivent donc être dépoussiérés. L'émission des particules du four dépend uniquement de l'efficacité du dépoussiérage.

La conception et la fiabilité des filtres électrostatiques modernes et des filtres à manches garantissent que les particules émises peuvent être réduites à un niveau non significatif (la SCSEG s'est équipée récemment par un filtre à manche ce qui a réduit les l'émission des poussières d'une façon remarquable).

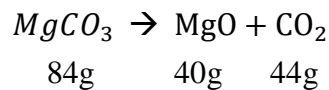
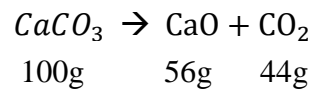
Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

4.7.4.5 Emissions de CO₂ dans les cimenteries :

Le CO₂ provient principalement de deux sources complémentaires :

La dépense d'énergie liée à la nécessité de produire de très hautes températures pour réaliser le processus physicochimique.

Le phénomène de transformation du calcaire (CaCO₃) et le carbonate de magnésium (MgCO₃) sous l'effet de la chaleur en chaux (CaO) et en oxyde de magnésium (MgO) respectivement. La grande partie des émissions de (CO₂) lors de la fabrication du ciment provient de ces réactions de décarbonatation.



4.7.5 Composition des fumées émises par la cimenterie SCSEG

Les principaux composants des gaz de combustion d'un four à ciment sont les suivants : l'azote de l'air de combustion, le CO₂ provenant de la décarbonatation du CaCO₃ et de MgCO₃ et de l'oxydation du combustible, la vapeur d'eau issue de la combustion et des matières premières, et l'oxygène contenu dans l'excès d'air et l'air faux.

En se basant sur les résultats du bilan énergétique, on peut représenter la composition de fumées émises par le four. L'émission des polluants (NO_x, SO₂...) est faible par rapport aux autres constituants.

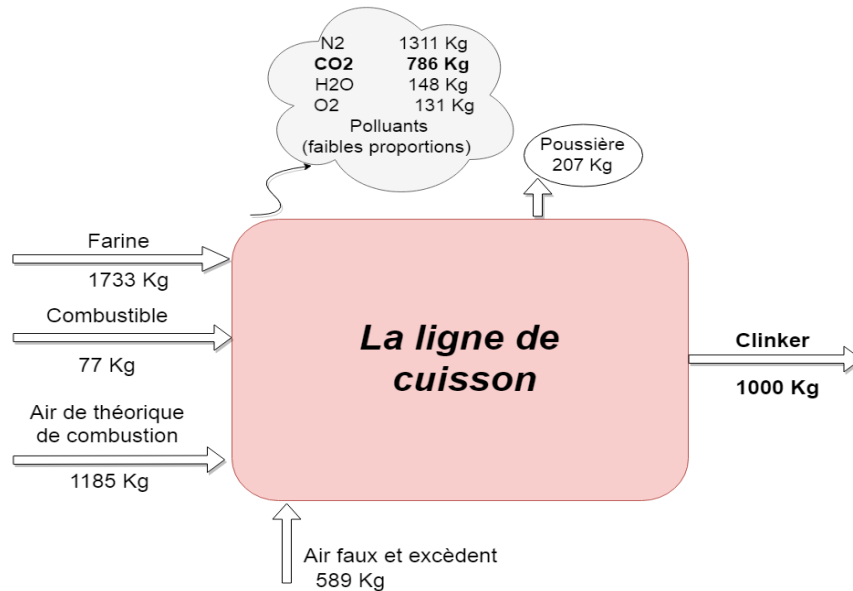
Tableau 4. 28 Composition de fumées émises par le four de la cimenterie SCSEG

Composant	% en volume
Azote (N ₂)	55.82
Dioxyde de carbone (CO ₂)	32.08
Vapeur d'eau (H ₂ O)	6.06
Oxygène (O ₂)	6.04
Polluants inclus	Proportions faibles

On n'a pas pu mesurer la composition des polluants car les analyseurs concernés par ces mesures ne sont pas en marche.

Voici un bilan massique de la ligne de cuisson pour une tonne de clinker représentant les proportions et la composition des fumées émises dans l'atmosphère :

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson



Bilan massique de la ligne de cuisson pour une tonne de clinker

Figure 4. 8 Bilan massique de la ligne de cuisson pour une tonne de clinker

On constate que pour produire une tonne de clinker il y a 786 kg (0.786 tonne) de CO₂ émis ce qui confirme que le secteur cimentier participe par une quantité importante dans les émissions de gaz à effet de serre.

Voici un schéma représentant les quantités de CO₂ émises selon les sources d'émission :

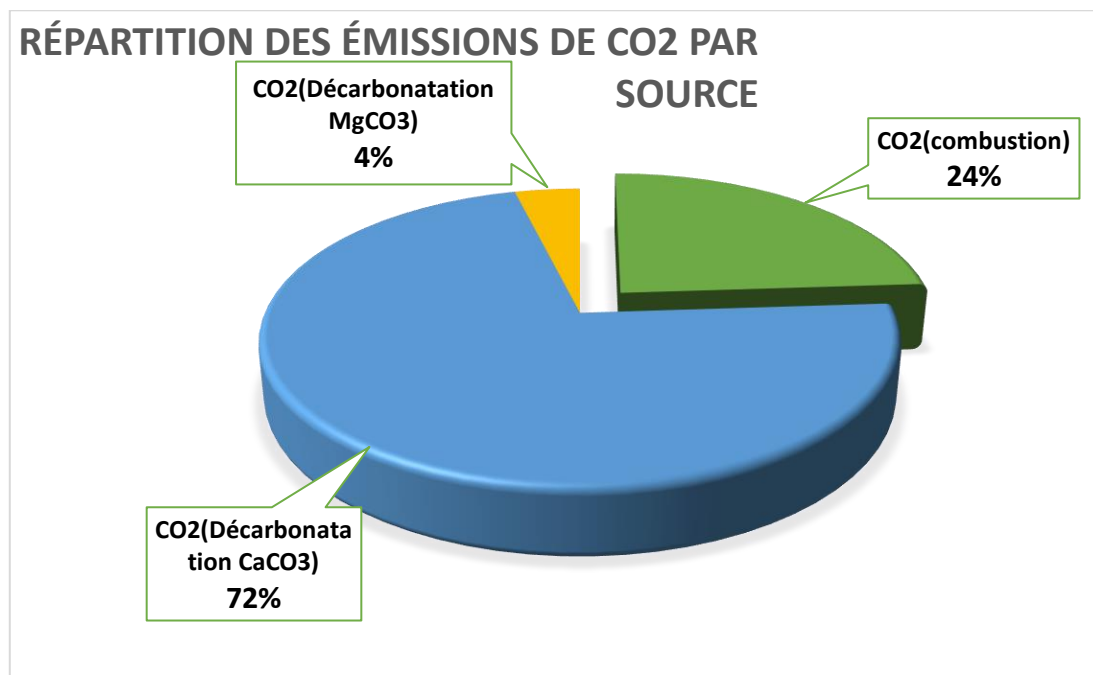


Figure 4. 9 Emission de CO₂ par source

Chapitre 4 : Bilan énergétique de la ligne de cuisson

On remarque que 76% des émissions de CO₂ viennent de la décarbonatation du calcaire et carbonate de magnésium, principalement du calcaire car il est le composant principale de la matière à cuire (77% de la masse totale).

En deuxième lieu le combustible participe par 24% des émissions de CO₂.

4.7.6 Actions pour réduire les émissions

De nombreuses solutions permettant de réduire les émissions de CO₂ peuvent être mises en œuvre pour la cimenterie :

-La réduction de l'énergie nécessaire à la fabrication d'une tonne de ciment.

-La réduction du CO₂ issu de la consommation de combustibles fossiles en les remplaçant par des déchets : toute utilisation de déchet comme combustible pour la fabrication de ciment est une « valorisation », car elle économise l'énergie et diminue ainsi les émissions de CO₂.

-La réduction du CO₂ de décarbonatation, soit par remplacement d'une partie de la matière à cuire par des produits déjà décarbonatés, soit par ajout après cuisson d'autres matières (laitiers de haut-fourneau), réduisant en cela d'autant les quantités de matières à cuire.

4.7 Conclusion

Comme on l'a illustré dans le diagramme de Sankey près de 50% de l'énergie fournie à la ligne de cuisson est soit perdue à travers les parois ou bien évacuée par les gaz de fumées.

Dans le chapitre 6 on essayer de localiser les zones où les pertes thermiques sont les plus importantes dans la ligne de cuisson pour apporter des solutions.

Dans le chapitre 7 on va proposer des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de l'atelier de cuisson.

Concernant la problématique environnementale, il existe plusieurs façons de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂), dont les principales sont : la réduction de la consommation spécifique, le remplacement des combustibles fossiles par des déchets et la réduction du CO₂ de décarbonatation par remplacement d'une partie de la matière à cuire par des produits déjà décarbonatés.

Chapitre 5

Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

5.1 Introduction

Après avoir déduit les déperditions thermiques de la ligne de cuisson en utilisant le bilan énergétique, on voudrait maintenant localiser les secteurs où les pertes sont les plus importantes. Pour cela, on va estimer ces pertes pour les principaux compartiments de la ligne de cuisson (four, ballonnets et cyclones) en calculant par des corrélations les taux de chaleur qui se dissipent à travers les parois.

5.2 Partie théorique

On introduit d'abord, le modèle utilisé pour calculer le taux de chaleur traversant des murs accolés possédant différentes conductivités thermiques ' λ '. Si les faces intérieures et extérieures sont en contact de fluides et que l'on considère qu'ils échangent par convection seulement, le modèle est comme suit :

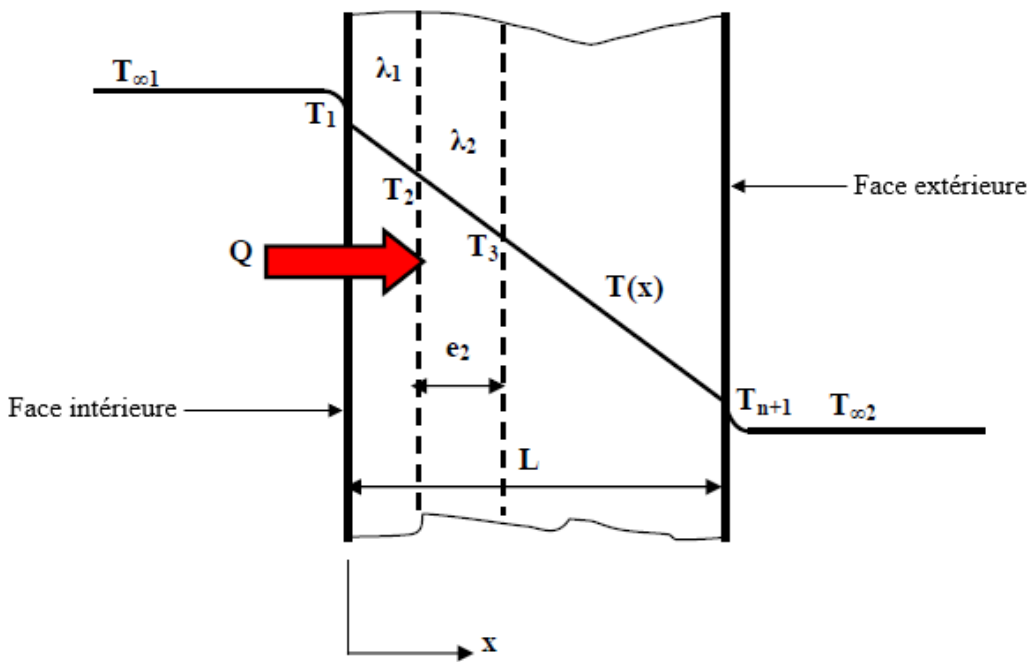


Figure 5. 1 Distributions de températures dans des murs accolés à faces non isothermes

En régime permanent, le taux de chaleur qui traverse les différents murs se conserve, il est calculé comme suit : [17]

$$\dot{q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{CV1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{CD1}} = \dots = \frac{T_{n+1} - T_{\infty 2}}{R_{CV2}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{CV1} + \sum_{i=1}^n R_{CDi} + R_{CV2}} \quad (5.1)$$

Avec :

R_{CDi} : c'est la résistance conductive du mur 'i' : $R_{CDi} = \frac{e_i}{\lambda_i S_i}$

R_{CV1} et R_{CV2} sont les résistances convectives au niveau des surfaces intérieure et extérieure :

$$R_{CV1} = \frac{1}{h_{cv1} S_1} \text{ et } R_{CV2} = \frac{1}{h_{cv2} S_2}$$

h_{cv} représente le coefficient d'échange convectif entre le fluide et la surface du mur.

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

$T_{\infty 1}$ et $T_{\infty 2}$ sont respectivement les températures des fluides à la face intérieure et à la face extérieure.

Dans nos calculs, on adoptera cette approche, c'est-à-dire que l'on considèrera que le taux de chaleur sortant se conserve à travers les différents murs jusqu'à ce qu'il se dissipe dans l'atmosphère.

On n'a pris en considération que les principaux éléments de la ligne de cuisson qui sont :

- **Les ballonnets du refroidisseur,**
- **Le four rotatif**
- **Les Cyclones de la tour de préchauffage.**

On n'a considéré que ces éléments, car ils représentent la majorité de la surface d'échange. Les pertes provenant des différentes conduites et gaines de liaison n'ont pas été considérées.

Pour chaque élément, on adoptera le modèle thermique de la figure 5.1 présentée précédemment tel que :

- En plus du taux de chaleur dissipé par convection, il faudra rajouter le taux dissipé par rayonnement.
- Les différents murs se trouvant entre la surface intérieure et la surface extérieure représentent les différentes couches d'isolation de l'élément.
- $T_{\infty 1}$ représente la température du milieu à l'intérieur de l'élément.
- $T_{\infty 2}$ représente la température de l'air ambiant à l'extérieur de l'élément.

Pour mieux illustrer les choses, on prend l'exemple du four rotatif qui est représenté comme le montre la figure 5.2 ci-dessous :

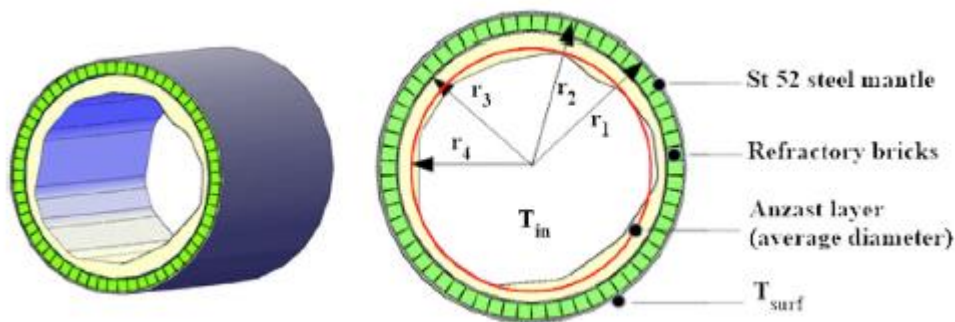


Figure 5. 2 Représentation des briques réfractaires et du croutage à l'intérieur du four [12]

A travers cette figure, on voit qu'il y a 3 couches d'isolation qui sont :

- Le croutage (Anzast layer) : couche de matière collé sur la paroi
- Les briques réfractaires (Refractory bricks)
- L'épaisseur de la virole du four (steel mantle)

Ces 3 couches d'isolation représentent selon notre modèle 3 murs de conductivité thermique différente.

T_{in} est la température du milieu à l'intérieur du four.

T_{surf} est la température de la surface extérieure du four.

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

Et la dissipation de chaleur de l'intérieur du four jusqu'à l'extérieur se produit comme suit :

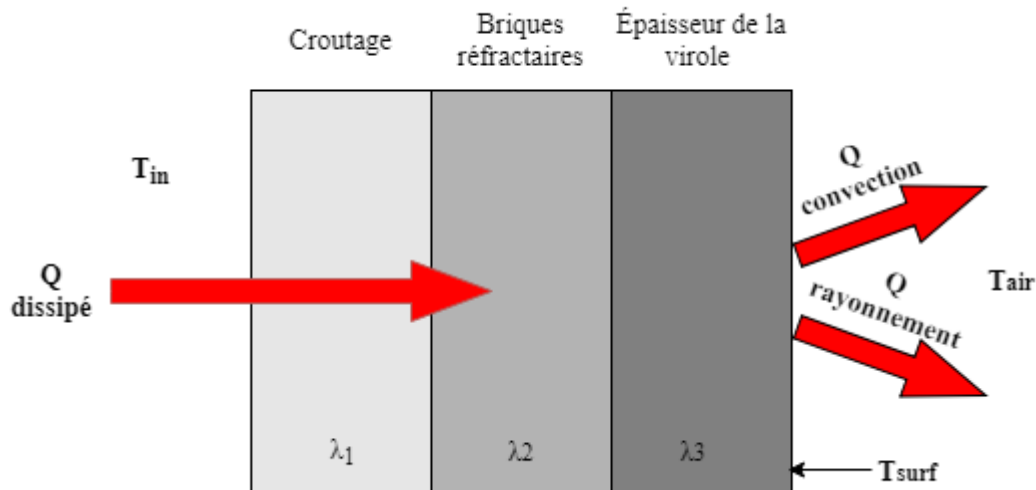


Figure 5. 3 Dissipation de chaleur à travers la paroi du four

5.2.1 Calcul du taux de chaleur dissipé

En se basant sur l'équation (5.1), il nous suffit d'avoir la température à la surface extérieure de la paroi et la température de l'air ambiant pour pouvoir déterminer le taux de chaleur qui se dissipe vers l'extérieur.

Cette méthode est valable pour tous les éléments de la ligne de cuisson que nous avons considérés, qui sont les ballonnets, le four et les cyclones, il suffit juste d'avoir les données nécessaires.

le taux de chaleur dissipé est calculé comme suit :

$$\dot{q} = \dot{q}_{cv} + \dot{q}_r \quad (5.2)$$

5.2.2 Calcul du taux de chaleur dissipé par convection « \dot{q}_{cv} »

On sait que :

$$\dot{q}_{cv} = h_{cv}S(T_s - T_{\infty}) \quad (5.3)$$

Il suffit donc de calculer le coefficient d'échange convectif « h_{cv} »

5.2.2.1 Calcul du coefficient d'échange convectif « h_{cv} »

Le coefficient d'échange convectif est calculé par des corrélations qui se basent sur des nombres adimensionnels. Ces méthodes permettent d'avoir un coefficient d'échange convectif moyen « $\overline{h_{cv}}$ » pour une surface donnée.

Le coefficient d'échange moyen « $\overline{h_{cv}}$ » pour un cylindre horizontale est obtenu par la relation suivante :

$$\overline{Nu} = \frac{D \overline{h_{cv}}}{\lambda} \quad (5.4)$$

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

Le coefficient d'échange moyen « $\overline{h_{cv}}$ » pour un cylindre verticale est obtenu par la relation suivante :

$$\overline{Nu} = \frac{L \overline{h_{cv}}}{\lambda} \quad (5.5)$$

Le nombre de Nusselt est obtenu par des corrélations qui utilisent d'autres nombres adimensionnels. Ces corrélations dépendent du type de cylindre (horizontal ou vertical) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

Dans nos calculs, on a utilisé 2 types de corrélations, une corrélation du cylindre horizontal pour les ballonnets et le four et une corrélation du cylindre vertical pour les cyclones.

5.2.2.2 Coefficient d'échange convectif du four et des ballonnets

Comme le four et les ballonnets sont en rotation, cela veut dire qu'il y a à la fois la convection forcée et la convection naturelle.

Pour savoir si c'est un problème mixte ou bien s'il y a un type de convection qui est négligeable devant l'autre, on calcule le nombre Richardson « Ri », qui est défini par : [18]

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (5.6)$$

Tel que :

- Pour : $Ri \ll 1$, on a affaire à un problème de convection forcée avec $\overline{Nu} = \overline{Nu}(Re, Pr)$
- Pour : $Ri \gg 1$, on a affaire à un problème de convection naturelle avec $\overline{Nu} = \overline{Nu}(Gr, Pr)$
- Pour : $Ri \approx 1$, le problème est lié à la convection mixte et $\overline{Nu} = \overline{Nu}(Re, Gr, Pr)$

Avec :

- Le nombre de Grashof pour un cylindre :

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \quad (5.7)$$

En sachant que le coefficient d'expansion thermique β est défini par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_P \quad (5.8)$$

Pour un gaz parfait ($P = \rho RT$) :

$$\left(\frac{d\rho}{dT} \right)_P = \frac{P}{R} \left(-\frac{1}{T^2} \right) \quad (5.9)$$

Donc
$$\beta = \frac{P}{\rho R} \left(\frac{1}{T^2} \right) = \frac{1}{T} \quad (5.10)$$

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

- Le nombre de Reynolds pour un écoulement autour d'un cylindre :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (5.11)$$

- Le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (5.12)$$

Remarque : Tous ces paramètres (λ , β , C_p ...) sont calculés à la température de film « T_f »

Avec :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (5.13)$$

Après avoir calculé le nombre de Richardson pour les ballonnets et le four (tableau 5.2 et 5.4), on a trouvé que les valeurs de Ri étaient nettement supérieures à 1 et donc que la convection forcée était négligeable devant la convection libre.

Le four et les ballonnets sont modélisés en cylindre horizontal. la corrélation suivante a été utilisée pour calculer le nombre Nusselt moyen : [18]

$$\overline{Nu}_D = 0.125 Ra_D^{1/3} \quad \text{avec } 10^7 < Ra_D \leq 10^{12} \quad (5.14)$$

Avec :

$$Ra_D = Gr_D Pr \quad (5.15)$$

5.2.2.3 Coefficient d'échange convectif des cyclones de la tour de préchauffage

Comme les cyclones ne sont pas en mouvement, on a seulement affaire à la convection naturelle.

Pour mieux approcher les choses, on a divisé le cyclone en 3 zones :

- Une partie conique
- Une partie cylindrique
- Une partie conduite cylindrique

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

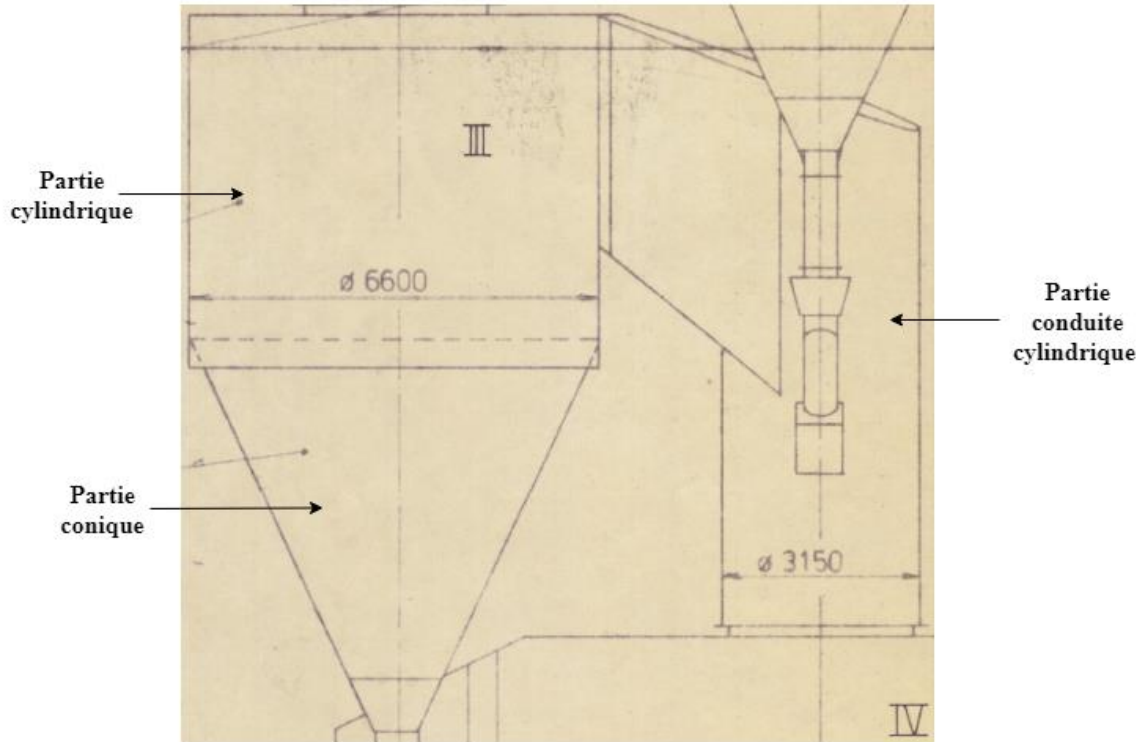


Figure 5. 4 Cyclone du 3ème étage de la tour de préchauffage (voir Annexe C)

On a modélisé la partie conique en un cylindre dont le diamètre est le diamètre moyen du cône. Alors pour les 3 zones on peut utiliser la corrélation du cylindre vertical.

La corrélation utilisée pour le calcul du nombre de Nusselt est la corrélation proposée par Churchill-Chu, elle est valable pour toute la plage du nombre Rayleigh : [18]

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right\}^2 \text{ avec } \frac{D}{L} \geq 35/Gr_D^{1/4} \quad (5.16)$$

Les nombres de Rayleigh (Ra_D) et de Grashof (Gr_D) sont calculés respectivement avec les relations (5.14) et (5.6) définies précédemment à T_f .

5.2.3 Calcul du taux de chaleur dissipé par rayonnement

Comme le four, les ballonnets et les cyclones sont en contact direct avec l'atmosphère, on a utilisé le modèle thermique utilisé pour calculer les pertes radiatives d'un toit de maison avec le ciel. Le taux de chaleur radiatif est calculé par la formule suivante : [19]

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (5.17)$$

Et comme $T_s^4 - T_{sky}^4 = (T_s - T_{sky})(T_s + T_{sky})(T_s^2 + T_{sky}^2)$ (5.18)

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

$$\text{Donc : } \quad \dot{Q}_r = h_r S (T_s - T_{sky}) \quad \text{avec } h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sky}) (T_s^2 - T_{sky}^2) \quad (5.19)$$

T_{sky} : Température du ciel effective (Effective Sky Temperature)

Pour un ciel nuageux, on a utilisé la corrélation de Fuentes :

$$T_{sky} = 0.037536 T_{amb}^{1.5} + 0.32 T_{amb} \quad (5.20)$$

T_{amb} : Température de l'air ambiant

5.3 Partie mesure

Comme pour le bilan énergétique, les mesures ont été prises pour la journée du 30/04/2018.

5.3.1 Profil de température sur la virole du four et des ballonnets

Le profil de température de la surface extérieure du four et des ballonnets est donné par la salle de contrôle. Le profil est donné grâce à un scanner qui balaye toute la longueur du four et des ballonnets :

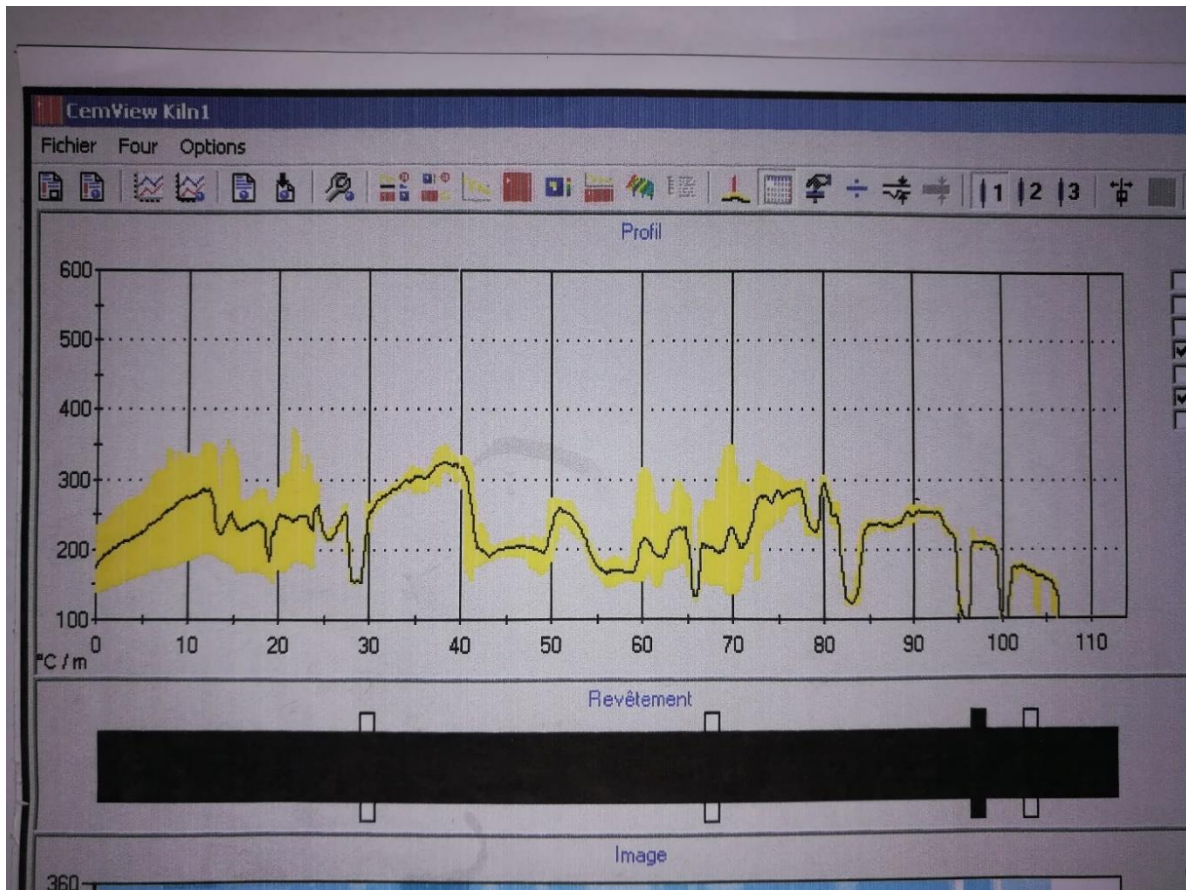


Figure 5. 5 Profil de température Moyenne de la surface du four et des ballonnets

0 à 25 m : c'est le profil de température des ballonnets

25 à 114 m : c'est le profil de température du four

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

Tel que :

- Le point « x= 0 m » représente la section de sortie du clinker du refroidisseur.
- Le point « x=25 m » représente la section où le clinker sort du four et entre dans les ballonnets.
- Le point « x=114m » représente la section d'entrée de la matière dans le four.

Pour être le plus précis possible, on a divisé le profil en plusieurs zones, des zones où la température ne fluctuait pas beaucoup et on a affecté à chaque zone une température moyenne.

6.3.2 Profil de température sur la virole des cyclones

Comme les températures de la surface des cyclones ne sont pas mesurées, on a utilisé une caméra thermique pour voir la distribution des températures sur la surface des cyclones.

La caméra thermique est de marque FLUKE TI125 :



Figure 5. 6 Caméra thermique FLUKE TI125

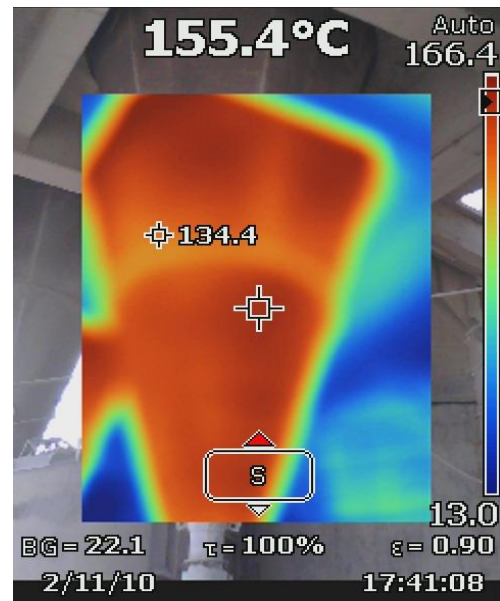


Figure 5. 7 Profil de température de la partie conique du cyclone 51B

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

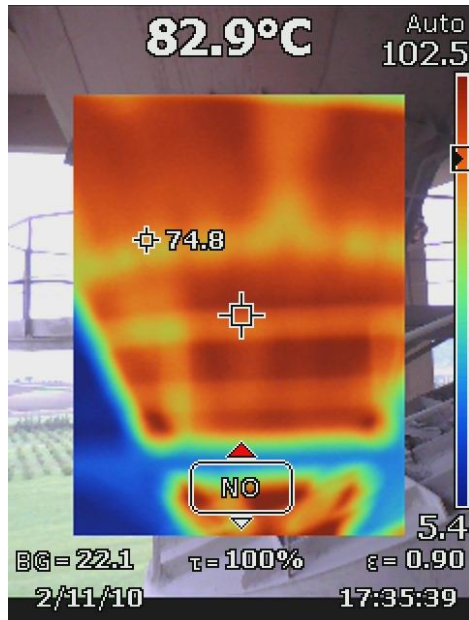


Figure 5. 8 Profil de température de la partie conique du cyclone 52A

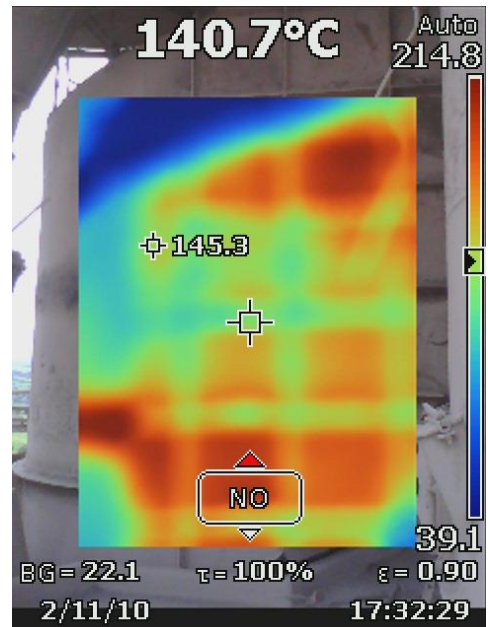


Figure 5. 9 Profil de température de la partie cylindrique du cyclone 53B

Pour chaque partie de cyclone (conique, cylindrique et conduite cylindrique), on a posé une température moyenne.

5.4 Partie calcul

Les calculs ont été effectués dans les conditions suivantes :

Tableau 5. 1 Température de l'air et du ciel pour du 30/04/2018 à la SCSEG

$T_{air} (T_{\infty})$	14 °C	287.15 K
T_{sky}	1.38 °C	274.53 K

5.4.1 Pertes des ballonnets

Comme le scanner de la SCSEG ne permet pas de faire la différence entre les températures de chaque ballonnet, on a pris la même distribution de température moyenne pour tous les ballonnets.

Tableau 5. 2 Chaleur moyenne dissipée par un seul ballonnet

Zones	x_i (m)	x_{i+1} (m)	R_i	T_s (K)	\bar{h}_{cv} (W/K.m ²)	\dot{q}_{cv} (W)	h_r (W/K.m ²)	\dot{q}_r (W)	$\dot{q}_{zone i}$ (W)
1	0.00	5.71	16.40	473.15	7.12	$5.35 \cdot 10^4$	11.42	$9.16 \cdot 10^4$	$1.45 \cdot 10^5$
2	5.71	12.14	19.25	518.60	7.35	$7.73 \cdot 10^4$	13.94	$1.55 \cdot 10^5$	$2.32 \cdot 10^5$
3	12.14	25.0	18.71	509.51	7.31	$1.48 \cdot 10^5$	13.40	$2.86 \cdot 10^5$	$4.34 \cdot 10^5$

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

Tableau 5. 3 Chaleur dissipée par tous les ballonnets

Zones	Li (m)	T _s (K)	$\dot{q}_{zone\ i}$ (W)	$\dot{q}_{zone\ i}$ /mètre (W/m)
1	5.71	473.15	1.45*10 ⁶	2.54*10 ⁵
2	6.43	518.60	2.32*10 ⁶	3.61*10 ⁵
3	12.86	509.51	4.34*10 ⁶	3.38*10 ⁵

La quantité de chaleur dissipée à travers toute la longueur des ballonnets est :

$$\dot{q}_{ballonnets} = (\dot{q}_{zone\ 1} + \dot{q}_{zone\ 2} + \dot{q}_{zone\ 3}) \quad (5.20)$$

$$\text{Donc : } \dot{q}_{ballonnets} = 8.11 \cdot 10^6 \text{ W} = 8.11 \text{ MW}$$

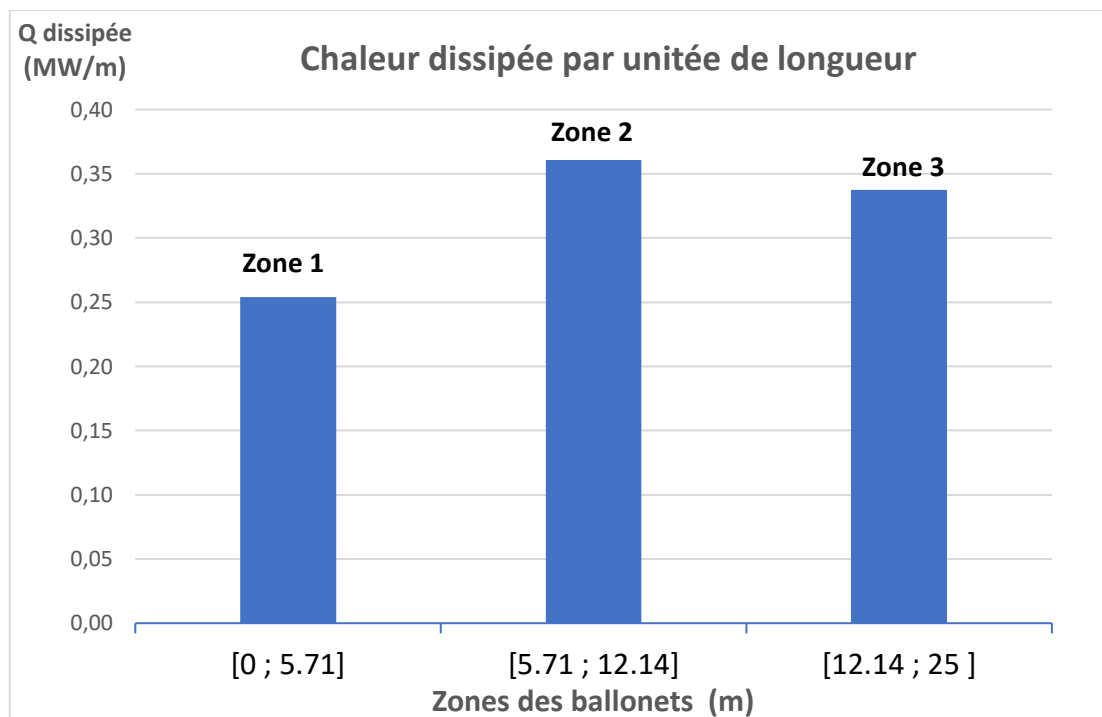


Figure 5. 10 Chaleur dissipée par unité de longueur pour les 3 zones de ballonnets

On voit bien que les zones 2 et 3 sont les zones où les déperditions de chaleur par unité de longueur sont les plus importantes. Les déperditions sont plus élevées dans ces 2 zones à cause :

- Des températures à l'intérieur qui sont nettement supérieures à celles de la zone 1 car lorsque le clinker sort du four il traverse d'abord la zone 3 ensuite la 2 et la 1.
- D'une isolation à l'intérieur des ballonnets qui n'est pas assez bonne.

5.4.2 Pertes du four

Comme pour les ballonnets, on a divisé le four en plusieurs zones où la fluctuation de la température moyenne n'était pas trop importante. On a obtenu les résultats suivants :

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

Tableau 5. 4 Chaleur dissipée à travers la longueur du four

Zones	x_i (m)	x_{i+1} (m)	R_i	L_i (m)	T_s (K)	$\overline{h_{cv}}$ (W/K.m ²)	h_r (W/K.m ²)	$\dot{q}_{zone\ i}$ (W)	$\dot{q}_{zone\ i}$ /mètre (W/m)
1	0	8.57	96.03	8.57	527.70	7.38	14.49	$8.06 \cdot 10^5$	$9.41 \cdot 10^4$
2	8.57	16.07	108.14	7.50	573.15	7.54	17.47	$9.55 \cdot 10^5$	$1.27 \cdot 10^5$
3	16.07	24.29	79.58	8.21	473.15	7.11	11.42	$5.10 \cdot 10^5$	$6.20 \cdot 10^4$
4	24.29	29.29	82.48	5.00	482.24	7.17	11.89	$3.34 \cdot 10^5$	$6.68 \cdot 10^4$
5	29.29	34.29	67.24	5.00	436.79	6.84	9.66	$2.24 \cdot 10^5$	$4.48 \cdot 10^4$
6	34.29	46.43	79.58	12.14	473.15	7.11	11.42	$7.53 \cdot 10^5$	$6.20 \cdot 10^4$
7	46.43	57.14	97.30	10.71	532.24	7.40	14.77	$1.04 \cdot 10^6$	$9.71 \cdot 10^4$
8	57.14	68.93	88.09	11.79	500.42	7.26	12.88	$9.08 \cdot 10^5$	$7.71 \cdot 10^4$
9	68.93	80.36	73.56	11.43	454.97	6.99	10.51	$6.06 \cdot 10^5$	$5.30 \cdot 10^4$
10	80.36	89.00	42.37	8.64	373.15	6.07	7.09	$1.82 \cdot 10^5$	$2.11 \cdot 10^4$

La quantité de chaleur dissipée à travers toute la longueur du four est :

$$\dot{q}_{\text{four}} = \sum_{i=1}^{10} \dot{q}_{\text{zone } i} \quad (5.21)$$

$$\text{Donc : } \dot{q}_{\text{four}} = 6.32 \cdot 10^6 \text{ W} = 6.32 \text{ MW}$$

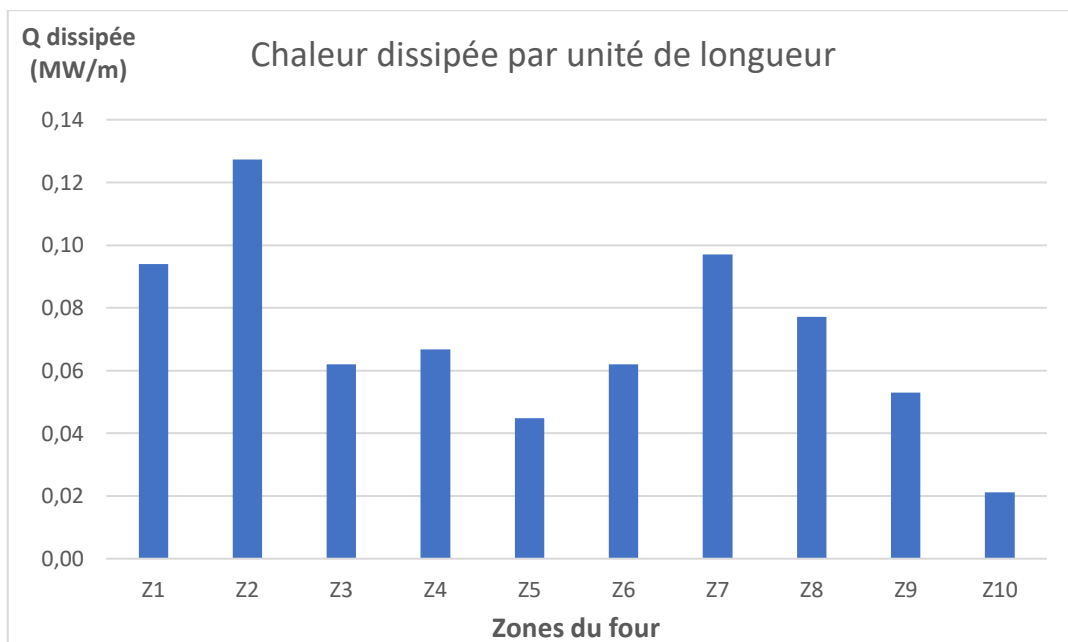


Figure 5. 11 Chaleur dissipée par unité de longueur pour chaque zone du four

On remarque que les déperditions de chaleur par unité de longueur varient d'une zone à une autre. Les déperditions atteignent leur maximum dans la zone 2 avec une valeur proche de 0.13 MW/mètre, car c'est dans cette zone qu'on atteint les températures les plus élevées à l'intérieur du four. La variation des déperditions d'une zone à une autre est due aux raisons suivantes :

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

- Des températures à l'intérieur du four qui varient d'une zone à une autre
- Un croustissage à l'intérieur du four qui n'est pas uniforme et qui varie d'une zone à une autre.
- L'état et la qualité des briques dans chaque zone.

5.4.3 Pertes des cyclones de la tour de préchauffage

Chaque cyclone a été divisé en 3 parties :

- Partie 1 : partie conique
- Partie 2 : partie cylindrique
- Partie 3 : partie conduite cylindrique

On a affecté à chaque partie une température moyenne et on a calculé la chaleur dissipée. Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 5. 5 Chaleur dissipée à travers les cyclones de la tour de préchauffage

Etage	Cyclone	Partie	T_s (K)	$\overline{h_{cv}}$ ($\frac{W}{m^2.K}$)	h_r ($\frac{W}{m^2.K}$)	$\dot{q}_{partie i}$ (W)	$\dot{q}_{cyclone i}$ (W)	$\dot{q}_{Etage i}$ (W)
I	51 A	1	418.15	1.72	8.84	$1.14 \cdot 10^5$	$3.63 \cdot 10^5$	$1.51 \cdot 10^6$
		2	409.15	7.37	8.47	$8.85 \cdot 10^4$		
		3	409.15	1.96	8.47	$1.61 \cdot 10^5$		
	51 B	1	413.15	1.71	8.63	$1.08 \cdot 10^5$	$3.69 \cdot 10^5$	
		2	413.15	7.42	8.63	$9.26 \cdot 10^4$		
		3	413.15	1.97	8.63	$1.68 \cdot 10^5$		
	61 A	1	423.15	1.73	9.06	$1.20 \cdot 10^5$	$4.11 \cdot 10^5$	
		2	423.15	7.53	9.06	$1.03 \cdot 10^5$		
		3	423.15	2.00	9.06	$1.87 \cdot 10^5$		
	61 B	1	413.15	1.71	8.63	$1.08 \cdot 10^5$	$3.69 \cdot 10^5$	
		2	413.15	7.42	8.63	$9.26 \cdot 10^4$		
		3	413.15	1.97	8.63	$1.68 \cdot 10^5$		
II	52 A	1	353.15	2.52	6.41	$6.58 \cdot 10^4$	$3.04 \cdot 10^5$	$5.86 \cdot 10^5$
		2	373.15	6.75	7.09	$1.27 \cdot 10^5$		
		3	373.15	1.82	7.09	$1.11 \cdot 10^5$		
	52 B	1	363.15	2.61	6.74	$7.82 \cdot 10^4$	$2.82 \cdot 10^5$	
		2	363.15	6.55	6.74	$1.09 \cdot 10^5$		
		3	363.15	1.76	6.74	$9.48 \cdot 10^4$		
III	53 A	1	367.15	2.64	6.88	$8.34 \cdot 10^4$	$4.37 \cdot 10^5$	$9.00 \cdot 10^5$
		2	403.15	7.22	8.23	$1.89 \cdot 10^5$		
		3	403.15	1.95	8.23	$1.65 \cdot 10^5$		
	53 B	1	423.15	2.97	9.06	$1.69 \cdot 10^5$	$4.63 \cdot 10^5$	
		2	388.15	7.00	7.64	$1.57 \cdot 10^5$		
		3	388.15	1.89	7.64	$1.37 \cdot 10^5$		
IV	54 A	1	388.15	2.79	7.64	$1.13 \cdot 10^5$	$4.66 \cdot 10^5$	$9.09 \cdot 10^5$
		2	403.15	7.22	8.23	$1.89 \cdot 10^5$		
		3	403.15	1.95	8.23	$1.65 \cdot 10^5$		
	54 B	1	393.15	2.82	7.83	$1.20 \cdot 10^5$	$4.43 \cdot 10^5$	
		2	395.65	7.12	7.93	$1.73 \cdot 10^5$		
		3	395.65	1.92	7.93	$1.50 \cdot 10^5$		

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

La quantité de chaleur dissipée à travers tous les cyclones est :

$$\dot{q}_{\text{Tour}} = \sum_{i=1}^{10} \dot{q}_{\text{dci}} \quad (5.22)$$

$$\text{Donc : } \dot{q}_{\text{Tour}} = 3.39 \cdot 10^6 \text{ W} = 3.39 \text{ MW}$$

Les proportions des pertes par étage et par cyclones sont données par le diagramme ci-dessous :

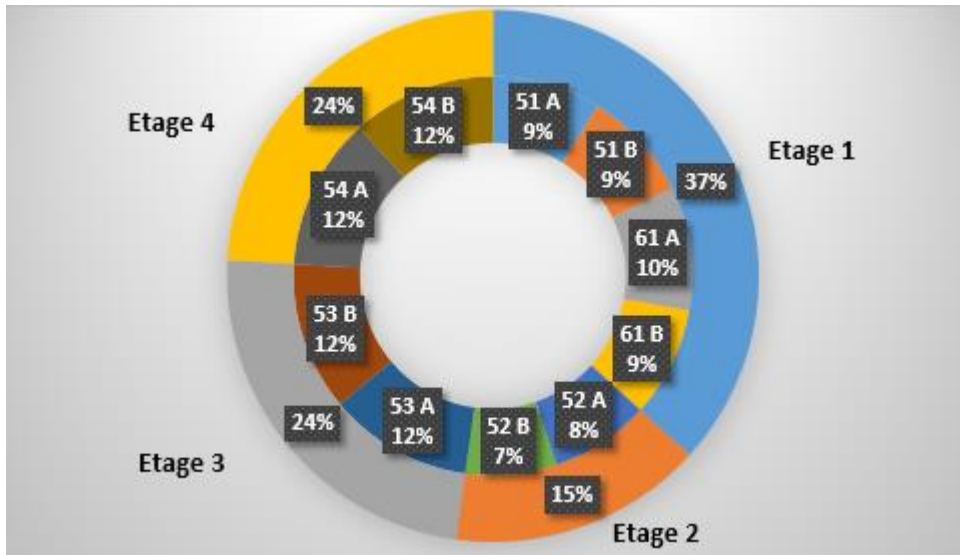


Figure 5. 12 Répartition des pertes thermiques dans la tour de préchauffage

On voit que 37 % des pertes de la tour de préchauffage sont dans le premier étage. Ce qui fait une perte moyenne de près de 10 % par cyclone. Cela veut dire qu'un cyclone du 1^{er} étage perd plus qu'un cyclone du 2^{ème} étage et quasiment presque comme les cyclones du 3 -ème et 4 -ème étages. Ceci est contradictoire avec les températures à l'intérieur des cyclones qui sont les plus basses aux cyclones du premier étage et qui augmente après chaque étage.

Ces résultats s'expliquent par le fait que les cyclones du 1^{er} étage ont une mauvaise isolation.

5.3 Analyses des résultats

Les pertes thermiques sur toute la ligne de cuisson sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. 6 Répartition des déperditions thermiques dans la ligne de cuisson

Partie	\dot{q} (MW)	% \dot{q} ligne de cuisson
Refroidisseur	8.11	45.52
Four rotatif	6.32	35.47
Tour de préchauffage	3.91	19.01
Total	17.82	100.00

Chapitre 5 : Localisation des déperditions thermiques de la ligne de cuisson

La valeur des déperditions totales sur toute la ligne de cuisson est de 17.82 MW. Elle est différente de celle qu'on a trouvée dans le chapitre bilan énergétique qui était de 29.76 MW. Ceci est dû principalement aux raisons suivantes :

- Les estimations sur les températures des différents éléments de la zone de cuisson.
- Les incertitudes des appareils de mesure utilisés.
- L'utilisation de méthodes numériques (corrélations) dans le calcul.
- Le fait de ne pas prendre en considération les pertes dans les conduites et les gaines de liaison.

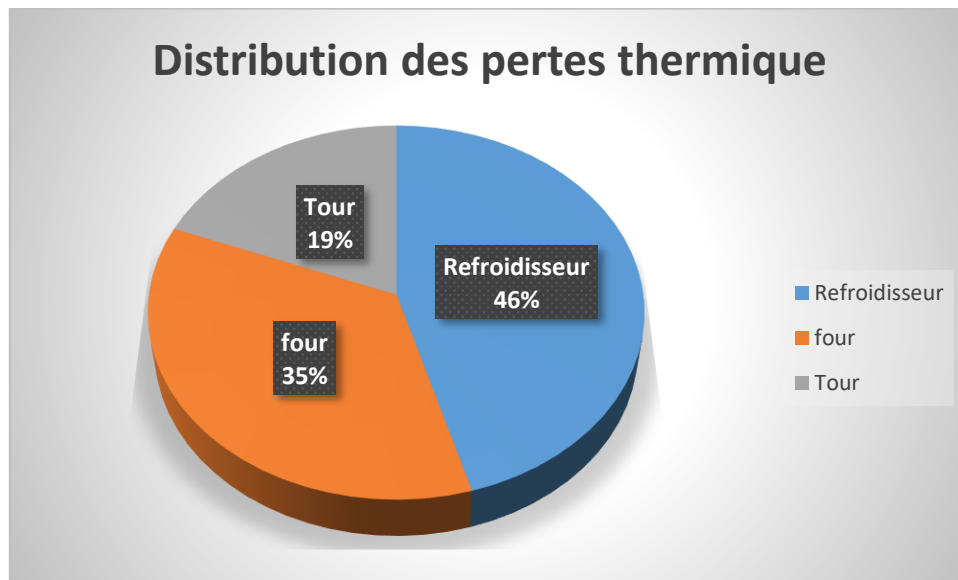


Figure 5. 13 Répartition des pertes thermiques sur les 3 parties de la ligne de cuisson

On a trouvé que 46 % des déperditions thermiques se localisent dans la zone du refroidisseur à ballonnets. C'est la zone qui accuse la plus grande proportion de déperdition dans la ligne de cuisson. Ces pertes sont principalement dues au fait que le clinker entre dans le refroidisseur avec des températures élevées et à l'état des briques réfractaires qui n'arrivent pas à garantir une très bonne isolation.

Les déperditions du four représentent 35 % des déperditions totales. Ce qui est assez considérable. Les températures à l'intérieur du four étant assez importantes, les pertes sont dues à la qualité et à l'état des briques réfractaires utilisées.

La tour de préchauffage représente la zone avec le plus faible taux de déperdition avec une valeur de 19 %. Comme pour le four et le refroidisseur, ces déperditions sont principalement dues à une isolation moyenne à l'intérieur des cyclones notamment pour les cyclones du 1^{er} étage.

5.4 Conclusion

Les résultats trouvés dans ce chapitre nous ont permis de localiser les zones où les déperditions de chaleur sont les plus importantes. Afin de minimiser ces pertes, on va proposer des solutions dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

Recommandation aux problèmes trouvés

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

6.1 Introduction

Les résultats obtenus lors des chapitres précédents montrent d'importantes pertes énergétiques qui se traduisent par des dépenses considérables d'argent, pour cela il est indispensable de chercher les moyens les plus efficaces afin de remédier à cette problématique et d'assurer la réduction des coûts de production.

Dans le chapitre précédent on a aussi pu quantifier et localiser les zones où les déperditions sont les plus importantes dans la ligne de cuisson.

Dans ce qui suit, on va analyser les arrêts de la ligne de cuisson, on va définir les principaux problèmes de ces déperditions et on va proposer des solutions pour essayer de les réduire.

6.2 Causes d'arrêts de la ligne de cuisson

Les arrêts présentent un problème majeur pour la cimenterie, car ils provoquent une augmentation considérable de la consommation spécifique. L'arrêt du four se déroule progressivement, on diminue sa vitesse de rotation tout en continuant à l'alimenter en gaz et ceci sans qu'il produise du clinker, cette procédure est appliquée pour éviter tout type de déformation des matériaux.

Le tableau ci-dessous indique les arrêts de la zone de cuisson, leurs durées et leurs fréquences pour l'année 2017.

Tableau 6. 1 Durées des arrêts imprévus de la ligne de cuisson

Equipement	Fréquence	Durée (heure)	%
Tache rouge	3	302.95	38.74
Travaux sur les ballonnets	4	112.71	14.41
Bourrage cyclone	15	62.07	7.94
Déclenchement ventilateur J1J03	4	51.83	6.63
Déclenchement station gaz	12	40.21	5.14
Déclenchement ventilateur J1J01	9	36.12	4.62
Déclenchement moteurs four	18	34.37	4.39
Déclenchement filtre Redecam	6	26.25	3.36
Reste	/	115.59	14.78
Total	/	782.10	100.00

Le diagramme ci-dessous présente la répartition des durées des arrêts par cause :

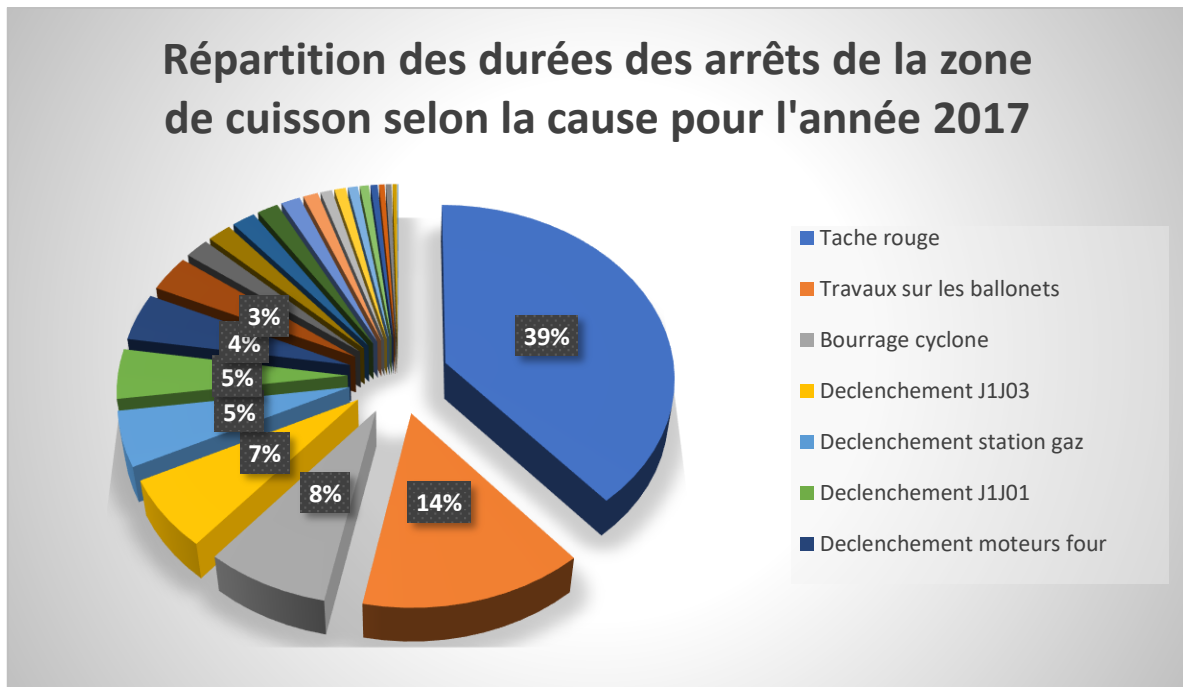


Figure 6. 1 Répartition des durées des arrêts selon la cause pour l'année 2017

On constate que la principale cause d'arrêt est :

L'apparition de taches rouges : C'est un point chaud dû à une augmentation brusque de la température sur une zone de la paroi du four ou des ballonets. Elle est due principalement aux chutes des briques réfractaires dans cette zone. Elle peut conduire à une déformation irréversible de la virole ce qui peut engendrer un arrêt à long terme.

6.3 Localisation des problèmes de la ligne de cuisson et recommandations

A travers notre étude, nous avons localisé les problèmes suivants :

6.3.1 Problèmes liés au refroidisseur

Lors de notre étude on a abouti aux problèmes suivants :

-Pertes thermiques à travers les parois :

On a trouvé qu'une importante quantité de chaleur se dissipait à travers les parois des ballonets, cette quantité représente 44% des pertes thermiques de la ligne de cuisson.

-Température de sortie du clinker élevée :

La température du clinker à la sortie du refroidisseur est de 212 °C ce qui est jugée élevée, ceci se traduit par une trempe non optimale du clinker et une perte considérable d'énergie qui pourrait être transférée à l'air secondaire.

-Tache rouge :

L'apparition des taches rouges oblige à arrêter le four, ce qui conduit à une augmentation de la consommation spécifique.

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

-Travaux sur les ballonnets

C'est la deuxième cause d'arrêt non programmé à cause du manque de fiabilité pour une production au-delà de 2500 tonnes de clinker/jour.

6.3.2 Recommandation pour le refroidisseur

En premier lieu on propose de changer le type de refroidisseur par un refroidisseur à grilles.

6.3.2.1 Installation d'un refroidisseur à grilles

De nos jours, le refroidisseur à grilles est le mieux adapté face au refroidisseur à ballonnets.

La fréquence élevée d'installations de refroidisseurs à grilles confirme cette appréciation.

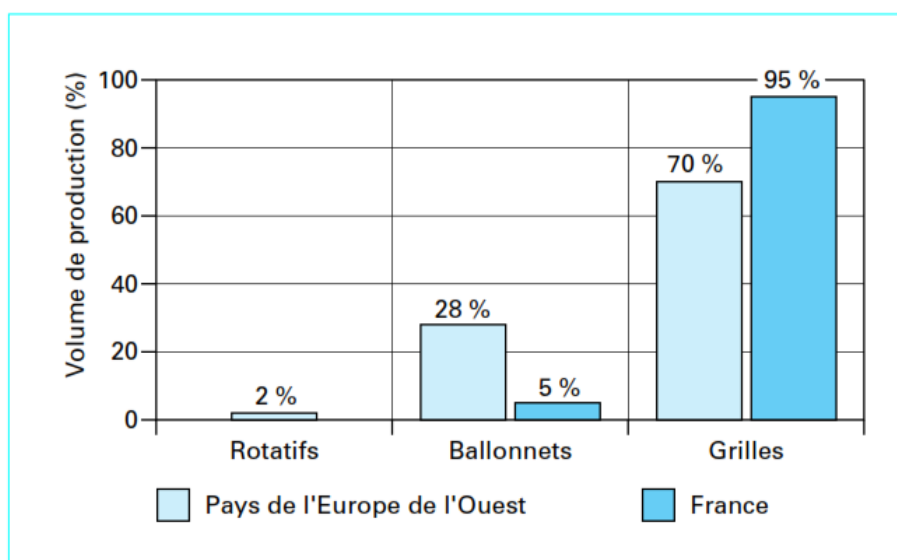


Figure 6. 2 Répartition des refroidisseurs en France et en Europe de l'ouest [11]

L'installation d'un refroidisseur à grilles présente plusieurs avantages par rapport au refroidisseur à ballonnets.

Tableau 6. 2 Comparaison entre le refroidisseur à grilles et à ballonnets [11]

Eléments de comparaison	Refroidisseur à grilles	Refroidisseur à ballonnets
Température de sortie clinker	Faible	Elevée
Type d'échange thermique	Courants croisés	Contrecourant
Rendement (%)	65 à 85	55 à 65
Capacité de production (tonne/jour)	0 à 10 000	0 à 3 000
Flexibilité du débit	Oui	Non
Récupération de gaz chauds de précalcination (air tertiaire)	Possible	Impossible
Récupération de gaz chaud pour les autres ateliers	Possible	Réalisation limitée

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

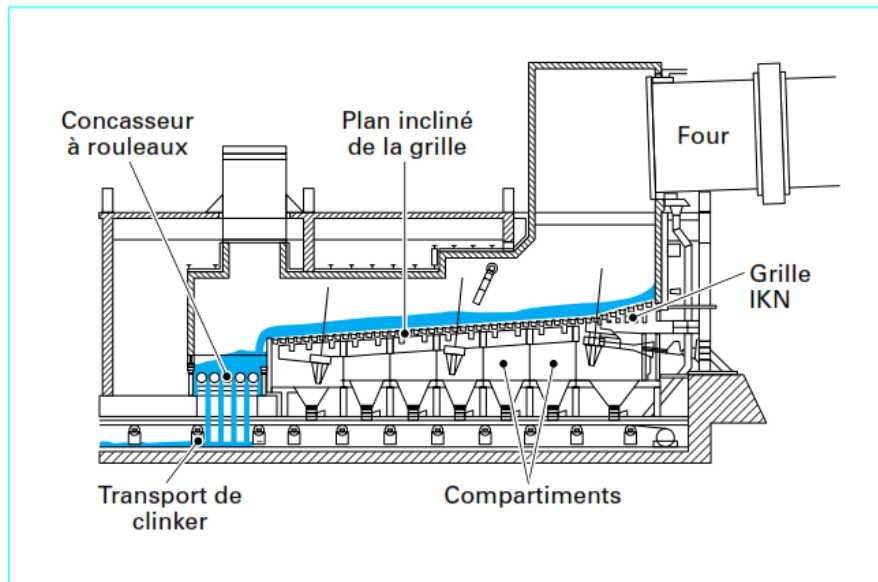


Figure 6. 3 Refroidisseur à grilles [11]

Voici un schéma qui représente les différents flux d'air :

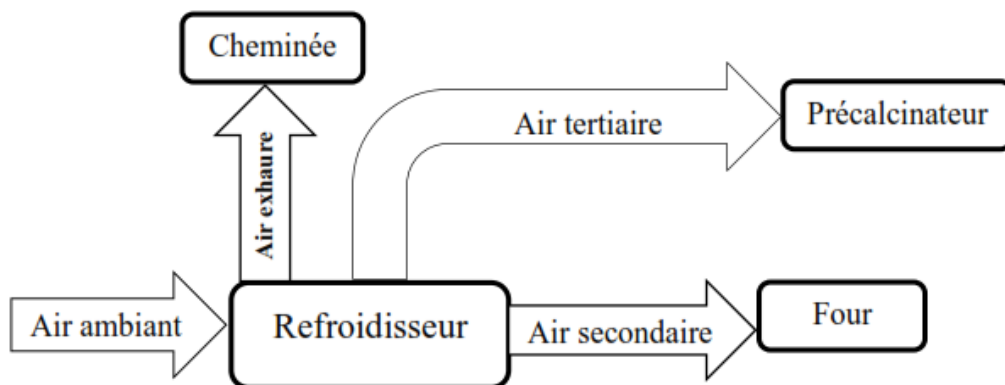


Figure 6. 4 Différents flux d'air dans le refroidisseur à grilles

L'avantage principal du refroidisseur à grille est dans le fait qu'il fournit 3 flux d'air :

- Un flux d'air secondaire, qui est utilisé dans la combustion.
- Un flux d'air tertiaire, qui est utilisé dans la précalcination.
- Un flux d'air exhaure, dont la chaleur peut être récupérée.

6.3.2.2 Améliorations à apporter sur les ballonnets

En second lieu on propose d'effectuer quelques améliorations pour le refroidisseur à ballonnets :

- Installation de ventilateurs pour refroidir les parois des ballonnets.
- Amélioration de l'isolation à l'intérieur des ballonnets.
- Optimiser la fréquence de changement des briques.

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

-Rénovation du système d'injection d'eau pour mieux refroidir le clinker.

6.3.3 Problèmes liés au four

Lors de notre étude on a abouti aux problèmes suivants :

-Pertes thermiques à travers les parois :

Une importante quantité de chaleur se dissipe à travers la virole du four, cette quantité représente 35% des pertes thermiques de la ligne de cuisson.

-Tache rouge

L'apparition des taches rouges provoque un arrêt, ce qui conduit à une augmentation de la consommation spécifique.

6.3.4 Recommandation pour le four

- Remplacer les briques actuelles par des briques ayant une plus faible conductivité thermique.
- Utilisation de deux couches de briques réfractaires, mais en faisant attention à l'épaisseur et au poids des briques à utiliser.
- Optimiser la fréquence de changement des briques, car les briques ont une certaine durée de vie.
- Installation de ventilateurs pour refroidir la virole du four et éviter les points chauds.
- Installation d'une caméra à l'intérieur du four pour détecter les chutes de briques réfractaires, déterminer l'épaisseur du croûtage et vérifier l'état de la flamme.

6.3.5 Problèmes liés à la tour de préchauffage

Notre étude nous a permis de constater les problèmes suivants :

-Pertes thermiques à travers les parois :

Comme on l'a illustré dans le chapitre pertes thermiques, il y a une quantité considérable de chaleur qui est perdue à travers les cyclones, notamment pour les cyclones du 1^{er} étage qui ont une mauvaise isolation.

6.3.6 Recommandation pour les cyclones

- Améliorer l'isolation des cyclones du 1^{er} étage.
- Optimiser la fréquence de changement des briques.

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

6.3.7 Problèmes liés aux airs faux

Les airs faux sont des quantités d'air qui entrent dans le système de façon non contrôlée dans des zones où il y a une mauvaise étanchéité. Ces airs, peuvent représenter une perte d'énergie considérable, car ils prennent de la chaleur du système vers l'extérieur. Dans la partie (voir 4.6.4) on a trouvé que la quantité d'énergie perdue à cause des airs faux était de 6.62 MW ce qui représente 5.32 % de l'énergie totale fournie au système.

Voici quelques zones où l'on a trouvé une mauvaise étanchéité :

- Joint amont du four : on a localisé un problème d'étanchéité considérable au niveau du joint liant la boîte à fumer à l'entrée matière du four.
- Portes visites des cyclones : Il y a aussi des problèmes d'étanchéité au niveau des portes visites des différents cyclones de la tour de préchauffage.



Figure 6. 6 Joint amont du four rotatif



Figure 6. 5 Porte visite d'un cyclone de la tour de préchauffage

6.3.8 Recommandation pour les airs faux

- Amélioration de l'étanchéité du joint amont et des différentes portes de visites des cyclones.
- Installation de systèmes de mesure de l'air primaire et secondaire pour mieux contrôler la quantité d'air faux qui entre dans le système.

6.4 Récupération de chaleur perdue dans les gaz de fumée

A la sortie de la tour de préchauffage, il y a une énergie considérable qui est disponible dans les gaz de fumées, elle représente 23.36 % de l'énergie qui est fournie au système. Une partie de cette énergie est utilisée pour le séchage des matières premières mais sa majorité est perdue et n'est pas exploitée, car après le séchage des matières premières les gaz sont refroidis jusqu'à une température inférieure à 180 °C puis ils traversent un filtre à manche et sont refoulés dans l'atmosphère.

Dans les cimenteries modernes, on a développé des systèmes de récupération de chaleur perdue (WHR). Cette énergie, peut être utilisée dans des systèmes de cogénération pour produire de l'électricité.

Mis à part le fait de l'utiliser pour le chauffage des locaux et de l'eau, il n'y a pas vraiment de besoins de chaleur dans le processus de la cimenterie. C'est pour cela, que la plupart des projets de récupération de chaleur ont pour but la production de l'électricité.

6.4.1 Systèmes de récupération de chaleur dans les cimenteries modernes

Les systèmes de récupération de la chaleur résiduelle utilisés pour les fours à ciment fonctionnent selon le cycle de Rankine. La chaleur des gaz d'échappement sortant de la tour de préchauffage est récupérée au travers de chaudières de récupération afin de produire de la vapeur haute pression. Cette vapeur va entraîner une turbine qui va fournir le travail à l'arbre qui va le transférer au générateur électrique. La vapeur détendue, va ensuite se refroidir au niveau du condenseur. Le condensat est renvoyé à la chaudière de récupération à l'aide de pompes pour s'y évaporer de nouveau, bouclant ainsi le cycle. [1]

Les gaz d'échappements ainsi refroidis sortent du système avec des températures plus basses comprises entre 100 et 150 °C.

Trois systèmes principaux travaillant avec le cycle de Rankine sont utilisés, différenciés par le type du fluide de travail, ils sont résumés dans le tableau suivant :

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

Tableau 6. 3 Comparaison entre les différents cycles de Rankine [1]

Type	Températures des fumées (°C)	Fluide de travail	Spécificités
Cycle de Rankine à vapeur	> 260	Eau	<ul style="list-style-type: none"> - Sur des bases de coût spécifique, généralement les coûts d'installation sont inférieurs à ceux des autres cycles. - Largement disponible auprès de divers fournisseurs. - En général, correspond bien aux grands fours et aux systèmes avec faible teneur en humidité de matière première. - Besoin de chaleur résiduelle à température élevée pour fonctionner de manière optimale.
Cycle de Rankine organique	≥ 150	Fluide organique (butane ou pentane)	<ul style="list-style-type: none"> - Peut utiliser des condenseurs refroidis à l'air sans nuire aux performances. - Les équipements (turbines, condenseurs, ...) sont généralement plus petits que ceux requis pour les systèmes à vapeur d'eau et la turbine se compose de moins d'étages. - Il a souvent un coût spécifique plus élevé (US \$ / kW) que les systèmes à vapeur d'eau. - En général, il est mieux adapté aux fours de petite à moyenne tailles avec une humidité des matières premières élevée.
Cycle de Kalina	95 - 535	Mélange d'eau et d'ammoniac	<ul style="list-style-type: none"> - Peut être utilisé à des températures moins élevées que les autres cycles. - Très flexible, le système peut s'adapter rapidement aux changements de température et de débit des gaz. - Le mélange ammoniac-eau peut être contrôlé pour augmenter le transfert de chaleur et l'efficacité en s'adaptant aux températures et aux débits de taux de chaleur. - La technologie est en phase initiale avec des fournisseurs et une expérience limités.

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

6.4.2 Estimation de l'énergie récupérable de la SCSEG

La quantité de chaleur résiduelle récupérable d'un four avec préchauffeur de plusieurs étages dépend de plusieurs facteurs qui sont : [1]

- La température de sortie des fumées de la tour de préchauffage
- L'humidité contenue dans la matière première.
- La quantité d'excès d'air dans le four.
- La quantité d'air faux.
- La configuration du système de refroidissement du clinker.

Comme on a pu déterminer tous ces facteurs lors du bilan énergétique, on va essayer d'estimer la capacité de puissance potentielle que l'on peut obtenir de ces gaz de fumées.

D'abord, on va quantifier l'énergie disponible dans ces gaz par tonne de clinker en considérant qu'on va les refroidir jusqu'à une température de 150 °C. On a choisi cette température pour respecter l'intervalle de fonctionnement du filtre à manche.

Comme la farine crue, doit entrer dans la ligne de cuisson avec une humidité nettement inférieure à 1%, une partie de cette énergie va être utilisée pour le séchage des matières premières dans l'atelier broyage cru. Théoriquement on a besoin de 2.26 GJ pour faire évaporer une tonne d'humidité des matières premières. Cependant, en pratique un broyeur à boulets à besoin entre 3.14 et 3.56 GJ de chaleur par tonne d'humidité à cause des pertes dans les gaz de sortie du broyeur, des pertes par rayonnement et des infiltrations d'air.

Pour quantifier l'énergie nécessaire pour le séchage des matières premières, on a calculé le rapport moyen du débit de matières premières sur le débit de clinker pour le premier trimestre de l'année 2018, et on l'a trouvé égal à 1.596.

Grâce à ce rapport, on a pu déterminer le débit de matière première équivalent au débit de clinker que nous avons. En connaissant l'humidité et le débit des matières premières on a déterminé l'énergie nécessaire pour le séchage en utilisant la quantité de chaleur nécessaire pour faire évaporer une tonne d'humidité,

On soustrait cette énergie de séchage de l'énergie disponible dans les gaz, pour obtenir l'énergie utilisable qui est l'énergie entrante dans notre système de récupération de chaleur. En multipliant la puissance entrante par le rendement du système de récupération, on obtiendra la puissance produite.

Les résultats des calculs sont donnés par le tableau ci-dessous :

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

Tableau 6. 4 Potentiel d'énergie utilisable si l'on refroidit les gaz de fumée jusqu'à 150 °C

$\dot{m}_{clinker}$ (kg/h)	124240
\dot{m}_{fum} (kg/h)	309845.63
T_{fum} (K)	612.03
$\dot{m}_{matière\ première}/\dot{m}_{clinker}$	1.596
% humidité matière première	1.843
E_{fum} (MJ/kg clinker)	0.535
$E_{séchage}$ (MJ/kg humidité)	3.35
$E_{séchage}$ (MJ/kg clinker)	0.099
$E_{utilisable}$ (MJ/kg clinker)	0.437
$\dot{E}_{utilisable}$ (MW)	15.077
Rendement du système	18 – 25 %
Puissance potentielle produise (MW)	2.714 – 3.769

On voit bien qu'il y a un potentiel considérable d'énergie à exploiter qui est de 0.437 MJ/kg de clinker, pour un débit de clinker de 124 240 (kg/h) et un rendement compris entre 18-25 % on aura un potentiel de puissance compris entre 2.714 et 3.769 MW.

En multipliant l'énergie utilisable de notre système de récupération est de 437 (MJ/tonnes de clinker) par le rapport moyen de tonne de ciment par tonne de clinker (pour le premier trimestre de 2018) et le rendement du système on obtient l'énergie produite par tonne de ciment. En divisant cette quantité par la CES on pourra évaluer le pourcentage de l'énergie produite par le système de récupération par rapport à l'énergie électrique totale qui est consommée dans la cimenterie.

Les résultats de calcul dont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau 6. 5 Potentiel d'énergie récupérable pour le premier trimestre de 2018

L'énergie utilisable (MJ/tonnes de clinker)	437	
Rendement (%)	18	25
E fumée produite (MJ/t ck)	78.64	109.22
Tonnes ck/tonnes ciment	0.76	0.76
E fumée produite (MJ/t ciment)	59.83	83.10
E fumée produite (kWh/t ciment)	16.62	23.08
CES (kWh/t ciment)	111	111
% d'énergie récupérée/ énergie consommée	14.97	20.80

En assumant que la consommation électrique spécifique est de 111 kWh/tonnes de ciment et pour un rapport de clinker ciment d'environ 0.76, près de 15 à 20 % de l'énergie électrique nécessaire pour la production du ciment peuvent être récupérés de la chaleur des gaz de fumées.

Chapitre 6 : Recommandation aux problèmes trouvés

6.5 Conclusion

En se basant sur les différents problèmes qu'on a abordé, on voit qu'il y a plusieurs points sur lesquels la cimenterie peut intervenir pour améliorer son efficacité énergétique. Les principales pistes d'amélioration sont :

- La diminution des pertes thermiques à travers les parois.
- L'exploitation de la chaleur perdue avec les gaz de fumées.
- La minimisation des airs faux, dans la ligne de cuisson.

CONCLUSION GENERALE

La question de l'efficacité énergétique dans les cimenteries est une question primordiale dans le contexte économique mondial dans lequel nous vivons. Les deux principaux paramètres caractérisant cette efficacité dans les cimenteries qui sont la CES (consommation électrique spécifique) et la CTS (consommation thermique spécifique), montrent que la GICA est en retard par rapport à la moyenne mondiale. L'étude de la cimenterie de Sour El Ghozlane est un exemple concret de l'écart que l'Algérie accuse face aux tendances mondiales. C'est dans ce contexte que vient l'utilité de notre étude, qui met en évidence les différents points sur lesquels il faut intervenir.

Dans notre travail, nous avons d'abord étudié l'historique de production et de consommation des 5 dernières années de la SCSEG. En se basant sur ces données, on a calculé et analysé les différentes consommations spécifiques dans le but d'avoir une idée sur les déperditions énergétiques de la cimenterie. Ces premiers résultats, qui montrent un écart considérable par rapport aux standards internationaux, nous ont confirmé l'existence de pertes considérables que ce soit dans le secteur thermique ou électrique.

Notre étude s'est ensuite tournée vers le secteur qui représente la grande majorité des consommations énergétiques ; le secteur thermique qui représente 88 % des consommations énergétiques totales. On a effectué le bilan énergétique de la ligne de cuisson dans le but de définir et de quantifier les taux d'énergie entrants et sortants.

Nos calculs nous ont permis de quantifier des dissipations thermiques de presque 30 MW, ce qui représente 24 % de l'énergie qui est fournie au système. Cette quantité représente une perte de 0.86 MJ/kg de clinker produit. Nous avons trouvé que l'énergie transportée par les gaz d'échappement était près de 23 % de l'énergie fournie. On a aussi évalué la quantité d'énergie qui est perdue à cause des airs faux, elle représente 5% de l'énergie fournie.

En utilisant les résultats du bilan massique, on a quantifié les émissions de gaz de la cimenterie pour une tonne de clinker. On a trouvé qu'il y avait des émissions considérables de dioxyde de carbone qui se chiffre à presque 800 kg/ tonne de clinker produit.

Après cela, nous nous sommes intéressés aux zones où les dissipations de chaleur étaient les plus importantes dans la ligne de cuisson. Nous avons conclu que 46 % des pertes se localisaient au niveau du refroidisseur à ballonnets.

On a concrétisé notre travail par la présentation des principaux problèmes liés à la déperdition d'énergie calorifique et on a recommandé des solutions. Nos résultats nous ont permis de conclure qu'il y a d'importantes dissipations thermiques au niveau de la ligne de cuisson et aussi qu'il y a une surconsommation calorifique considérable liée aux airs faux. On a aussi évalué qu'il y avait un important potentiel énergétique que l'on pourrait extraire des gaz de fumées.

Comme perspectives de continuité de ce travail, nous nous permettons de proposer :

- L'étude d'un projet de remplacement du refroidisseur à ballonnets par un refroidisseur à grilles.
- L'étude d'un projet de réalisation d'un système de récupération de chaleur.
- L'étude et l'analyse des performances électriques de la SCSEG.
- L'analyse des émissions de gaz à effet de serre et des poussières de la SCSEG et leurs impacts sur l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] International Finance Corporation, «Waste Heat Recovery for the Cement Sector,» juin 2014. Disponible sur: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20022>
- [2] [En ligne]. Disponible sur: <http://www.iea.org/>. [Accès le 15 Juin 2018].
- [3] A. Redjem, «L 'économie d'énergie et l'efficacité énergétique Au cœur de la stratégie du Groupe GICA,» L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), 24 Octobre 2017.
- [4] [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gica.dz/>. [Accès le 20 mai 2018].
- [5] Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP), «Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment,» Barcelone, mai 2008.
- [6] F.L.Smith-Société Nationale des Matériaux de Construction, «Annexe 3 Specification du matériel mécanique,» Novembre 1984.
- [7] P. A. Alsop, THE CEMENT PLANT OPERATIONS HANDBOOK : The concise guide to cement manufacture, United Kingdom: International Cement Review, November 2001.
- [8] E. H. Benessahraoui, «Le diagnostic énergétique d'une cimenterie,» L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie IEPF, Québec.
- [9] R. BASTIER, A. BOCAN, B. GILBERT et A. REGNAULT, «Fours de cimenterie Ateliers de cuisson du clinker,» Techniques de l'Ingénieur, Saint-Denis, 10 juillet 2000.
- [10] FEECO INTERNATIONAL , THE ROTARY KILN HANDBOOK, Algoma USA, 2018. Disponible sur: <http://feeco.com/literature/>
- [11] B. Robert, B. Alexandre, G. Bernard et R. Alain, «Fours de cimenterie Refroidisseurs à clinker,» Techniques de l'Ingénieur, Saint-Denis, 10 juillet 2000.
- [12] A. Adem et Y. Recep, «Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry,» University of Gaziantep, Department of Mechanical Engineering, Gaziantep, Turkey, 25 Février 2014.
- [13] R. H. Perry et D. W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook SEVENTH EDITION, New York, San Francisco, Washington, D.C., Auckland: McGraw-Hill, 1997.
- [14] B.-J. Robert, B. MUNGYEKO et P. P. Charles, Analyses des paramètres affectant la consommation d'énergie dans un four rotatif cimentier et solutions possibles d'optimisation énergétique, Laboratoire de Thermique, Energétique et de Procédés, Université de Pau et des Pays de l'Adour, May 2015.
- [15] A. A. Boateng, ROTARY KILNS : Transport Phenomena and Transport Processes, Burlington: Elsevier Inc, 2008.

- [16] H. BENNOUR, «Conversion d'énergie,» notes de cours ENP, Alger, 2016.
- [17] L. Salah, «Transfert de chaleur,» notes de cours ENP, Alger, 2016.
- [18] F. P. INCROPERA, T. L. Bergman, A. S.LAVINE et D. P.DEWITT, «Fundamentals of Heat and Mass Transfer seventh edition,» John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [19] S. ALGARNI et D. NUTTER, «Survey of Sky EffectiveTemperature Models Applicable to Building Envelope Radiant Heat Transfer,» ResearchGate, juillet 2015.

ANNEXES

Annexe A : historique des données de marche pour 30/04/2018

SC SEG								
Cimenterie De Sour El Ghozlane		journée du 30/04/2018						
Direction de Production		<i>Situation de l'usine</i>						
		hm jour	prod jour	hm mois	prod mois	hm an	prod an	%an compos
production matieres premieres	tas A	0	0	69,5	51925	253,5	230525	50,40%
	tas B	11	8002	115,5	85702	316	223355	48,83%
	s/total	11	8002	185	137627	569,5	453880	99,23%
"120"	argile	0	0	5	2498	10,5	3519	0,77%
	total	11	8002	190	140125	580	457399	100%
consommatio n mélange cru	calcaire		4192		114277		444775	92,27%
	argile		37		1458		2492	0,52%
	sable		270		6664		24153	5,01%
	MDF		65		2258		10625	2,20%
production R1 et R2	R1	17,90	2227	469,63	59431	1781,30	229313	48%
	R2	18,51	2337	492,22	65226	1876,65	252732	52,43%
	Total	36,41	4564	961,85	124657	3657,95	482045	100,00%
production farine sèche	R1+R2		4364		120436		465814	
compteur schenk	W1		4795		139548		524228	
consom gaz			2671		75067		280325	*100m'
clinker		22,27	2767	623,24	80665	2342,37	302549	
consommatio n clinker et ajouts	clinker		1385		73269		309608	81,37%
	Clinker acheté		0		0		0	0,00%
	gypse		83		4047		18463	4,85%
	CM2		200		11565		40676	10,69%
	calcaire Boussa		0		0		0	0,00%
	Pouzzolane		0		0		11747	3,09%
	total		1668		88881		380494	100%
production ciment	Z1	0	0	527,78	47771	2123,94	197751	51,97%
	Z2	18,5	1668	463,66	41110	1943,9	182743	48,03%
	Z1+Z2	18,5	1668	991,44	88881	4067,84	380494	100%
expédition	sacs		2160		57860		192290	47,93%
	vrac		1786,82		54179,14		208915,20	52,07%
	total		3946,82		112039,14		401205,20	100%

Annexe B : calcul des chaleurs spécifiques

Substance	a	b	c	$\bar{c}_p = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2}$ (kcal/kmol K)
CaO	11.86	1.08×10^{-3}	-1.66×10^5	$11.86 + 1.08 \times 10^{-3}T - 1.66 \times 10^5 T^{-2}$
$\langle \text{SiO}_2 \rangle$	3.27	24.8×10^{-3}	-	$3.27 + 24.8 \times 10^{-3}T$ (298 < T < 390)
$\langle \text{SiO}_2 \rangle$	13.64	2.64×10^{-3}	-	$13.64 + 2.64 \times 10^{-3}T$ (390 < T < 2000)
Al_2O_3	25.48	4.25×10^{-3}	-6.82×10^5	$25.48 + 4.25 \times 10^{-3}T - 6.82 \times 10^5 T^{-2}$ (298 < T < 1800)
$\langle \text{Fe}_2\text{O}_3 \rangle_\alpha$	23.5	18.6×10^{-3}	-3.55×10^5	$23.5 + 18.6 \times 10^{-3}T - 3.55 \times 10^5 T^{-2}$ (298 < T < 950)
$\langle \text{Fe}_2\text{O}_3 \rangle_\beta$	36	-	-	36 (950 < T < 1050)
$\langle \text{Fe}_2\text{O}_3 \rangle_\delta$	31.7	1.76×10^{-3}	-	$31.7 + 1.76 \times 10^{-3}T$ (1050 < T < 1873)

$T = T(K)$; $\langle \rangle$: solid phase; $\langle \rangle_\alpha$: α -phase; $\langle \rangle_\beta$: β -phase; $\langle \rangle_\delta$: δ -phase.

Component	T (K)	Heat Capacity (C_p) Formula	Kcal/kmol · K	kJ/kmol · K	kJ/kg	Btu/lb
CaCO ₃	400	$19.68 + 0.01189T - 307600/T^2$	22.51	94.2	0.94	0.41
CaO	700	$10.0 + 0.00484T - 108000/T^2$	13.17	55.1	0.98	0.42
MgCO ₃	692	16.90	16.90	70.7	0.84	0.36
MgO	692	$10.86 + 0.001197T - 208700/T^2$	11.25	47.1	1.17	0.50
C	662	$2.673 + 0.002617T - 116900/T^2$	4.14	17.3	1.44	0.62
CO	662	$6.6 + 0.0012T$	7.39	30.9	1.10	0.48
CO ₂	962	$10.34 + 0.00274T - 195500/T^2$	12.76	53.4	1.21	0.52
N ₂	962	$6.5 + 0.001T$	7.46	31.2	1.12	0.48
NO	962	$8.05 + 0.000233T - 156300/T^2$	8.11	33.9	1.13	0.49
NO ₂	963	$36.07 + 0.0397 \times T - 0.0000288T^2 + 7.87 \times (10^{-9}) \times T^3$		47.59	1.03	0.45
O ₂	962	$8.27 + 0.000258T - 187700/T^2$	8.07	33.8	1.05	0.45
S	389	$3.63 + 0.0064T$	6.12	25.6	0.80	0.34
SO ₂	962	$7.7 + 0.0053T - 0.00000083T^2$	12.03	50.3	0.79	0.34
Cl ₂	962	$8.28 + 0.00056T$	8.82	36.9	0.53	0.23
H	962	4.97	4.97	20.8	20.79	8.97
H ₂	962	$6.62 + 0.00081T$	7.40	31.0	15.48	6.67
H ₂ O(l)	283	4.18	4.18	17.5	0.97	0.42
H ₂ O(g)	283	$8.22 + 0.00015T + 0.00000134T^2$	8.37	35.0	1.95	0.84
Coal	283	$0.205 + (0.205 \times 10^{-3}) \times \%VM + (3.104 \times 10^{-4}) \times T + (2.77 \times 10^{-6}) \times \%VM$				

Annexe B : calcul des chaleurs spécifiques

TABLE A-2								
Ideal-gas specific heats of various common gases (Concluded)								
(c) As a function of temperature								
$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$								
(T in K, c_p in kJ/kmol·K)								
Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature range, K	% error	
							Max.	Avg.
Nitrogen	N ₂	28.90	-0.1571 × 10 ⁻²	0.8081 × 10 ⁻⁵	-2.873 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.59	0.34
Oxygen	O ₂	25.48	1.520 × 10 ⁻²	-0.7155 × 10 ⁻⁵	1.312 × 10 ⁻⁹	273–1800	1.19	0.28
Air	—	28.11	0.1967 × 10 ⁻²	0.4802 × 10 ⁻⁵	-1.966 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.72	0.33
Hydrogen	H ₂	29.11	-0.1916 × 10 ⁻²	0.4003 × 10 ⁻⁵	-0.8704 × 10 ⁻⁹	273–1800	1.01	0.26
Carbon monoxide	CO	28.16	0.1675 × 10 ⁻²	0.5372 × 10 ⁻⁵	-2.222 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.89	0.37
Carbon dioxide	CO ₂	22.26	5.981 × 10 ⁻²	-3.501 × 10 ⁻⁵	7.469 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.67	0.22
Water vapor	H ₂ O	32.24	0.1923 × 10 ⁻²	1.055 × 10 ⁻⁵	-3.595 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.53	0.24
Nitric oxide	NO	29.34	-0.09395 × 10 ⁻²	0.9747 × 10 ⁻⁵	-4.187 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.97	0.36
Nitrous oxide	N ₂ O	24.11	5.8632 × 10 ⁻²	-3.562 × 10 ⁻⁵	10.58 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.59	0.26
Nitrogen dioxide	NO ₂	22.9	5.715 × 10 ⁻²	-3.52 × 10 ⁻⁵	7.87 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.46	0.18
Ammonia	NH ₃	27.568	2.5630 × 10 ⁻²	0.99072 × 10 ⁻⁵	-6.6909 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.91	0.36
Sulfur	S ₂	27.21	2.218 × 10 ⁻²	-1.628 × 10 ⁻⁵	3.986 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.99	0.38
Sulfur dioxide	SO ₂	25.78	5.795 × 10 ⁻²	-3.812 × 10 ⁻⁵	8.612 × 10 ⁻⁹	273–1800	0.45	0.24
Sulfur trioxide	SO ₃	16.40	14.58 × 10 ⁻²	-11.20 × 10 ⁻⁵	32.42 × 10 ⁻⁹	273–1300	0.29	0.13
Acetylene	C ₂ H ₂	21.8	9.2143 × 10 ⁻²	-6.527 × 10 ⁻⁵	18.21 × 10 ⁻⁹	273–1500	1.46	0.59
Benzene	C ₆ H ₆	-36.22	48.475 × 10 ⁻²	-31.57 × 10 ⁻⁵	77.62 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.34	0.20
Methanol	CH ₄ O	19.0	9.152 × 10 ⁻²	-1.22 × 10 ⁻⁵	-8.039 × 10 ⁻⁹	273–1000	0.18	0.08
Ethanol	C ₂ H ₆ O	19.9	20.96 × 10 ⁻²	-10.38 × 10 ⁻⁵	20.05 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.40	0.22
Hydrogen chloride	HCl	30.33	-0.7620 × 10 ⁻²	1.327 × 10 ⁻⁵	-4.338 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.22	0.08
Methane	CH ₄	19.89	5.024 × 10 ⁻²	1.269 × 10 ⁻⁵	-11.01 × 10 ⁻⁹	273–1500	1.33	0.57
Ethane	C ₂ H ₆	6.900	17.27 × 10 ⁻²	-6.406 × 10 ⁻⁵	7.285 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.83	0.28
Propane	C ₃ H ₈	-4.04	30.48 × 10 ⁻²	-15.72 × 10 ⁻⁵	31.74 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.40	0.12
n-Butane	C ₄ H ₁₀	3.96	37.15 × 10 ⁻²	-18.34 × 10 ⁻⁵	35.00 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.54	0.24
i-Butane	C ₄ H ₁₀	-7.913	41.60 × 10 ⁻²	-23.01 × 10 ⁻⁵	49.91 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.25	0.13
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	6.774	45.43 × 10 ⁻²	-22.46 × 10 ⁻⁵	42.29 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.56	0.21
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	6.938	55.22 × 10 ⁻²	-28.65 × 10 ⁻⁵	57.69 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.72	0.20
Ethylene	C ₂ H ₄	3.95	15.64 × 10 ⁻²	-8.344 × 10 ⁻⁵	17.67 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.54	0.13
Propylene	C ₃ H ₆	3.15	23.83 × 10 ⁻²	-12.18 × 10 ⁻⁵	24.62 × 10 ⁻⁹	273–1500	0.73	0.17

Annexe C : Schéma de la tour de préchauffage

Bricks normale
Duo N

Bricks de terre
Duo 2K

Demi-bricks en arc
Duo 1H

Bricks veltère en arc
Duo 1L

Pour les nombres de briques supérieurs à 5000 indiqués dans le tableau, est compris un excédent de 4%
 Pour les nombres de briques inférieurs à 5000 indiqués dans le tableau, est compris un excédent de 10%
 L'excédent inclus pour toutes les autres matières est de 10%.

Ref.	Marque de FLS	Marque de fournisseur	Quantité	Nombre	N. No. Annoté	H	B	T	Remarques	Type de plan n°	matière voir 1052906
PA	N 230	RAK	6250	28334	114	84	230			rep 4	
PB	N 230	DS**	870	3063	114	76	230				
PC	3K 221		18000	28711	114	97					
PD	3K 411		6240	26785	114	97					
PE	3K 611		21700	107000	114	99					
PF	3K 811		9500	41335	114	100					
PG	3K 218		200	1269	180	84,5					
PH	3K 618		260	1253	180	97					
PJ	3K 223	DS**	1010	7983	200	78,5					
PK	1H 53	RAK DS**	63	620	230	95					
PL	3K 823	RAK DS**	35	35	230	97					
PM	1H 53	DS**	210	754	51	101					
PM-1	1H 31		980	3705	64	88					
PM-2	1H 16		2850	9642	68	84					
PM-3	1H 32		6750	25222	71	81					
PN	1G 24		7770	29378	73	79					
PN-1	1G 24		380	1437	64	88					
PN-2	1G 16		1670	6341	68	84					
PN-3	1G 10		7640	28887	71	81					
PN-3	1G 4	DS**	7510	28395	71	78					
PQ	4.007551	RAK	80	436							
PP	4.007352		1580	8796							
PQ	4.011632		750	2394							
PR	4.011634		1020	2809							
PS	4.011635		1020	2076							
PT	4.038541		92	1175							
PU	4.050509	RAK	12	92							
PV		RAK	3915	31240					Uniquement un de ces types de briques doit être choisi d'après le projet en tenant compte de la référence sur les plans de briques.		
PX	3.041374	DS**	7835	61900							
PY	4.011625 Mat 262	Acier S18	380	100					Fers d'ancrage T50 de Lx 40 125 de Lx 50, 3/8 de Lx 100, 3/4 de Lx 150		
PZ	4.011627 Mat 262		6850	1573					Fers d'ancrage		
PA-1	4.011627 Mat 262		1120	112					Fers d'ancrage		
PB-1	4.028016 Mat 262	Acier S18	6480	1616					Fers d'ancrage		
PC-1	4.041610	Acier de soud NFA 35 501	250	48					Mat 110		
PD-1	4.041610	Acier de soud NFA 35 501	740m	298					Plan d'armature détaillée d'après plan n° 3.06.2116		
PE-1	Briques isolantes	ISOPERLOR 8	40m ²	1550					65mm	rep 6	
PE-2	Briques isolantes	ISOPERLOR 8	140m ²	9500					115mm	rep 6	
PF-1	Béton réfractaire	Béton NORMAM	48 m ³	110 000						rep 1	
PF-2	Béton réfractaire	Béton HG	140 m ³	301000						rep 3	
PG-1	Bloc d'isolation	SALLU	12m ²	75					25mm	rep 7	
PG-2	Bloc d'isolation		85m ²	531					25mm en pièces de 65mm	rep 7	Pour l'installation voir plan n° 3.06.2116 (d'après) rep. FX-1
PG-3	Bloc d'isolation		283m ²	2560					38mm en pièces de 185mm	rep 7	
PG-4	Bloc d'isolation	SALLU	306m ²	5738					75mm	rep 7	
PH-1	Matière de fibro-ciment céramique	PRONAP	4m ²	4					95mm en pièces de 50mm	rep 8	
PH-2	Matière de fibro-ciment céramique		40m ²	96					25mm en pièces de 100mm	rep 8	
PH-3	Matière de fibro-ciment céramique	PRONAP	17m ²	62					38mm en pièces de 110mm	rep 8	
PJ-1	Laine minérale	VERLANEAS Fibres	100							rep 3	
PK-1	Mortier thermique	Ciment ACS 711 SPECIAL	66600 matériau						Pour jointures RAK et DS** voir notice et emploi AK Pour jointures ISOPERLOR voir notice et emploi AK	rep 5	
PD-1	Cire paraffine		170						Pour les d'ancrage		
PP-1	Electrode ø3,25	Pour acier NFA 35501	36						Mat 712 Pour les d'ancrage mat 110		
PP-2	Electrode ø3,25	Pour acier 18/8	285						Mat 715 Pour les d'ancrage mat 262		
PE 3	Mortier thermique	Ciment PCL	16 000						Pour jointures ISOPERLOR rep PE1 et PE2		

Enduite de ciment les fers d'ancrage avant le coulage.
 Pour le maçonnerie à rendre les fers de renfortage voir
 l'annexe des fers de renfortage. Le schéma de la mise de cadence
 est annexé au plan n° 3.06.2116 dans le schéma précédent rep. P1, P2

Plan n° 1.052906
Qualité DS**

Plan n° 1.052897
Qualité DS**

Toutes les pièces en acier
sont à galvaniser, notamment
selon plan n° 2.04.000, page 3

Plan n° 1.052899
Qualité DS**

Plan n° 1.052898
Qualité DS**

Plan n° 1.047800
Qualité DS**

Plan n° 1.052898
Qualité DS**

Plan n° 2.04.057
Qualité DS** sans placard
à être en "L" et "H" qualité RAK
voir plan Cycle 10

Plan n° 1.052898
Qualité DS**

Plan n° 1.047801
Qualité RAK

Chimée

Briques isolantes

Béton réfractaire

Béton réfractaire

Matière de fibro-ciment céramique

Laine minérale

Bloc d'isolation

6077872

F. L. SMITH & Co. A/S, COPENHAGUE
COPENHAGUE COPENHAGUE

Société Nationale des Matériaux
de Construction
Cimenterie de Bour-El-Ghazale, Algérie
Atelier des fours
Revêtement du préchauffeur à calciner
N° 1.052.905-1