



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux (MRIE)

Filière : QHSE - GRI

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Réduction des Emissions des Oxydes d'Azote

Par l'Intégration d'un Précalcinateur "Low-NOx"

Cas d'étude : "La cimenterie CILAS de Biskra"

Réalisé par : **Manel KADDOUR**

Sous la direction de :

M. Abdelmalek CHERGUI

Professeur à l'ENP

Mme. Souad BENTAALLA-KACED

MCB à l'ENP

M. Abdelwahhab BENDAIKHA

Manager HSE à CILAS

M. Abdelmotalib BOULARES

Manager Optimisation à CILAS

Présenté et soutenue publiquement le 08/07/2024 devant le jury composé de :

Président

M. Hamid YOUSFI

Professeur à l'ENP

Examineurs

M. Mohamed BOUBAKEUR

MAA à l'ENP

M. Malik SENOUCI-BEREKSI

MCB à l'ENP

Promoteurs

M. Abdelmalek CHERGUI

Professeur à l'ENP

Mme. Souad BENTAALLA-KACED

MCB à l'ENP



Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux (MRIE)

Filière : QHSE - GRI

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Réduction des Emissions des Oxydes d'Azote

Par l'Intégration d'un Précalcinateur "Low-NOx"

Cas d'étude : "*La cimenterie CILAS de Biskra*"

Réalisé par : **Manel KADDOUR**

Sous la direction de :

M. Abdelmalek CHERGUI

Professeur à l'ENP

Mme. Souad BENTAALLA-KACED

MCB à l'ENP

M. Abdelwahhab BENDAIKHA

Manager HSE à CILAS

M. Abdelmotalib BOULARES

Manager Optimisation à CILAS

Présenté et soutenue publiquement le 08/07/2024 devant le jury composé de :

Président

M. Hamid YOUSFI

Professeur à l'ENP

Examineurs

M. Mohamed BOUBAKEUR

MAA à l'ENP

M. Malik SENOUCI-BEREKSI

MCB à l'ENP

Promoteurs

M. Abdelmalek CHERGUI

Professeur à l'ENP

Mme. Souad BENTAALLA-KACED

MCB à l'ENP

أكاسيد النيتروجين هي ملوثات جوية تنتج بشكل رئيسي عن عمليات الاحتراق ذات درجات الحرارة العالية في الأفران الأسمنتية. يهدف مشروع التخرج هذا لتقليل هذه الانبعاثات الضارة في عملية إنتاج الأسمنت عن طريق دمج مكس لخفض أكاسيد النيتروجين. تركز الدراسة على تحليل التحولات الفيزيوكيميائية والديناميكية الحرارية داخل نظام الفرن. يتطلب تحسين الكفاءة الطاقية، تحسين المعايير الوظيفية والتحكم في العمليات، مما يمهد الطريق لنجاح هذه التقنية. تقترح هذه الدراسة نموذجاً لمصنع الأسمنت الأمثل الذي يتوافق مع الأنظمة البيئية، مع تعزيز كفاءة الطاقة والقدرة الإنتاجية الصناعية.

الكلمات المفتاحية: ملوثات جوية، تقليل أكاسيد النيتروجين، الاحتراق، التكليل "منخفض أكاسيد النيتروجين"، الكفاءة الطاقية، مصنع الأسمنت الأمثل

Abstract

Nitrogen oxides (NOx) are atmospheric pollutants primarily generated by high-temperature combustion processes in cement kilns. This final year project aims to evaluate the integration of the "Low-NOx" Precalciner into the cement production process to reduce these harmful emissions. The study focuses on analyzing the physicochemical and thermodynamic transformations within the kiln workshop. Improving energy efficiency involves optimizing operational parameters and mastering the process control, thereby laying the groundwork for the success of this technique. This study proposes a model of an optimal cement plant that complies with environmental regulations while enhancing energy efficiency and industrial production capacity.

Keywords: Atmospheric Pollutants, Reduction of Nitrogen Oxides (NOx), Combustion, "Low NOx" Precalciner, Energy Efficiency, Optimal Cement Plant

Résumé

Les oxydes d'azote (NOx) sont des polluants atmosphériques générés principalement par les processus de combustion à haute température dans les fours cimentiers. Ce projet de fin d'études a pour objectif d'évaluer l'intégration d'un Précalcinateur "Low NOx" dans le procédé de production de ciment afin de réduire ces émissions nocives. L'étude s'articule autour de l'analyse des transformations physicochimiques et thermodynamiques de l'atelier de cuisson. L'amélioration de l'efficacité énergétique passe par l'optimisation des paramètres fonctionnels et la maîtrise opérationnelle du processus. Cette étude propose un modèle de la cimenterie optimale qui répond aux réglementations environnementales, tout en renforçant l'efficacité énergétique et la capacité de production industrielle.

Mots clés : Polluants Atmosphériques, Réduction des Oxydes d'Azote (NOx), Combustion, Précalcinateur "Low NOx", Efficacité Énergétique, Cimenterie optimale.

"À ces âmes simples, m'ayant légué l'art d'affronter la vie."

REMERCIEMENTS

À ALLAH, Merci de prendre soin de moi.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes promoteurs, M. Abdelmalek CHERGUI et Mme. Souad BENTAALLA-KACED, pour leur précieuse guidance, leur soutien constant et leurs conseils inestimables tout au long de ce projet.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à M. Hamid YOUSFI qui nous fait l'honneur de présider le jury et à M. Mohamed BOUBAKEUR et M. Malik SENOUCI-BEREKSI, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier M. Abdelwaheb BENDAIKHA, le responsable HSE pour la confiance qu'il m'a accordé en m'accueillant au sein du CILAS. Je souhaite également remercier chaleureusement l'équipe de service optimisation, en particulier M. Abdelmotalib BOULARES et M. Okba KHAMED, pour leur soutien inestimable et leur partage qui a grandement enrichi mon expérience.

Je suis profondément reconnaissante envers mes enseignants pour leur dévouement, leur expertise et leur impact significatif tout au long de ce parcours académique.

Un grand merci à mes camarades de classe et à mes amis pour avoir rendu ces années d'études si mémorables. Un remerciement particulier à Reda BOURDJOU, qui a joué un rôle indispensable dans notre parcours grâce à son aide, sa disponibilité et sa bienveillance envers nos préoccupations.

Enfin, j'adresse mes remerciements et ma gratitude à ceux sans qui rien n'aurait pu se réaliser : Vava Azizen, ma mère et mes sœurs.

Un immense merci à toute ma grande famille,

Je vous suis reconnaissante tous pour votre amour et vos encouragements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....10

CHAPITRE I Cadre Général de l'Etude

I.1. Introduction..... 13

I.2. Présentation du groupe LafargeHolcim 13

I.3. Présentation de LafargeHolcim Algérie 14

I.4. Présentation de l'usine Ciments Lafarge Souakri -CILAS- 14

I.5. Généralité sur le ciment..... 17

I.6. Procédé de fabrication du ciment..... 18

I.7. Objectif de l'étude 22

I.8. Méthodologie 23

I.9. Conclusion..... 23

CHAPITRE II Les Émissions Atmosphériques et les Techniques de Réduction des NOx

II.1. Introduction..... 25

II.2. Le changement climatique et les émissions des GES 25

II.3. Le changement climatique en Algérie..... 26

II.4. Législations internationales et algériennes sur les émissions atmosphériques 27

II.5. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment 28

II.6. Les émissions des Oxydes d'Azote (NOx) 34

II.7. Mécanismes de formation des Oxydes d'Azote (NOx) 35

II.8. Mesure des NOx 38

II.9. Techniques de réduction des émissions des oxydes d'azote (NOx)..... 39

II.10. Conclusion 43

CHAPITRE III Transformation Physico-chimique et Procédé Thermodynamique de l'Atelier de Cuisson

III.1. Introduction..... 45

III.2. Description du procédé de cuisson 45

III.3. Transformations Physico-chimiques de l'atelier de cuisson..... 52

III.4. Analyse thermodynamique de l'atelier de cuisson 56

III.5. Conclusion..... 63

CHAPITRE IV Application Industrielle et Résultats du Précalcinateur "Low-NOx"

IV.1. Introduction	65
IV.2. Le développement d'un Précalcinateur "Low-NOx"	65
IV.3. Techniques de contrôle des émissions NOx.....	65
IV.4. Optimisation de la consommation énergétique.....	75
IV.5. La combustion étagée.....	76
IV.6. Intégration du Précalcinateur "Low-NOx"	79
IV.7. Discussion des résultats	85
IV.8. Alignement de CILAS avec la taxonomie de l'UE.....	86
IV.9. Conclusion.....	88
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	89
Références Bibliographiques.....	91
ANNEXES.....	97

Liste des figures

Figure I.1	Carte de l'Implantation Internationale de LafargeHolcim	13
Figure I.2	Gamme de produits ciments LafargeHolcim Algérie	14
Figure I.3	Situation géographique de l'usine CILAS -Biskra-	15
Figure I.4	Organigramme CILAS	16
Figure I.5	La composition du ciment	17
Figure I.6	Etapas de fabrication de ciment par voie sèche	19
Figure I.7	Processus de fabrication du clinker	21
Figure II.1	Evolution de la température mondiale par rapport aux niveaux préindustriels	26
Figure II.2	Variation des émissions de CO_2 dans la production de ciment	29
Figure II.3	Variation des émissions de SO_x	30
Figure II.4	Variations des émissions de CO	31
Figure II.5	Profil des émissions COV	32
Figure II.6	Emissions des poussières	33
Figure II.7	Influence de la température sur les émissions des NO_x	36
Figure II.8	Influence de la disponibilité en oxygène sur les émissions des NO_x	37
Figure II.9	Conversion entre les unités de mesure des NO_x	39
Figure III.1	Atelier de cuisson	46
Figure III.2	Préchauffeur ILC à 5 cyclones en double lignes parallèles	47
Figure III.3	Le principe de fonctionnement d'un cyclone	48
Figure III.4	Principe de fonctionnement d'une tour à cyclones	48
Figure III.5	Coupe transversale du four rotatif	50
Figure III.6	Alimentation flamme tuyère bruleur principal	51
Figure III.7	Le refroidisseur à grilles	52
Figure III.8	La formation des constituants du clinker	56
Figure III.9	Le schéma représentatif des flux échangés dans la ligne de cuisson	57
Figure IV.1	Paramètres opératoires de l'installation	68
Figure IV.2	Brûleur Low- NO_x	69
Figure IV.3	Influence de la température et de LSF sur la cuisson de clinker	71
Figure IV.4	Influence de la finesse du cru sur la température de clinkérisation	73
Figure VI.5	Effet de la substitution des matières premières sur les émissions des NO_x	75
Figure IV.6	L'optimisation de la consommation d'énergie thermique STEC	76
Figure IV.7	Développent du four rotatif	78
Figure IV.8	Schématisation du Précalcinateur "Low- NO_x "	80
Figure IV.9	Résultats de l'intégration des brûleurs Low- NO_x du précalcinateur	84
Figure IV.10	La Taxonomie de l'UE	88

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1</i>	La gamme de produits de l'usine CILAS	16
<i>Tableau I.2</i>	Classes des résistances des ciments à la compression	18
<i>Tableau II.1</i>	Les valeurs limites tolérées pour les rejets atmosphériques des cimenteries	27
<i>Tableau II.2</i>	Récapitulation des principaux polluants atmosphériques émis par la cimenterie	33
<i>Tableau II.3</i>	Émissions de NOx par type de carburant	38
<i>Tableau II.4</i>	Récapitulation des techniques de réduction des NOx dans les fours de cimenterie	42
<i>Tableau III.1</i>	Constituants de cru entré four	54
<i>Tableau III.2</i>	Les constituants de clinker	55
<i>Tableau III.3</i>	Conditions opératoires -Four PH/PC	57
<i>Tableau III.4</i>	Bilan de matières gaz	57
<i>Tableau III.5</i>	Bilan de matières solides	58
<i>Tableau III.6</i>	Bilan énergétique du refroidisseur	60
<i>Tableau III.7</i>	Bilan énergétique de la tour de cuisson	60
<i>Tableau III.8</i>	Enthalpie de transformation de clinker	61
<i>Tableau III.9</i>	Résultats des bilans	62
<i>Tableau IV.1</i>	Optimisation du débit de soufflage	69
<i>Tableau IV.2</i>	Taux d'émissions spécifique des NOx pour différents type d'installation	78
<i>Tableau IV.3</i>	Paramètres opératoires du précalcinateur	81
<i>Tableau IV.4</i>	Composition massique des gaz d'échappement	82
<i>Tableau IV.5</i>	Résultats de l'intégration des brûleurs Low-NOx du précalcinateur	84
<i>Tableau IV.6</i>	Efficacité de l'intégration des Low-NOx du Précalcinateur	85

Liste des abréviations

AS	Air Separated
AT	Air Through
AS-ILC	Air Through In-Line-Calciner
CILAS	Ciments Lafarge Souakri
GES	Gaz à Effet de Serre
ILC	In-Line Calciner
LOI	Loss On Ignition (Perte au feu)
LSF	Lime Saturation Factor
MS	Module Silicique
MAF	Module Alumino-Ferrique
PH	Préchauffeur
PC	Précalcinateur
SLC	Separate-Line Calciner
UE	Union Européenne
VL	Valeurs Limite

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le ciment est le matériau le plus consommé par l'homme après l'eau. Il joue un rôle essentiel pour répondre aux besoins de la société civile. Ce matériau indispensable dans la construction des infrastructures, est produit à des températures très élevées, générant plus de 7% des émissions mondiales des gaz à effet de serre [1], notamment le Dioxyde de Carbone (CO_2), le Méthane (CH_4), les Oxydes d'Azote (NO_x) et les Hydrocarbures.

Des initiatives telles que l'utilisation de combustibles alternatifs, l'amélioration de l'efficacité énergétique, le développement de ciments "verts" et la mise en œuvre de nouvelles technologies sont des pistes prometteuses pour atteindre les objectifs de réduction de ces polluants. Cependant, la mise en œuvre de ces solutions doit être étudiée en tenant compte des aspects économiques, sociaux et technologiques pour assurer une transition réussie vers une industrie cimentière plus respectueuse de l'environnement.

Notre étude consiste principalement à la réduction des émissions des oxydes d'azote (NO_x), qui contribuent à la formation de l'ozone troposphérique, les particules fines, et les pluies acides. Cette problématique a été proposée par l'entreprise Ciments Lafarge Souakri (CILAS), consciente de sa responsabilité quant à la nuisance de ces polluants atmosphériques sur l'environnement.

Une démarche stratégique pour réduire les émissions des NO_x a été tracée. Elle est centrée sur deux objectifs clés : améliorer l'efficacité énergétique et répondre de manière proactive aux défis environnementaux, en respectant les limites réglementaires et les normes internes. Afin de pouvoir utiliser le Précalcinateur "Low- NO_x " pour la réduction des oxydes d'azote (NO_x), il est nécessaire d'abord de préparer le terrain pour l'intégration de cette technique et d'étudier son impact sur le processus.

Notre travail sera présenté sous forme de quatre chapitres :

(i) **Le premier chapitre**, offre une vue d'ensemble du cadre général de l'étude, introduisant LafargeHolcim, le leader mondial de la construction, et mettant en lumière ses activités en Algérie. Ainsi, une présentation de la cimenterie CILAS et de son procédé de fabrication du ciment Portland.

(ii) **Le deuxième chapitre**, présente les principaux polluants atmosphériques émis par cimenterie et contribuant au changement climatique, les principales sources des émissions des oxydes d'azote (NO_x), leurs impacts environnementaux, ainsi que les techniques de réduction des NO_x utilisées dans l'industrie cimentière.

(iii) **Le troisième chapitre**, donne une description du procédé de cuisson, et de fonctionnement technique des constituants de l'atelier, notamment la tour de préchauffage à cyclones, le précalcinateur ILC (In-line Calciner), le four rotatif et le refroidisseur à grilles incluant une étude de procédé thermodynamique et une analyse des transferts physicochimique permettant d'estimer l'efficacité énergétique du processus.

Enfin, (iv) **le quatrième chapitre**, illustre les résultats des mesures adoptées pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions NO_x de l'installation.

CHAPITRE I

Cadre Général de l'Etude

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord le groupe industriel de la fabrication des matières de construction LafargeHolcim, et de son usine de production de ciment gris en Algérie, CILAS. Ensuite, nous décrivons le procédé de production utilisé par voie sèche, et enfin, nous introduisons l'objectif clé de notre travail ainsi la méthodologie suivie.

I.2. Présentation du groupe LafargeHolcim

LafargeHolcim est le résultat de la fusion en 2015 entre le groupe français Lafarge et le groupe suisse Holcim, devenant ainsi le leader mondial des matériaux de construction. Présent dans plus de 70 pays (Figure I.1), le groupe LafargeHolcim dispose d'un large portefeuille d'activités, incluant la production de ciment, de béton et de granulats et la commercialisation des solutions constructives [2].

Le siège de l'entreprise se trouve à Jona, en Suisse, et les fonctions centrales sont partagées entre Paris et Zurich.

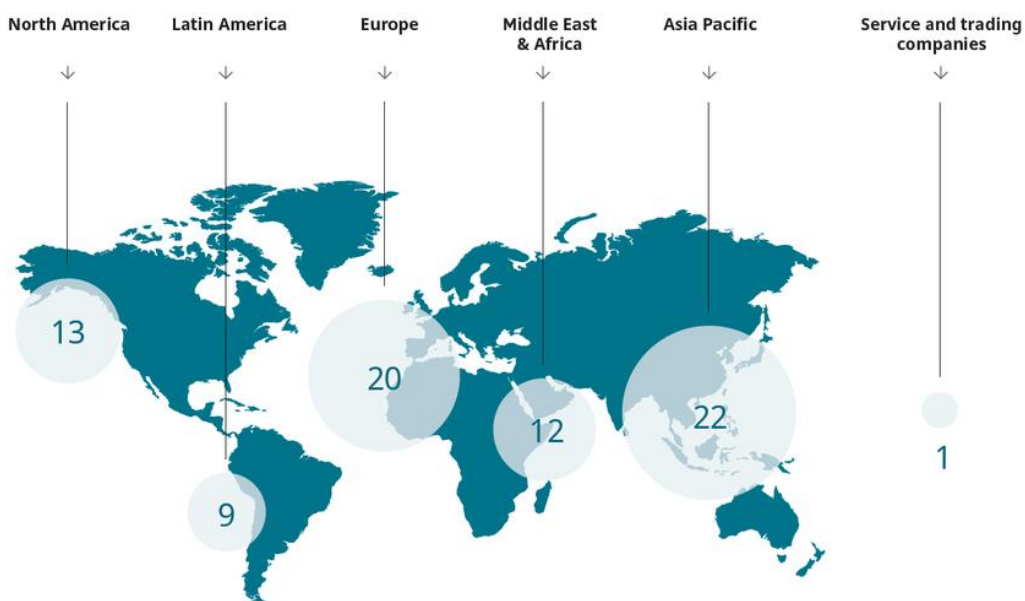


Figure I.1: Carte de l'Implantation Internationale de LafargeHolcim.

I.3. Présentation de LafargeHolcim Algérie

L'Algérie est un marché stratégique pour le Groupe LafargeHolcim. Le secteur de la construction connaît une croissance soutenue depuis l'an 2000 en Algérie, avec des besoins importants en matériaux et solutions de construction.

LafargeHolcim Algérie est présente sur l'ensemble de la chaîne de valeur des matériaux de construction : granulats, ciments, mortiers, bétons, plâtres, sacs, logistique et distribution.

L'entreprise possède deux usines de ciment à M'Sila et Oggaz, ainsi que l'usine de ciment gris CILAS à Biskra, en partenariat avec le Groupe Souakri [3].

Cette présence diversifiée permet à LafargeHolcim de répondre aux besoins croissants du marché algérien en matériaux et solutions de construction, contribuant ainsi au développement du secteur.

I.3.1. Produits LafargeHolcim Algérie

La variété des produits cimentaires de LafargeHolcim Algérie (Figure I.2) est conçue pour satisfaire les exigences spécifiques d'une clientèle exigeante, ce qui lui permet de jouer un rôle essentiel dans le développement du pays. Cette gamme diversifiée aide à répondre de manière efficace aux divers projets d'investissement public et aux besoins en logements du pays [3].



Figure I.2: Gamme de produits ciments LafargeHolcim Algérie.

I.4. Présentation de l'usine Ciments Lafarge Souakri -CILAS-

La cimenterie Ciments Lafarge Souakri (CILAS) est l'unité de production la plus moderne du Groupe LafargeHolcim en Algérie. Elle est entrée en activité à Biskra en Octobre 2017 étant le fruit d'un partenariat entre le Groupe Souakri et LafargeHolcim, selon la règle en vigueur pour

l'investissement étranger en Algérie (51/49). Elle a été construite selon les normes les plus récentes de l'industrie cimentière mondiale, offrant une conception compacte et équipée des technologies modernes de pointe [4].

I.4.1. Situation géographique de l'usine CILAS

CILAS est située à Hammam Sidi el Hadj, dans la commune d'El Outaya (Figure I.3), dans la wilaya de Biskra, située au centre-est de l'Algérie aux portes du Sahara. Cette wilaya bénéficie d'un climat désertique subtropical chaud, très sec en été. Les pics de chaleur y sont parmi les plus élevés du pays, avec des températures pouvant dépasser les 49°C [6].

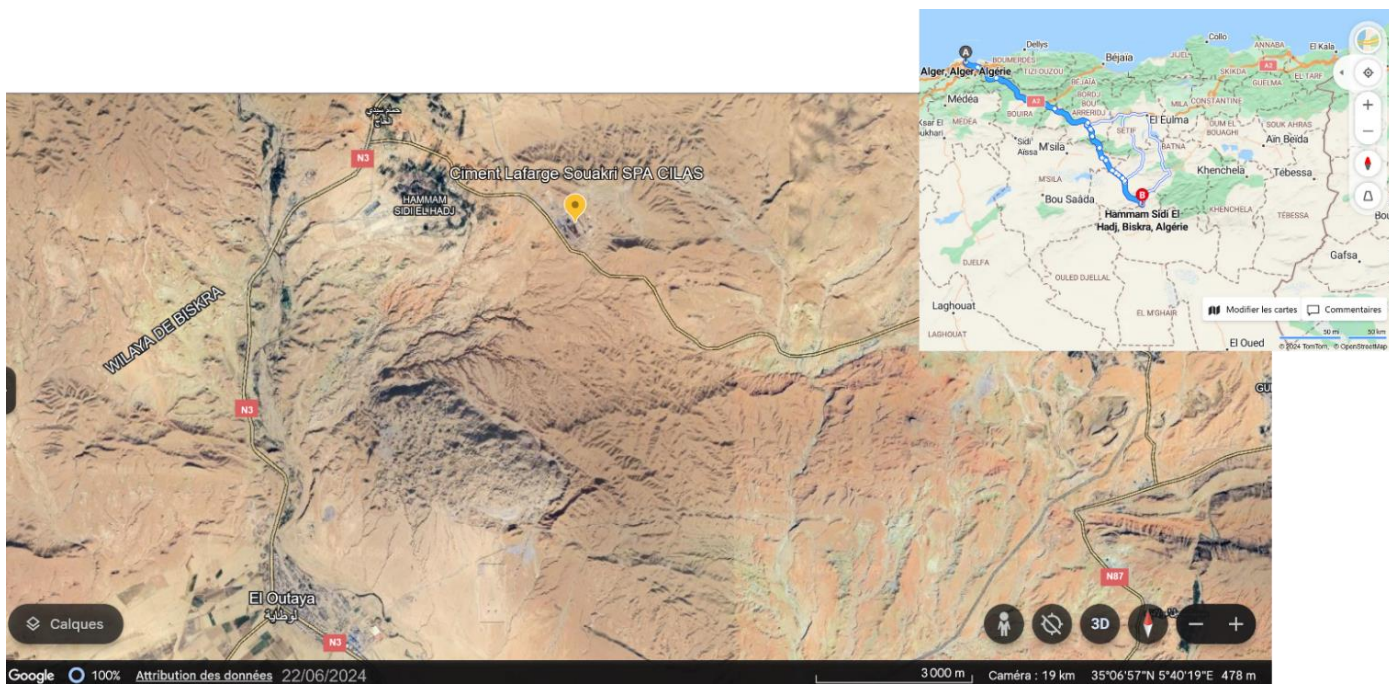


Figure I.3: Situation géographique de l'usine CILAS -Biskra- [5]

I.4.2. Produits de Ciments Lafarge Souakri (CILAS)

L'usine CILAS fabrique un produit appelé ciment gris portland au calcaire. La gamme est composée de 3 types de ciment (Tableau I.1) différencier par leur niveau de résistance.

Tableau I.1 : La gamme de produits de l'usine CILAS.

Type de ciment	Nomenclature	Caractéristiques
Matine	NA442 CEM II /A-L 42,5 N	-Durcissement très rapide -Faible demande en eau -Compatibilité avec tous types d'adjuvants
Sarie	NA442 CEM II /A-L 52,5 N	-Très grande résistance -Ultra Haute Performance
Chamil	NA442 CEM II /B-L 32,5 N	-Ciment gris pour bétons courants et tous travaux de maçonnerie.

Le ciment LafargeHolcim Algérie est certifié conforme à la norme nationale algérienne NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 ([ANNEXE I](#)).

I.4.3. Structure organisationnelle de l'usine CILAS

La [figure I.4](#) présente l'organigramme de l'usine CILAS qui comprends 10 départements avec des sous-départements et des services.

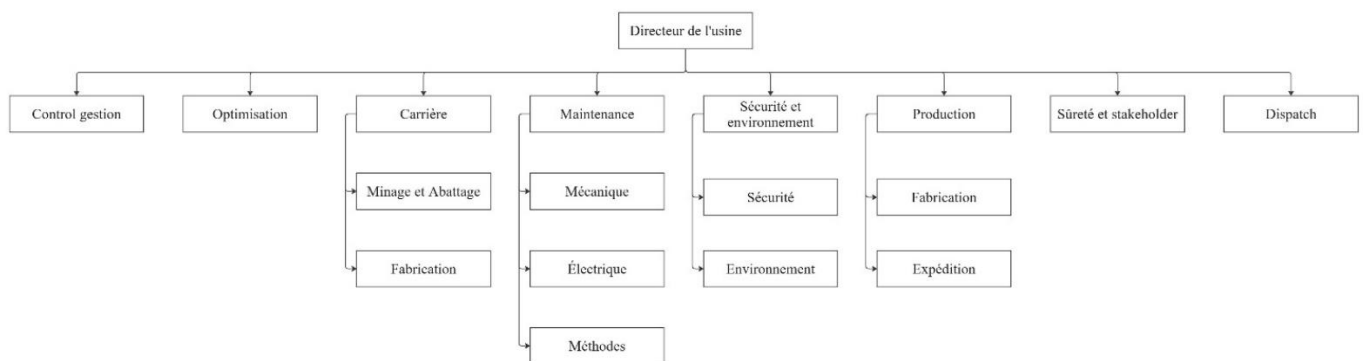


Figure I.4 : Organigramme CILAS

I.5. Généralité sur le ciment

I.5.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, qui a la propriété de former en présence d'eau une pâte capable de faire prise et de durcir progressivement, et même à l'abri de l'air et notamment sous l'eau, sa composition physique est à base du calcaire et d'argile [7]. La qualité d'un ciment est caractérisée par sa résistance à la compression atteinte au bout de 28 jours de durcissement.

I.5.2. Les constituants du ciment

Les composants de base utilisés dans la production de ciment sont principalement le calcaire, l'argile, ou d'autres matières contenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3), ainsi que des matériaux de correction tels que le sable et les minerais de fer [7,9].

Ces matières premières subissent des transformations physico-chimiques pour aboutir à la composante requise du clinker (Figure I.5).

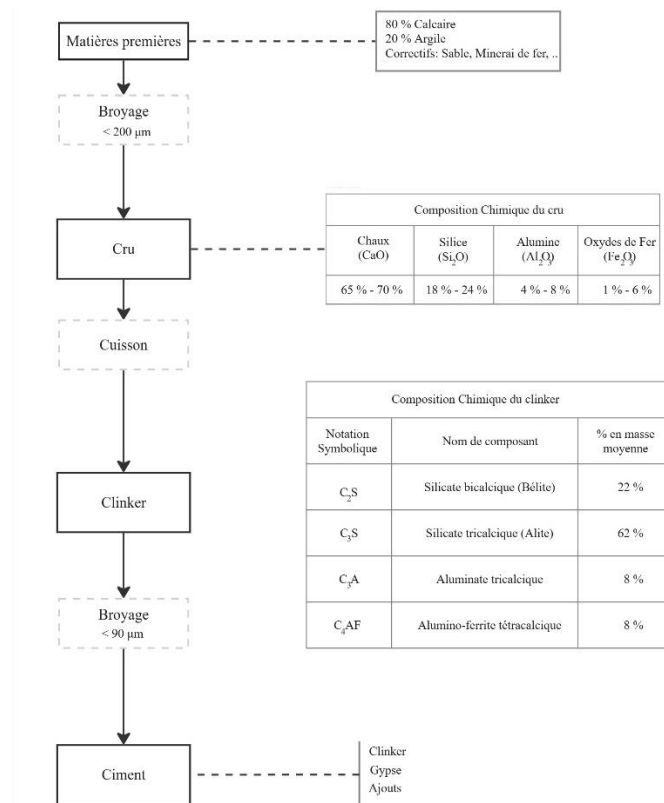


Figure I.5: La composition du ciment (ANNEXE I)

I.5.3. Classes de résistance du ciment

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 – 42,5 – 52,5 MPa, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa. Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N : Normal) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R : Rapide) [7].

La conformité d'un lot de ciment est évaluée en fonction de sa résistance à la compression, comparée aux valeurs indiquées dans le [tableau I.2](#) qui représente les limites applicables à chaque résultat d'essai.

Tableau I.2 : Classes des résistances des ciments à la compression [7].

Classe de résistance	Resistance à court terme		Resistance courante à 28 jours	
	À 2 jours	À 7 jours		
32.5 N	---	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10	---		
42.5 N	≥ 10	---	$\geq 42,5$	≤ 52.5
42.5 R	≥ 20	---		
52.5 N	≥ 20	---	$\geq 52,5$	---
52.5 R	≥ 30	---		

I.6. Procédé de fabrication du ciment

Il existe deux méthodes de fabrication de ciment : le mélange peut être préparé sous forme de poudre (voie sèche ou semi-sèche) ou sous forme de pâte (voie semi-humide ou humide).

En Algérie, la voie sèche est le procédé de fabrication du ciment le plus répandu dans les cimenteries. Pour maintenir la régularité du mélange lors de la pré-homogénéisation, une station

d'échantillonnage effectuée des analyses régulières des constituants. Le mélange est ensuite finement broyé dans des broyeurs sécheurs pour éliminer l'humidité résiduelle, produisant ainsi une poudre appelée 'cru' qui possède la finesse requise.

La figure I.6 schématise le procédé de fabrication de ciment par voie sèche :

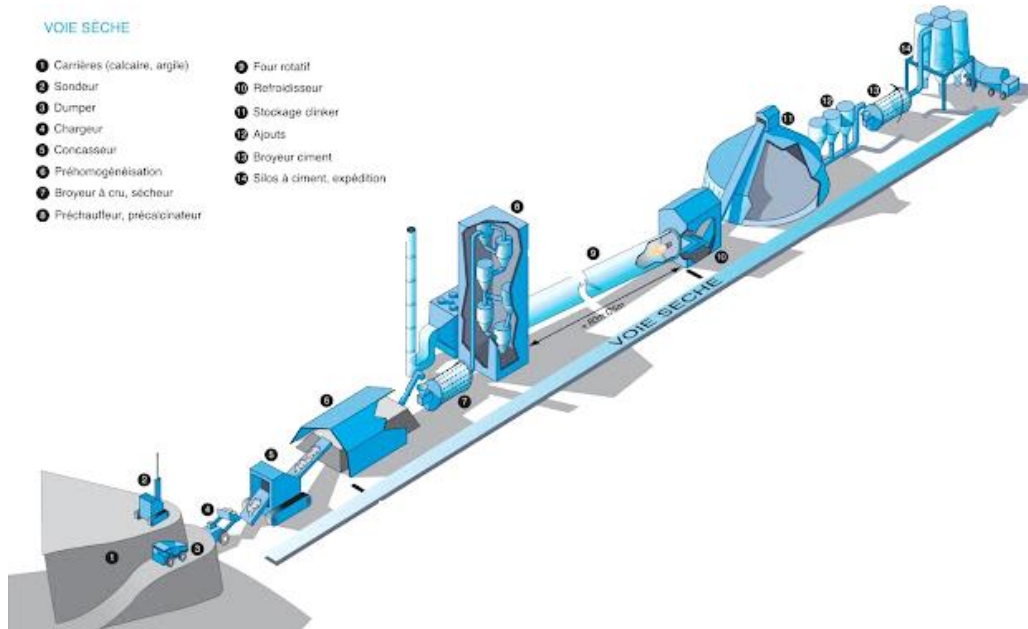


Figure I.6: Etapes de fabrication de ciment par voie sèche.

I.6.1. Préparation des matières premières

Les matières premières utilisées dans la fabrication du ciment sont majoritairement le calcaire (composé principalement de carbonate de calcium $CaCO_3$) et l'argile (un mélange complexe souvent hydraté de silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3). Ces deux matières principales sont généralement présentes en proportions respectives moyennes de 80 % et 20 %. Pour produire des ciments de qualités constantes, il est essentiel d'échantillonner, doser et mélanger soigneusement les matières premières pour obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps [9].

Au cours de cette phase initiale, les matières premières passent par les différentes étapes du processus de préparation de la matière pour aboutir à la formation d'une poudre appelée "cru".

- **Extraction des matières premières :** l'exploitation des carrières de cimenteries se fait à ciel ouvert par abattage à l'explosif suivant un plan de tir.

- **Concassage** : les blocs obtenus des carrières, sont réduits en éléments d'une dimension de 80 à 150 mm au niveau du concasseur.
Le calcaire HT de haute qualité (filler) servant comme un améliorateur de la qualité du ciment est concassé dans ce même concasseur quand nécessaire.
- **La pré-homogénéisation** : consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons sont prélevés et analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières. Ce mélange est dénommé en cimenterie par le cru.
- **Le broyage et le séchage** : à la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre présentant la finesse requise appelée "cru".
- **L'homogénéisation** : en sortant du broyeur, le cru doit être malaxé pour que le mélange acquière sa rhéologie souhaitée avant son introduction dans le four. Le cru est ensuite homogénéisé et entreposé dans des silos de stockage de cru.

I.6.2. La cuisson de cru

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes (clinkérisation) conduisant à la formation des principaux composés du clinker. L'atelier de cuisson comporte un préchauffeur à cyclones, un précalcinateur, un four rotatif et un refroidisseur à grilles [10,11].

- Le préchauffage

Avant introduction dans le four, la farine est chauffée à environ 800°C dans un préchauffeur à cyclones appelé échangeur de chaleur, comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre (matière froide) déversée à la partie supérieure de la tour se réchauffe au contact des gaz chaud circulant à contre-courant [10].

D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C.

- La précalcination

La décarbonatation commencée dans le préchauffeur, se poursuit dans le précalcinateur, et se finalise dans le four. Réalisée à des températures comprises entre 750 et 900 °C, cette étape vise à libérer le dioxyde de carbone CO_2 pour produire la chaux CaO essentielle à la formation du clinker [11].

- La clinkérisation

Sous l'effet de la chaleur de combustion dans le four (Figure I.7), les constituants de l'argile, principalement composée de silices (SiO_2), d'alumines (Al_2O_3) et des oxydes de fer (Fe_2O_3), se combinent à la chaux (CaO) provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium pour former les nouveaux composés chimiques appelés "minéraux hydrauliques" qui entrent dans la composition minéralogique du clinker [11].

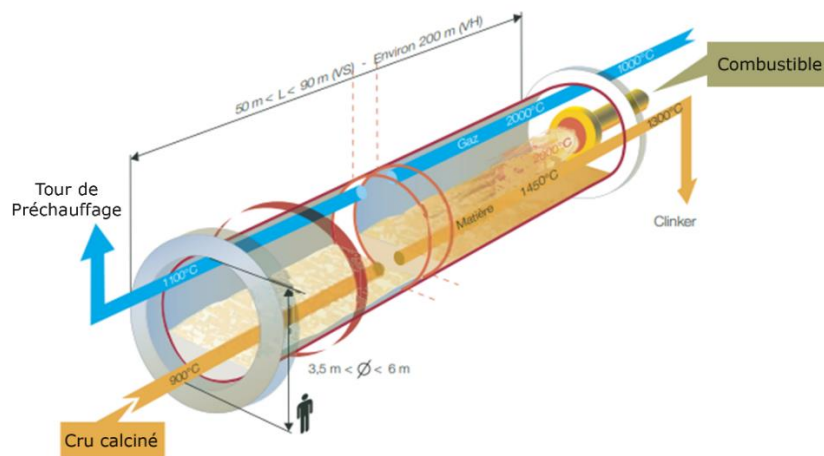


Figure I.7 : Processus de fabrication du clinker [12].

- Le refroidissement

Une fois la zone de cuisson franchie, les propriétés du clinker ne sont pas toutes figées. Pour solidifier la phase liquide, on la refroidit rapidement (trempe), ce qui a un impact positif sur la qualité du ciment final. Ce processus favorise la cristallisation des aluminates et des aluminoferrites tout en évitant la décomposition du C_3S en C_2S et

CaO. Ainsi, les silicates conservent essentiellement leur composition et leur structure d'origine [10].

I.6.3. Broyage ciment

Le clinker, refroidi à 100°C, est acheminé et entreposé dans un vaste hall de stockage assurant une production continue de ciment. Le clinker est ensuite broyé avec du gypse (un régulateur de prise), ainsi que d'autres composants principaux (les fillers calcaires, les pouzzolanes, les laitiers, les cendres volantes) à l'aide d'un broyeur vertical à galets ou d'un broyeur horizontal à boulets. Ce mélange broyé est ensuite dirigé vers un séparateur de particules pour obtenir une poudre fine, à granulométrie ciblée et uniforme : le ciment [10,13].

I.6.4. Stockage et expédition

Le ciment est stocké dans des silos, parfois segmentés en plusieurs sections pour accueillir différents types de ciment. Ensuite, il est conditionné en sacs ou expédié en vrac [10].

I.7. Objectif de l'étude

Si l'industrie cimentière était un pays, elle serait le troisième plus grand émetteur mondial des gaz à effet de serre, avec jusqu'à 2,8 milliards de tonnes, dépassée uniquement par la Chine et les États-Unis [14].

Ce secteur fait face à une pression croissante pour réduire son empreinte environnementale. La fabrication du ciment, essentielle à la construction, repose sur des processus énergivores et polluants, notamment lors de la cuisson du cru pour produire du clinker. Les oxydes d'azote (NOx) figurent parmi les principaux polluants générés. Une solution potentielle est la technique de l'intégration du Précalcinateur "Low-NOx", qui utilise une combustion étagée pour réduire les émissions des NOx en les convertissant en composés moins nocifs. Toutefois, l'adoption de cette méthode peut poser des défis pour le processus de cuisson.

Ainsi, L'objectif de cette étude est de déterminer comment intégrer la technique du Précalcinateur "Low-NOx" pour réduire les émissions des NOx sans compromettre la qualité du

clinker, tout en minimisant les émissions d'autres polluants et en maintenant la stabilité et l'efficacité du processus de production.

I.8. Méthodologie

La méthodologie développée ci-dessous fournit un cadre clair pour structurer notre approche d'étude :

- **Étude préliminaire et revue de la littérature** : Analyse approfondie des sources d'émission des NO_x dans l'industrie cimentière et des techniques de réduction existantes.
- **Analyse du procédé de cuisson** : Description des composants de l'atelier de cuisson du clinker. Étude thermodynamique et analyse des transferts physico-chimiques pour évaluer l'efficacité énergétique du processus.
- **Optimisation opérationnelle** : Suivi des paramètres de fonctionnement de l'atelier de cuisson pour améliorer l'efficacité énergétique et la performance opérationnelle de l'installation.
- **Implémentation de la technique du Précalcinateur "Low-NO_x"** : Évaluation des impacts de la combustion étagée sur les émissions des NO_x et sur les autres polluants. Analyse des effets sur la stabilité opérationnelle du four.
- **Interprétation des résultats** : Présentation et discussion des résultats des mesures primaires et de l'intégration du Précalcinateur "Low-NO_x" dans le processus de fabrication du ciment.

I.9. Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de comprendre le contexte dans lequel notre projet de fin d'études sera effectué. Une description du procédé cimentier nous prépare à l'étude des différents polluants nocifs émis par les cimenteries, notamment les NO_x qui seront traités dans le chapitre II.

CHAPITRE II

Les Émissions Atmosphériques et les Techniques de Réduction des NO_x

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous cadrions le contexte environnemental de l'étude des émissions atmosphériques du secteur cimentier. Nous abordons le changement climatique et ses conséquences, ainsi que la part des cimenteries notamment l'usine CILAS dans les émissions de ces polluants. Nous approcherons ensuite les émissions des oxydes d'azote (NOx), puis les mécanismes de réduction et d'élimination de ces effluents.

II.2. Le changement climatique et les émissions des GES

Les changements climatiques ont depuis longtemps cessé d'être une simple curiosité scientifique. Ils constituent désormais la question environnementale majeure qui domine notre époque et le défi principal auquel les organismes de contrôle environnementaux doivent répondre [15].

Le changement climatique fait référence aux changements à long terme des températures et des schémas météorologiques. Ces changements peuvent être naturels, comme les variations du cycle solaire.

Cependant, depuis les années 1800, les activités humaines sont devenues le principal moteur du changement climatique, principalement en raison de la combustion de carburants fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz. Cette réaction entraîne des émissions des gaz à effet de serre qui agissent comme une couverture autour de la terre, emprisonnant la chaleur du soleil et faisant augmenter les températures [15].

Parmi les gaz à effet de serre responsables du changement climatique, on trouve le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), les oxyde d'azote (NOx) et les gaz fluorés, tels que les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6).

En 2017, le réchauffement causé par les activités humaines s'est établi à 1°C par rapport aux niveaux préindustriels (Figure II.1). Une augmentation pareille de la température mondiale peut avoir des effets significatifs et négatifs sur l'environnement et la santé humaine. Elle peut entraîner des phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents et intenses, tels que

les vagues de chaleur, les tempêtes et les inondations, qui peuvent avoir des impacts dévastateurs sur les populations et les écosystèmes [16].

De plus, une petite augmentation de la température peut perturber les équilibres naturels, entraînant des changements dans les habitats, la biodiversité et les cycles naturels, ce qui peut avoir des répercussions à long terme sur la planète.

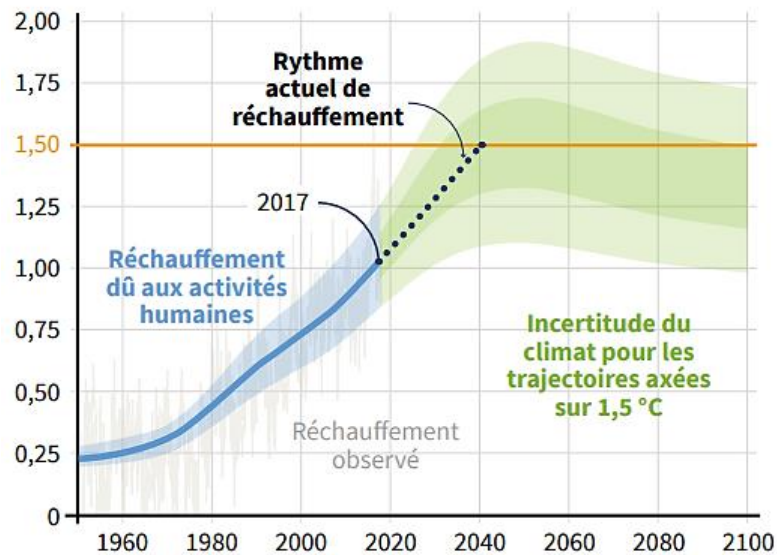


Figure II.1: Evolution de la température mondiale par rapport aux niveaux préindustriels[16].

Le changement climatique représente une menace urgente et potentiellement irréversible pour l'espèce humaine et la planète. Conscients de cela, la grande majorité des pays du monde ont adopté l'Accord de Paris en décembre 2015, dont l'objectif central est de poursuivre les efforts pour limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels [16].

II.3. Le changement climatique en Algérie

L'inventaire national des émissions des gaz à effet de serre montre que les effets du changement climatique sont de plus en plus visibles en Algérie [17]. Ces effets auront des répercussions négatives sur la sécurité alimentaire et l'approvisionnement en eau potable, dégradant non seulement la qualité de vie des citoyens, mais également l'économie du pays.

Au cours des 50 dernières années, une augmentation des événements météorologiques extrêmes a été observée, entraînant des conséquences importantes sur les populations et les infrastructures. Ces conséquences se manifestent souvent par une augmentation des températures moyennes saisonnières, une baisse de la pluviométrie, une exacerbation du stress hydrique et une augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes [18,19].

II.4. Législations internationales et algériennes sur les émissions atmosphériques

Les autorités algériennes se sont engagées, dans le cadre de plusieurs conventions et protocoles internationaux relatifs à la pollution atmosphérique et au changement climatique, à limiter ou à réduire les quantités de certaines substances dangereuses, émises dans l'air.

Le décret exécutif n° 06-138 réglemente les émissions atmosphériques des gaz, fumées, vapeurs et des particules solides ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle. Ce décret fixe les valeurs limites tolérées pour les rejets atmosphériques du secteur des cimenteries, comme indiqué dans le [tableau II.1](#).

LafargeHolcim fixe ces seuils d'émissions en se conformant au programme de la Taxonomie européenne (EU Taxonomy), qui vise à couvrir les secteurs responsables d'une grande part des émissions de gaz à effet de serre (GES) et à promouvoir la transition verte au sein de leurs activités [20].

Tableau II.1 : Les valeurs limites tolérées pour les rejets atmosphériques des cimenteries

Paramètres	Valeurs limites (mg/Nm^3)	
	Valeurs limites de la réglementation algérienne	Valeurs limites du groupe LafargeHolcim (2023)
Les poussières ($PM_{2.5}$, PM_{10})	30	10
Oxydes de soufre	500	150
Oxydes d'azote	1500	700
MoNOxyde de carbone	150	130
Chlorure	30	---
Acide fluorhydrique	5	---

Métaux lourds	5	---
Fluor	5	---
Composés organiques volatils (COV)	---	80

Les récentes directives européennes sur les plafonds d'émission deviennent de plus en plus strictes, imposant des limites plus rigoureuses aux industries afin de réduire la pollution atmosphérique. En réponse à ces exigences, LafargeHolcim Algérie a pris des mesures proactives en développant et en mettant en œuvre ses propres standards environnementaux. Ces standards fixent des seuils maximaux pour les émissions atmosphériques nocives, allant souvent au-delà des exigences réglementaires algériennes.

II.5. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment

L'atténuation des émissions des GES s'articule autour de trois axes [18], (i) l'amélioration de l'efficacité énergétique en réduisant la consommation du gaz naturel et la consommation électrique en optimisant le processus, (ii) l'utilisation de carburants alternatifs comme les déchets solides et les huiles usagés (la co-incinération) et (iii) la réduction de la proportion de clinker en améliorant la composition du ciment par des adjuvants (les poudres de verre [21]).

II.5.1. Les émissions du dioxyde de carbone (CO_2)

Les émissions de CO_2 résultent principalement de la production d'électricité, du transport routier et de la combustion de combustibles fossiles dans le procédé industriel de fabrication du ciment [22]. Deux facteurs influent directement sur les émissions de la cimenterie, tandis que le troisième est considéré comme une source indirecte d'émissions : (i) la décarbonatation du calcaire représente 62% des émissions totales, (ii) la consommation calorifique est responsable de 24% des émissions, et (iii) le reste est attribué à l'alimentation en électricité.

La figure II.2 illustre les émissions de CO_2 de CILAS de Janvier 2022 à Décembre 2023, en les comparant à un seuil de 604 kg/tonne de ciment (VL du groupe) :

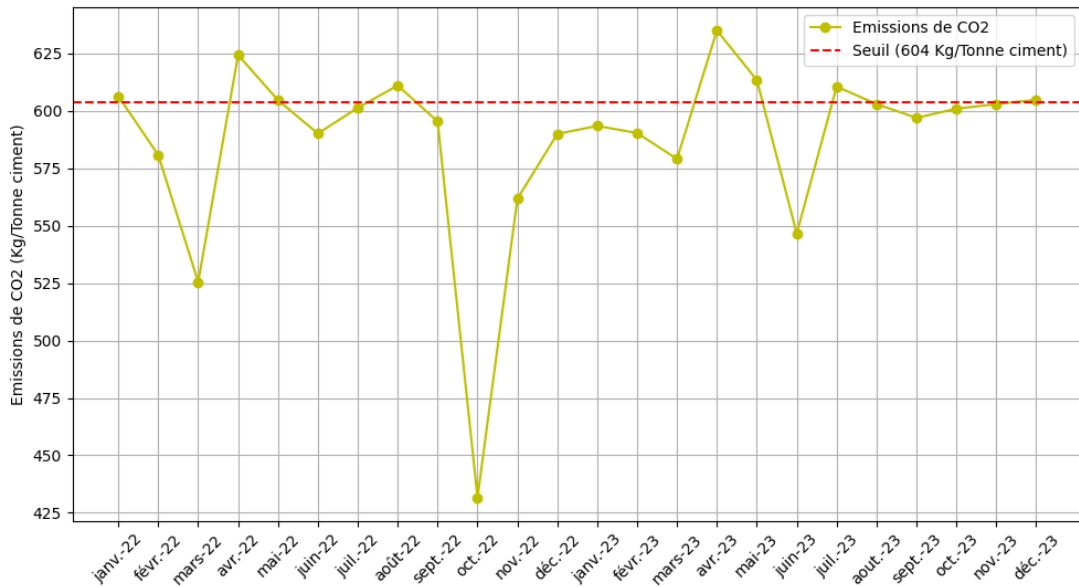


Figure II.2 : Variation des émissions de CO_2 dans la production de ciment

Les émissions de CO_2 varient considérablement, avec des pics dépassant souvent la valeur limite fixée par le groupe LafargeHolcim Algérie. Ces variations sont principalement liées au procédé de cuisson du clinker. Malgré des périodes d'amélioration, ces dépassements soulignent l'urgence d'adopter des mesures pour atténuer les impacts environnementaux. Les émissions de CO_2 entraînent des événements météorologiques extrêmes et des perturbations écologiques intenses. Pour atténuer ces effets, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, telles que l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'utilisation de combustibles alternatifs, la capture et le stockage du carbone, et la substitution partielle du clinker par des matériaux comme les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau [23].

II.5.2. Les émissions des oxydes de soufre (SO_x)

Ces polluants néfastes résultent de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre et de la présence de composés volatils soufrés dans les matières premières utilisées. Cependant, le taux des émissions varie d'une cimenterie à l'autre. Pour réduire ces émissions, les cimenteries peuvent utiliser des combustibles à faible teneur en soufre, mettre en œuvre des systèmes de désulfuration des gaz de combustion, et améliorer le contrôle des processus pour minimiser la libération de SO_x [24].

Les oxydes de soufre (SO_x) contribuent à la formation des pluies acides, qui peuvent endommager les écosystèmes, les sols, les lacs et les forêts, et affecter la santé humaine en aggravant les maladies respiratoires. La [figure II.3](#) illustre la conformité de la cimenterie CILAS aux normes concernant les émissions de ce polluant.

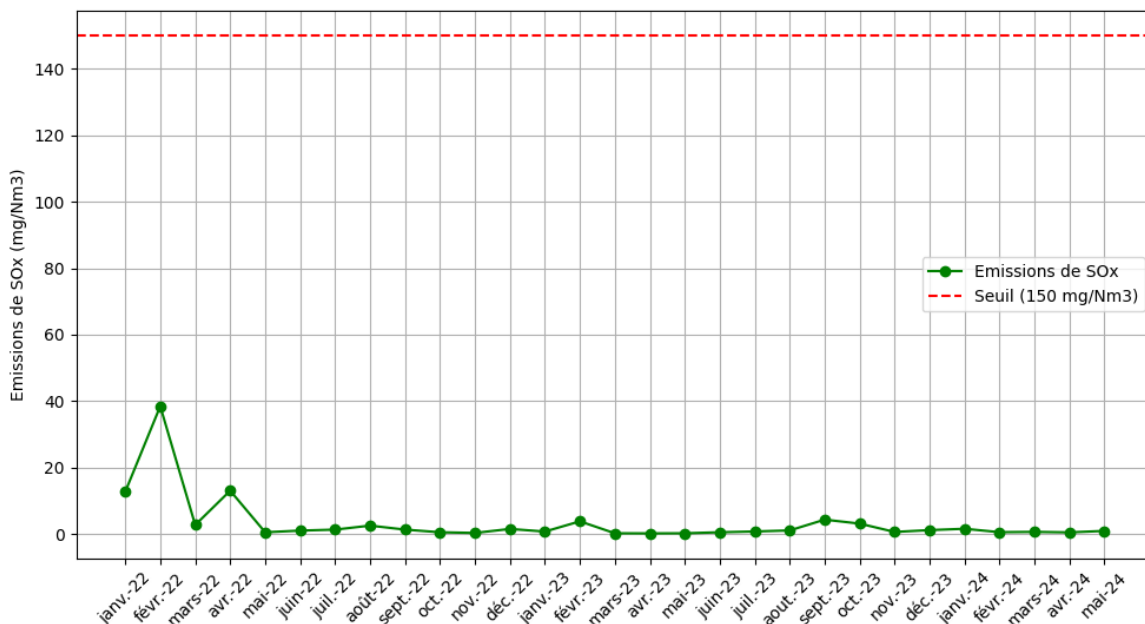


Figure II.3 : Variation des émissions de SO_x

II.5.3. Les émissions de monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est produit par la combustion incomplète de combustibles fossiles dans le four de cimenterie. C'est un gaz toxique qui peut entraîner des problèmes de santé tels que des maux de tête et des étourdissements, et à des concentrations élevées, il peut causer une intoxication au monoxyde de carbone pouvant être mortelle [25]. De plus, le CO contribue indirectement à l'effet de serre en réagissant avec d'autres composés atmosphériques pour former du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'ozone troposphérique (O_3). Des mesures visant à optimiser les conditions de combustion ont contribué à la réduction des émissions CO ([Figure II.4](#)), résultant à la fois du changement dans les processus de combustion et d'améliorations apportées aux systèmes de contrôle.

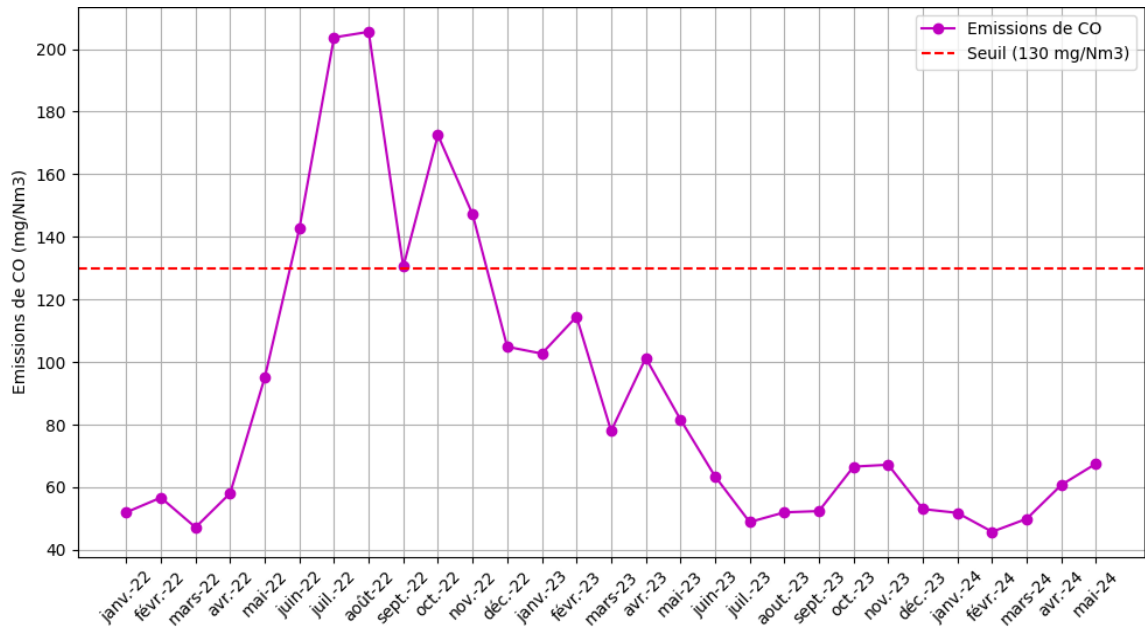


Figure II.4 : Variations des émissions de *CO*

II.5.4. Les émissions des composés organiques volatils (COV)

Les composés organiques volatils (COV) proviennent principalement des matières premières naturelles et des carburants alternatifs utilisés dans le processus de fabrication de ciment. Ils peuvent causer des problèmes de santé comme l'irritation des voies respiratoires et des effets cancérogènes, ainsi que des impacts environnementaux tels que la formation de smog et la perturbation des écosystèmes. Les méthodes d'élimination incluent l'utilisation de filtres à manches, de tours de lavage, et de techniques d'oxydation thermique et catalytique. Des approches de réduction à la source, comme l'utilisation de matières premières à faible teneur en COV, sont également efficaces [26].

La [figure II.5](#) présente le profil des variations des émissions de composés organiques volatils (COV) au cours des deux dernières années.

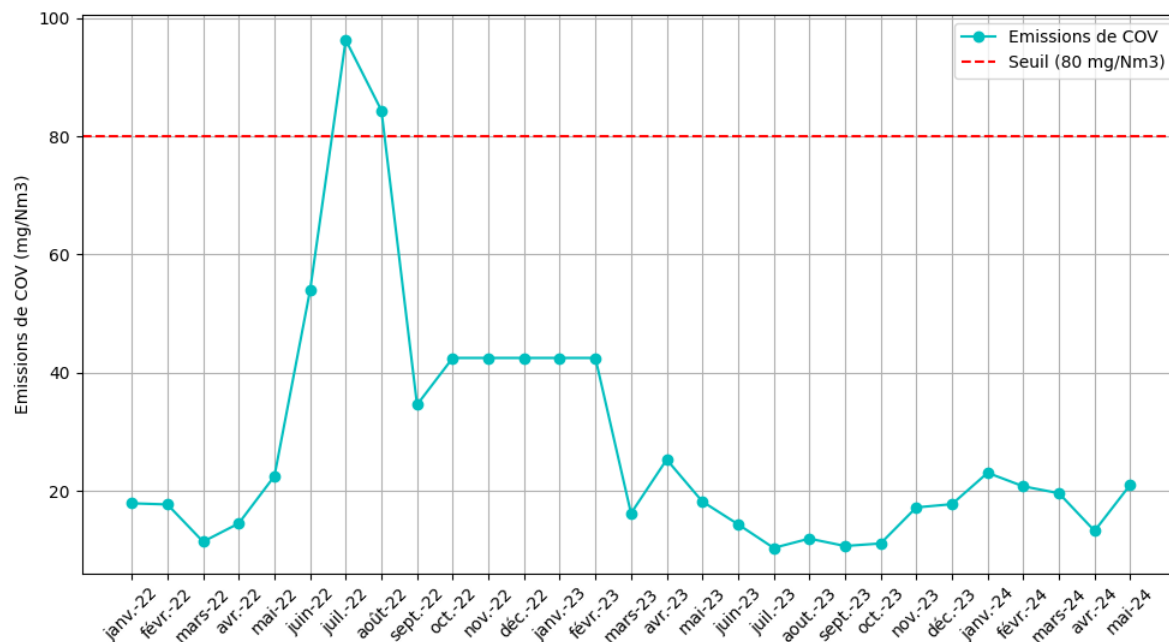


Figure II.5 : Profil des émissions *COV*

La mise en place de procédures de maintenance régulières, l'ajustement des paramètres de fonctionnement des équipements et l'adoption de stratégies de gestion environnementale permet une meilleure gestion de ces polluants atmosphériques.

II.5.5. Les émissions des particules fines (PM_{10} , $PM_{2.5}$)

En cimenterie, les poussières représentent une source importante de pollution environnementale. Ces émissions peuvent nuire à la santé humaine et affecter la vie végétale. Pour réduire leur impact, diverses technologies de contrôle sont mises en œuvre, notamment les filtres à manches, qui capturent les particules fines grâce à des tissus filtrants. Les électrofiltres, quant à eux, utilisent un champ électrique pour attirer et collecter les particules en suspension dans l'air. En outre, l'utilisation d'autres systèmes de confinement et d'aspiration est également employée afin de minimiser la dispersion de ces particules [27].

CILAS opte pour l'utilisation de filtres à manches afin de maîtriser la dispersion des particules fines dans l'environnement. Les poussières récupérées dans les trémies de ces filtres sont réinjectées dans le circuit matière du process.

La [figure II.6](#) illustre l'évolution temporelle du taux d'émissions, fournissant un aperçu de la variation des émissions sur la période observée :

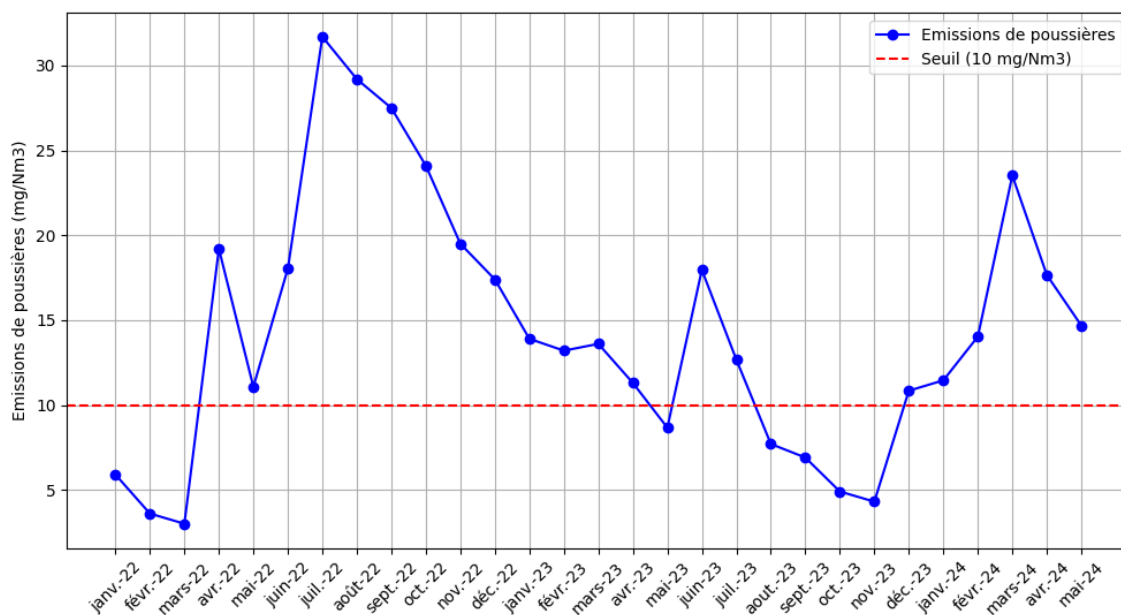


Figure II.6 : Emissions des poussières

Le [tableau II.2](#) récapitule les principales émissions atmosphériques observées dans l'industrie cimentière, fournissant une vue d'ensemble détaillée des propriétés des polluants les plus courants générés par ces activités.

Tableau II.2 : Récapitulation des principaux polluants atmosphériques émis par la cimenterie.

	Caractéristiques	Mécanisme de formation	Source de formation
CO ₂	Gaz incolore, inodore et non inflammable	Moyenne température En-dessus de 400°C	-La décarbonatation -La combustion du gaz naturel
SO ₂	Gaz incolore, irritant et suffocant	Haute température En-dessus de 1000°C	-La combustion du charbon, -fuels -Les matières premières
CO	Gaz toxique, incolore et inflammable	Température de la combustion	-Combustion incomplète
COV	Composé d'hydrocarbures, d'alcools, et divers composés organiques volatils	Très volatils Points d'ébullition bas : Entre 50 et 260°C	-Combustibles fossiles (charbon, coke de pétrole) -Matières premières

Les poussières ($PM_{2.5}$, PM_{10})	Fixer certaines substances polluantes	---	-Les matières premières -Emises le long du procédé cimentier
---	--	-----	--

II.6. Les émissions des Oxydes d'Azote (NO_x)

Les principaux émetteurs des oxydes d'azote (NO_x) sont les véhicules automobiles, les secteurs de la production d'énergie et l'agriculture [28]. Le secteur industriel du ciment est un contributeur important aux émissions de ce polluant atmosphérique, lequel est associé à des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

La famille des oxydes d'azote, regroupés sous la formule NO_x, inclut principalement le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) et le protoxyde d'azote (N₂O). Ces composés se trouvent dans l'air en quantités très variables. Le monoxyde d'azote, représentant environ 90-95% des émissions des NO_x, est un gaz incolore et inodore, très toxique et insoluble dans l'eau. Le dioxyde d'azote, qui constitue environ 5-10% des NO_x est un gaz rouge-brun extrêmement irritant et nocif, formé par oxydation rapide de NO par l'oxygène de l'air ambiant. Le protoxyde d'azote, représentant moins de 1% des émissions, est le quatrième gaz à effet de serre le plus important, contribuant au réchauffement climatique après la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) [29,30].

II.6.1. Conséquences environnementales des Oxydes d'Azote (NO_x)

Les émissions des oxydes d'azote (NO_x) provenant des cimenteries ont des répercussions environnementales significatives, se traduisant par :

- **La pollution de l'air :** Les NO_x contribuent à la formation de smog (l'ozone troposphérique) en réagissant avec d'autres composés organiques volatils (COV) en présence de lumière solaire. Ainsi qu'à la production de particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}) par des processus de transformation chimique dans l'atmosphère. Cette pollution altère la santé des cultures, des forêts et d'autres végétations, tout en exacerbant les problèmes respiratoires [31].

- **Les pluies acides** : Les NOx réagissent avec l'eau dans l'atmosphère pour former de l'acide nitrique, qui retombe ensuite sous forme de pluie acide, endommageant les écosystèmes aquatiques, les sols, et les structures bâties [32].
- **L'eutrophisation** : Les dépôts des NOx peuvent entraîner une surcharge en nutriments dans les écosystèmes aquatiques, causant la prolifération d'algues et la diminution de l'oxygène dans l'eau, ce qui nuit à la vie aquatique [32].

II.7. Mécanismes de formation des Oxydes d'Azote (NOx)

Il existe trois mécanismes de formation des oxydes d'azote dans les cimenteries. La majorité des NOx est formée lors de la combustion dans le four rotatif donnant le NOx-Thermique. Une partie des NOx peut également être formée à partir de l'azote contenu dans les combustibles utilisés, comme le coke de pétrole ou le charbon, et une plus faible quantité des NOx peut provenir de l'azote contenu dans les matières premières, comme les argiles ou les calcaires.

i. Processus de formation des NOx-Thermique

Le NOx-Thermique se forme par l'oxydation de l'azote N_2 contenu dans l'air de combustion lors de son passage à travers la flamme du four rotatif (ANNEXE II). Les principaux facteurs influençant la formation de ce type de NOx sont :

- *La température de la flamme* :

Les NOx-Thermique se produisent dans le four à des températures très élevées, dépassant généralement les 1200°C. Le modèle de "Yakov Borisovich Zeldovich" [33,34,35], explique ce mécanisme par l'ensemble des réactions chimiques, fortement dépendantes de la température:



La réaction globale est donnée par :



La figure II.7 montre bien que la concentration en NOx augmente avec la température élevée.

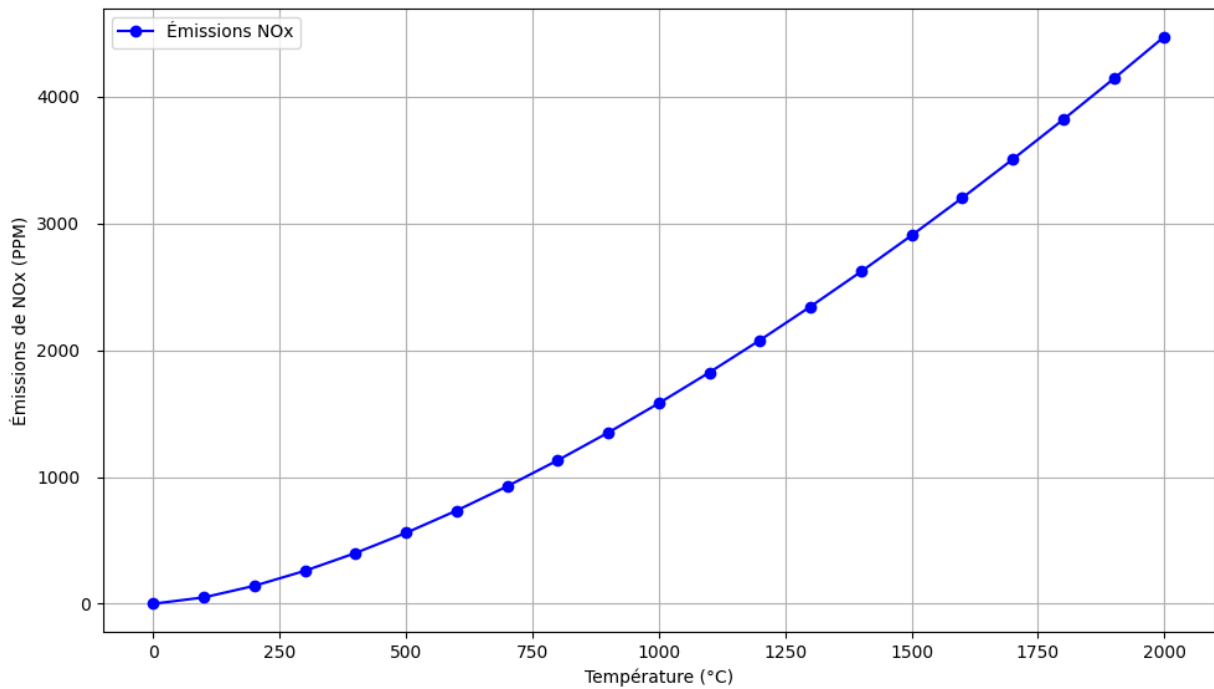


Figure II.7 : Influence de la température sur les émissions des NOx

Il est possible de limiter la formation des NOx-Thermique notamment en optimisant les paramètres de fonctionnement de l'installation, l'objectif étant de limiter la présence de points chauds responsables de la formation des NOx.

- *La disponibilité en oxygène :*

L'excès en oxygène à l'entrée de four (dans la boîte à fumées) provoque la formation d'une plus grande quantité des NOx-Thermiques dans la zone de cuisson [36].

La figure II.8 donne une allure des émissions des NOx à différentes concentrations d'oxygène (en %) :

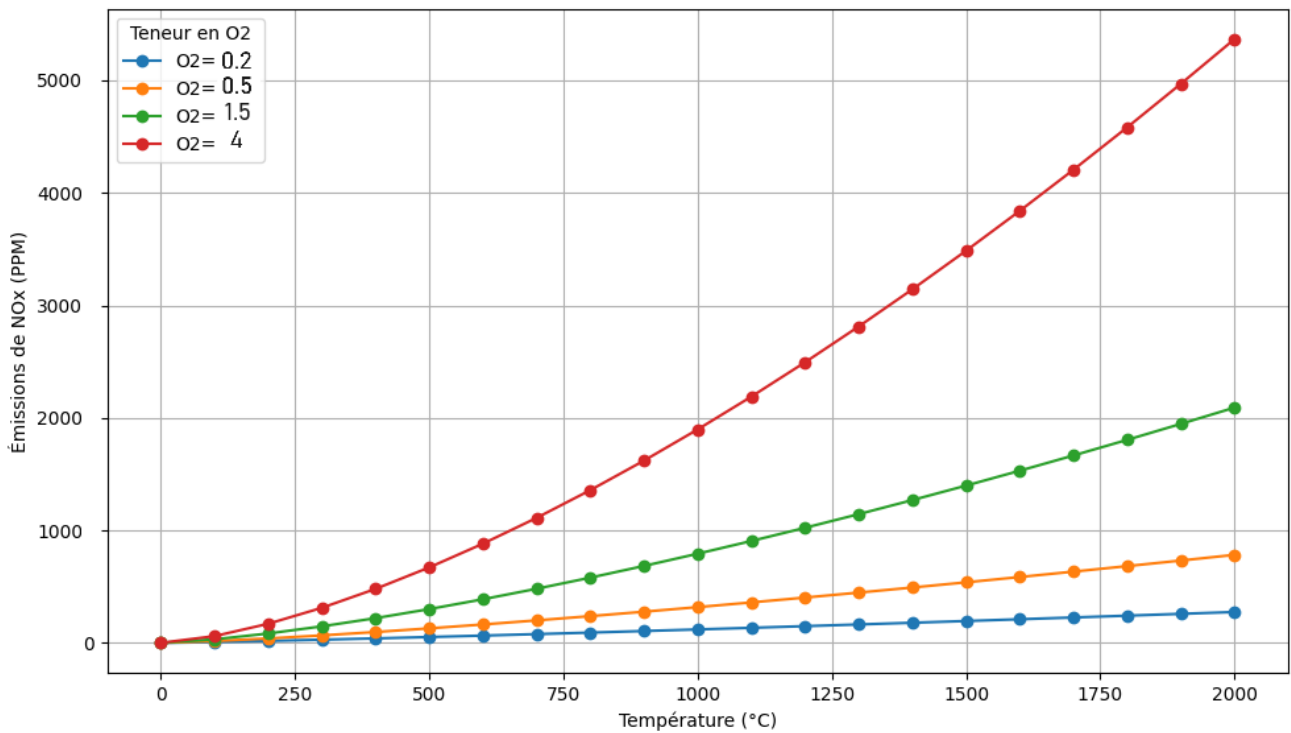


Figure II.8 : Influence de la disponibilité en oxygène sur les émissions des NOx [37]

La formation des NOx-Thermique augmente de manière proportionnelle à la température et à la concentration en oxygène. Cela signifie que plus la température et la quantité d'oxygène sont élevées, plus la production des NOx est importante.

ii. Processus de formation des NOx-Combustible

Les NOx-Combustible sont formés à partir de l'azote contenu dans les combustibles fossiles, essentiellement des charbons ou des combustibles dérivés du charbon [33]. Les liaisons carbone-azote $C-N$ impliquées dans ce processus nécessite beaucoup moins d'énergie de dissociation que la triple liaison $N \equiv N$ impliquée dans la formation du NOx-Thermique. Ainsi, ce mécanisme peut se produire à des températures plus basses [38].

Le mécanisme de formation des NOx-Combustible a été proposé par Fenimore et Jones en 1961 (ANNEXE II). Ce mécanisme est initié par une étape de pyrolyse qui consiste à convertir les composés azotés du combustible en acide cyanhydrique (HCN) et en ammoniac (NH_3), qui sont ensuite transformés en oxydes d'azote par oxydation [39].

Des réactions rapides conduisent à la formation de l'acide cyanhydrique (HCN) et l'ammoniac (NH_3), qui réagissent en milieu oxydant pour former des oxydes d'azote.

Les travaux de Houser (1980) ont également montré que la structure chimique de l'azote dans le combustible (aromatique, cyclique ou amines aliphatiques) influence les radicaux produits lors de la dévolatilisation et du chauffage du combustible [33,40].

Le [tableau II.3](#) ci-dessous montre la teneur en azote des principaux types de combustibles :

Tableau II.3 : Émissions de NO_x par type de carburant

Charbon	Coke de pétrole	Fioul	Déchets	Gaz naturel
40 %	32 %	30 %	22 %	2 %

Les émissions des NO_x peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, y compris le type de technologie de combustion utilisée, les conditions de fonctionnement de l'équipement et les pratiques de gestion des émissions mises en œuvre par les installations industrielles. Cependant, le gaz naturel ([ANNEXE II](#)) est considéré comme produisant moins de NO_x par unité d'énergie produite par rapport à d'autres combustibles fossiles [41].

iii. Processus de formation des NO_x-Matière-Première

La troisième source de formation des NO_x est à partir de l'azote contenu dans les matières premières utilisées pour la fabrication du ciment, comme le calcaire et l'argile. Lors du chauffage des matières premières dans le four, l'azote organique et inorganique contenu dans celles-ci est libéré sous forme de gaz. Ces gaz sont ensuite oxydés pour former des oxydes d'azote prompt [42]. Des études ont indiqué que divers mélanges de matières premières contenaient des quantités appréciables d'azote, allant d'environ 20 ppm jusqu'à 100 ppm (en tant que N). Les valeurs plus élevées (>100 ppm) sont généralement associées à des minéraux présentant des contenus notables en kérogène (confirmer dans la pratique).

II.8. Mesure des NO_x

Les émissions des NO_x sont mesurées et rapportées de nombreuses manières, ce qui peut entraîner de la confusion si que la valeur est considérée et pas l'unité. Les analyseurs

mesurent généralement les ppm en fonction des concentrations d'oxygène réelles. Une conversion en (mg/Nm^3) en fonction d'une concentration d'oxygène standard à 10% est nécessaire pour standardiser le langage entre les usines du groupe (Figure II.8) [42].

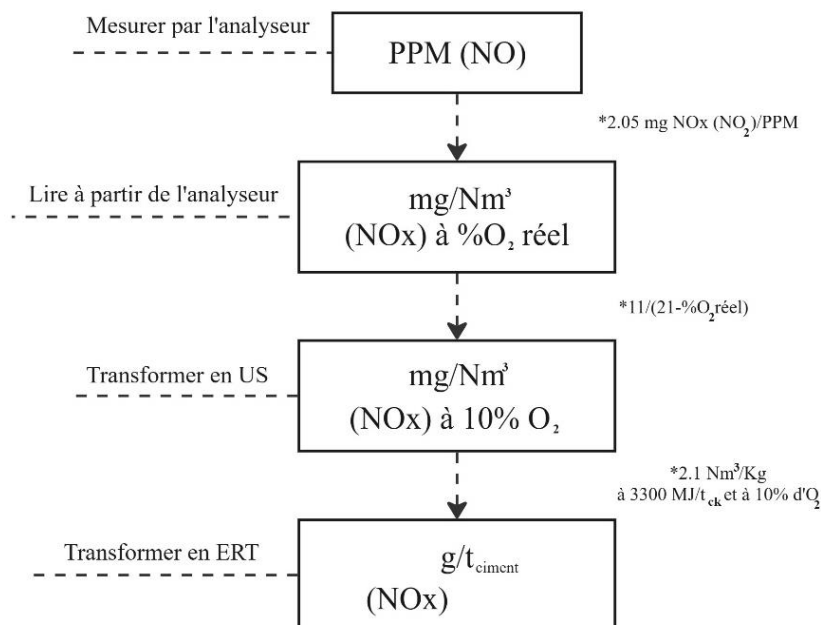


Figure II.9 : Conversion entre les unités de mesure des NOx

II.9. Techniques de réduction des émissions des oxydes d'azote (NOx)

Il existe trois étapes pour réduire les émissions des NOx :

- La première étape consiste à éliminer les précurseurs, ce qui signifie retirer les substances ou composants qui contribuent à la formation de différents polluants. Bien que les précurseurs puissent être réduits, ils ne peuvent pas être entièrement éliminés.
- La deuxième étape implique des mesures primaires, qui visent à réduire les émissions en modifiant et en optimisant les conditions de processus existantes [28].
- La troisième étape consiste en des mesures secondaires, qui impliquent l'installation de technologies de réduction, c'est-à-dire des équipements capables de convertir ou de contenir les polluants. Les mesures secondaires impliquent généralement des coûts plus élevés, tant en investissement initial qu'en frais d'exploitation [28].

i. Les mesures primaires :

Ces méthodes consistent à limiter la formation des NOx à la source en contrôlant les paramètres clés de la zone de combustion. Les approches retenues permettent de réguler la stœchiométrie, l'homogénéité du milieu réactionnel, la température de la flamme et le temps de séjour [43].

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs techniques peuvent être appliquées, notamment :

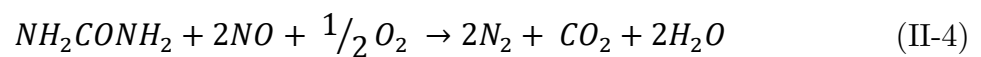
- **Optimisation du procédé** : L'optimisation de la clinkérisation vise à réduire la consommation de combustible, améliorer la qualité du clinker et augmenter la durée de vie du réfractaire du four. Assurer des opérations stables et sans heurts a également pour effet indirect de réduire les émissions des NOx
- **Brûleurs à Bas-NOx** : Les brûleurs à faible teneur en NOx disposent d'une géométrie optimisée permettant de contrôler le mélange air-combustible et la part d'air primaire injectée par la tuyère, ce qui entraîne une formation de NOx moins importante par rapport aux brûleurs traditionnels [44].
- **Refroidissement de la flamme** : L'ajout d'eau pure au combustible, ou directement sur la flamme, réduit la température et augmente la concentration des radicaux hydroxy, ce qui peut avoir un effet positif sur la réduction des NOx dans la zone de combustion. Cependant, cette technique peut provoquer des perturbations dans la marche du four.
- **Combustion étagée** : Cette technique consiste à cuire la matière dans différentes zones à des températures variées, en étalant la combustion dans le four rotatif, le précalcinateur et le préchauffeur à cyclones.
- **Minéralisation du clinker** : Ajuster le dosage des matières premières en ajoutant des minéralisateurs permet d'abaisser la température dans la zone de clinkérisation, ce qui contribue à réduire la formation des NOx.
- **Recirculation des gaz de combustion** : En réinjectant une partie de ces gaz chauds dans la zone de combustion, la température de flamme peut être abaissée, réduisant ainsi la formation des NOx-Thermiques.

ii. Les mesures secondaires :

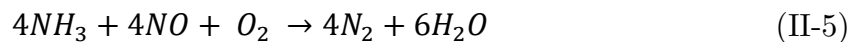
Ces techniques sont généralement associées à des méthodes de réduction mettant en œuvre un traitement des fumées permettant la conversion chimique des polluants déjà formés [45].

- **La réduction sélective non-catalytique (SNCR) :** Cette méthode consiste à injecter un agent réducteur tel que l'ammoniac NH_3 ou l'urée (**Reduction 2.4**) dans les gaz de combustion pour la conversion de NO en azote. La réaction est optimale entre 800 et 1000°C, et le temps de séjour doit être suffisant pour que les agents injectés aient le temps de réagir avec le NO. Les réactions chimiques simplifiées impliquées sont les suivantes :

- Réduction par l'urée :



-Réduction par l'ammoniac :



- **La réduction sélective catalytique (SCR) :** Cette méthode implique l'injection d'un agent réducteur, dans les gaz de combustion en présence d'un catalyseur [46]. Le catalyseur permet de réduire la température de réaction nécessaire à environ 300-400°C, augmentant ainsi l'efficacité de la conversion des NOx en N_2 et en H_2O .

Le [tableau II.4](#) fournit une vue d'ensemble des différentes techniques de réduction des NOx utilisables dans les fours de ciment, en mettant en évidence leur applicabilité, leur efficacité et leurs caractéristiques spécifiques [47].

Tableau II.4 : Récapitulation des techniques de réduction des NOx dans les fours de cimenterie

Techniques de réduction des NOx	Type de four	Niveau de réduction	Coût d'investissement	Caractéristiques
Optimisation de procédé	Toute l'installation	Faible à Modéré (20%)	Faible	Amélioration générale de l'efficacité
Brûleurs à Bas-NOx	Tuyère four et précalcinateur	Modéré (35%)	Élevé	Coût d'investissement initial élevé
Refroidissement de la flamme	Four et précalcinateur	Modéré (35%)	Modéré	Nécessite un control précis de la température
Combustion étagée	Installation verticale	Modéré à Élevé (45%)	Modéré	Plus qu'une zone de combustion
Minéralisation du Clinker	Toute installation	Faible (15%)	Faible	Impact sur la qualité de Clinker
Recirculation des gaz de combustion (FGR)	Avec conduite de récupération d'air chaud	Modéré (35%)	Modéré	Récupération d'énergie en air secondaire et en air tertiaire
SNCR	Préchauffeur Précalcinateur	Modéré à Élevé (45-55%)	Modéré à Élevé	Coût d'investissement élevé sur l'installation d'injection de l'agent réducteur
SCR	Préchauffeur Précalcinateur	Élevé (60-75%)	Élevé	Coût d'investissement élevé, nécessite un catalyseur

Il est important de noter que les pourcentages de réduction sont indicatifs et peuvent varier en fonction des conditions opérationnelles spécifiques de chaque installation.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les effets des émissions atmosphériques des cimenteries sur le changement climatique, avec un accent particulier sur les émissions des NOx, leur mécanisme de formation et les méthodes de réduction adoptées par les cimenteries.

CHAPITRE III

Transformations Physico-chimique &

Procédé Thermodynamique de l'Atelier de Cuisson

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons en profondeur l'atelier de cuisson de la cimenterie CILAS, les composants clés tels que le préchauffeur à cyclone, le précalcinateur, le four rotatif et le refroidisseur à grilles. Une analyse physico-chimique et thermodynamique détaillée de ces éléments est présentée, visant à comprendre les processus impliqués dans la production de ciment.

III.2. Description du procédé de cuisson

Au fil des années précédentes, la recherche s'est intensifiée pour améliorer le procédé de fabrication du ciment en mettant l'accent sur l'optimisation du coût énergétique de production, la réduction des pertes d'exergie et la protection de l'environnement en cherchant à réduire les émissions atmosphériques nocives [48].

Depuis 1966, les fabricants japonais se sont intéressés au développement de la calcination dans la tour de préchauffage (Figure III.1). À l'étape actuelle de l'évolution technologique, la meilleure approche consiste à subdiviser le processus de cuisson en deux installations distinctes :

- Le préchauffage et la précalcination des matières premières
- La clinkérisation dans le four rotatif

La tour de précalcination a pour rôle d'assurer la prédécarbonatation du cru avant son introduction dans le four rotatif pour être cuit et transformer en clinker.

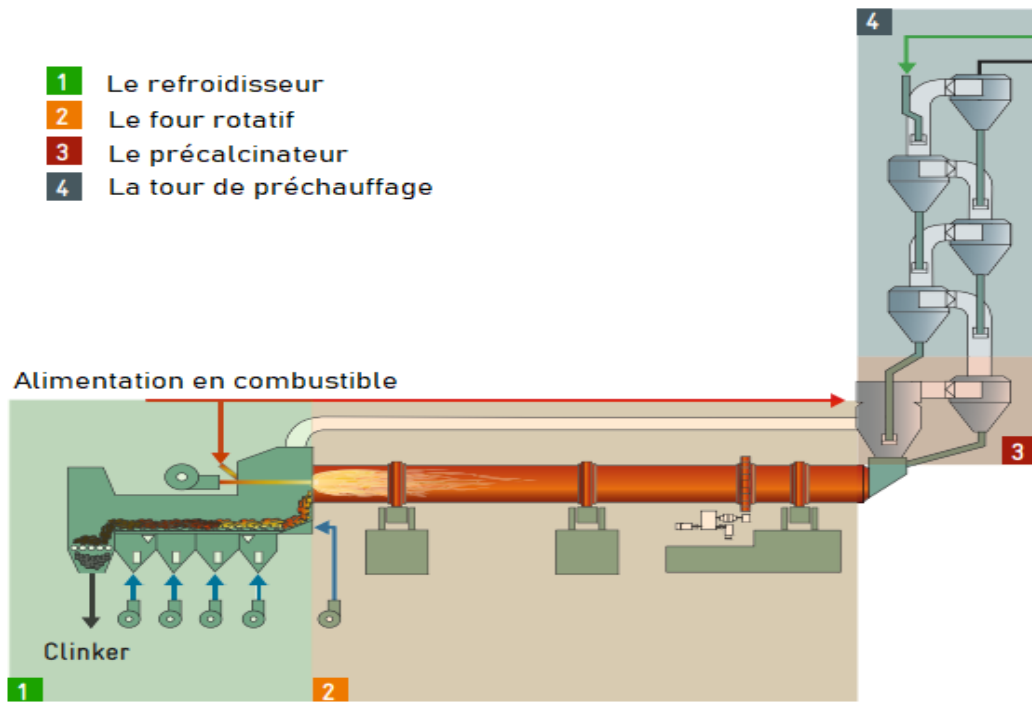


Figure III.1: Atelier de cuisson.

III.2.1. Tour de préchauffage et de précalcination

La tour de préchauffage de CILAS est composée de deux lignes identiques, chacune équipée de 5 cyclones disposés verticalement en série. Pour chaque ligne, le premier étage (le plus haut) comprend deux cyclones jumeaux, suivis de trois autres, qui sont connectés à un précalcinateur. Ce précalcinateur est à son tour relié au dernier cyclone, formant ainsi une configuration appelée Préchauffeur de calcination ILC (Figure III.2) [49,50].

L'usine a été spécialement conçue pour utiliser 100 % de gaz naturel ou de mazout léger comme source principale de combustible. La distribution du carburant est de 38 % injecté dans le brûleur principal du four rotatif, tandis que les 62 % restants sont dirigés vers les brûleurs du précalcinateur.

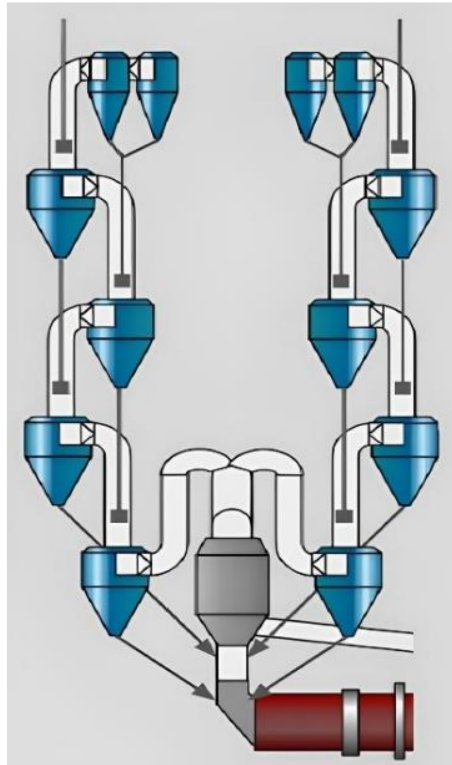


Figure III.2: Préchauffeur ILC à 5 cyclones en double lignes parallèles.

La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz chauds provenant du four, aspirés par le ventilateur (ID fan) du préchauffeur. À l'entrée de chaque cyclone, un éclateur fragmente davantage les particules, dispersant ainsi la matière et augmentant leur surface de contact. Dans ces cyclones ([Figure III.3](#)), le mélange de gaz chaud et de particules solides est introduit tangentiellement, créant un mouvement tourbillonnaire. La force centrifuge pousse les particules solides vers les parois du cyclone, où elles descendent en spirale vers le fond pour être collectées, tandis que les gaz épurés remontent par une ouverture centrale au sommet [\[49,51\]](#).

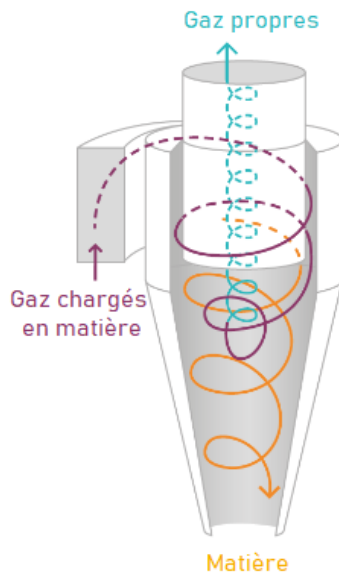


Figure III.3: Le principe de fonctionnement d'un cyclone.

Les gaz chauds, après avoir échangé leur chaleur avec la farine crue à contre-courant, sont ensuite refoulés vers le broyeur cru pour sécher la matière, puis dirigés vers le filtre de dépoussiérage afin d'être évacués dans l'atmosphère à travers la cheminée. Les poussières récupérées sont acheminées vers le silo à cru, assurant ainsi une circulation de matière en circuit fermé. La farine crue partiellement décarbonatée, poursuit son chemin vers le précalcinateur en passant par les quatre cyclones précédents ([ANNEXE III](#)).

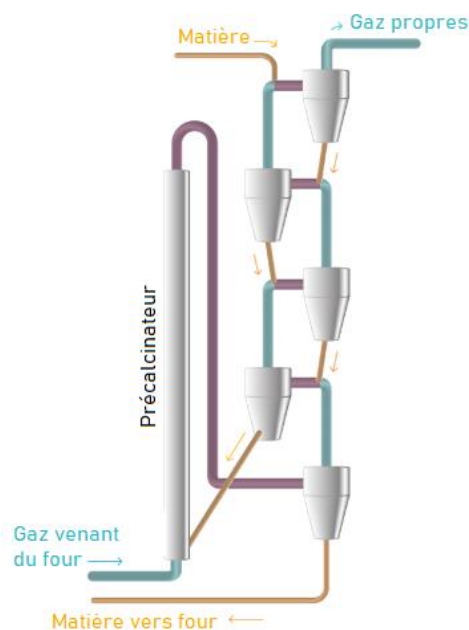


Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'une tour à cyclones.

À la sortie du cyclone 4, la matière entre dans le précalcinateur à une température d'environ 700°C. L'ajout d'un précalcinateur au préchauffeur a un effet bénéfique supplémentaire sur l'efficacité énergétique du processus. La précalcination consiste à transférer l'essentiel de la phase de décarbonatation (environ 90%) vers l'échangeur à cyclones, phase qui s'effectuait auparavant dans le four. Ce qui permet de réduire les dimensions du four tout en maintenant des niveaux de production élevés.

La stabilité et l'efficacité du processus de calcination influencent directement la qualité finale du clinker, le bon fonctionnement ultérieur du four rotatif ainsi que les besoins énergétiques de l'unité de pyrotraitement. Le processus exothermique de combustion du combustible et le processus endothermique de décomposition des carbonates dans la farine crue se produisent simultanément dans le précalcinateur. Un fonctionnement optimal du précalcinateur permet de conserver l'énergie et de réduire les émissions associées à la fois au précalcinateur et au four rotatif. Le degré de calcination, est un indicateur de la performance du précalcinateur. Il est influencé par plusieurs paramètres tels que la température à l'intérieur du précalcinateur, le temps de séjour de la farine crue dans le système, la séparation solide-gaz, l'effet de circulation des poussières et le comportement cinétique des matières premières [51,52,53].

Le degré de calcination est estimé à 95%, il est déterminé par la formule suivante :

$$\text{Degré de calcination} = \frac{PF_{Totale} - PF_{résiduelle}}{PF_{Totale}} \cong 95\%$$

PF_{Totale} : la quantité initiale de la perte au feu présente dans les carbonates

$PF_{résiduelle}$: la quantité restante de la perte au feu dans la matière après la calcination

La perte au feu comprend le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau évaporée (H₂O) lors de la décomposition des carbonates présents dans la farine crue.

III.2.2. Le four rotatif

Après avoir quitté le précalcinateur, la farine crue décarbonatée entre dans le cyclone 5 et poursuit son chemin vers la boîte à fumées, située au pied du préchauffeur et

reliant ce dernier au four. En cas de bouchage à l'entrée du four [54], causé par des gaz chargés en chlore, une partie de ces gaz (jusqu'à 5%) est soutirée au niveau de la boîte à fumées par le système de by-pass.

Le four rotatif est constitué d'un tube métallique ($\varnothing 5 \times 74m$) soutenu par trois stations de roulement. Le corps du four se compose d'une virole insérée dans trois bandages flottants, chacun étant soutenu par des galets. La virole du four est fabriquée de tôles d'acier de différentes épaisseurs, roulées et soudées ensembles. Elle est protégée contre la chaleur des gaz de combustion par un garnissage en briques réfractaires (Figure III.5). La farine décarbonatée est alimentée à l'entrée du four et partiellement progresse vers l'aval sous l'effet de la rotation et la pente du four d'environ 4% par rapport à l'horizontale. En régime nominal, la vitesse de rotation du four est de 4.22 tours par minute [55].

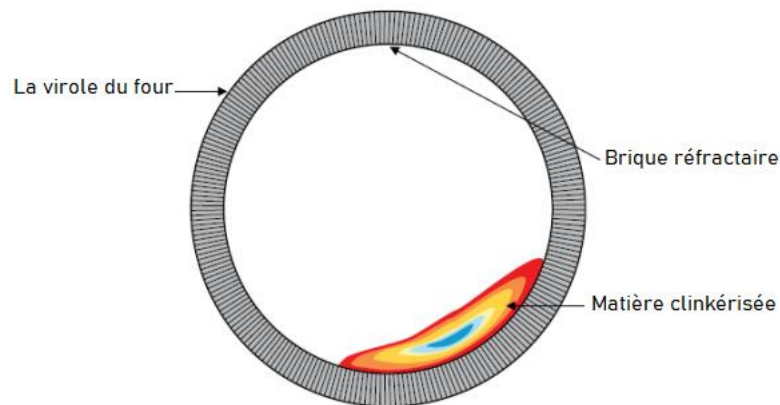


Figure III.5 : Coupe transversale du four rotatif.

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. Une quantité d'air chaud récupéré du refroidisseur (air secondaire) est également utilisée pour la combustion (Figure III.6).

Le débit de gaz est réglé de façon à avoir une température de flamme comprise entre 2000- 2200 °C et un débit d'air de combustion (primaire et secondaire) suffisant pour avoir une combustion complète (un seuil maximal de 2% d' O_2 dans la boîte à fumées).

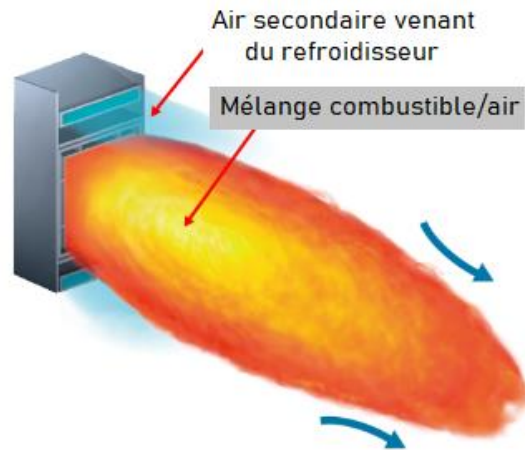


Figure III.6 : Alimentation flamme tuyère bruleur principal.

Les transferts de chaleur dans le four de cimenterie sont répartis de la manière suivante :

- (i) *Rayonnement* : Il représente 80% de l'énergie transmise par la flamme
- (ii) *Convection* : Il représente 15% de l'ensemble du transfert thermique. La vitesse de rotation du four et l'inclinaison de la virole influent sur la circulation des gaz et la distribution de la chaleur
- (iii) *Conduction* : Le reste du transfert de chaleur se produit à travers les parois du four. Une combustion maîtrisée garantit une cuisson plus régulière, améliore la réactivité du clinker et réduit les rejets atmosphériques nuisibles [56].

III.2.3. Le refroidisseur à grilles

Le clinker sort du four à une température d'environ 1450°C et entre dans le refroidisseur. Il est directement trempé avec un refroidissement violent pour figer ses caractéristiques, puis il se refroidit progressivement jusqu'à une température d'environ 130°C en se déplaçant sur les grilles (Figure III.7). Le résultat de l'échange thermique entre le clinker et l'air soufflé d'une température ambiante par les dix ventilateurs du refroidisseur est un gaz chaud. 38% de ces gaz sont récupérés et envoyés (i) vers le four rotatif pour contribuer à la combustion comme air secondaire (environ 15%) et (ii) 23% sont envoyés à la conduite d'air tertiaire pour contribuer à la combustion dans le

précalcinateur. Le reste est considéré comme air d'évacuation, utilisé pour le séchage des matières dans le broyeur [57].

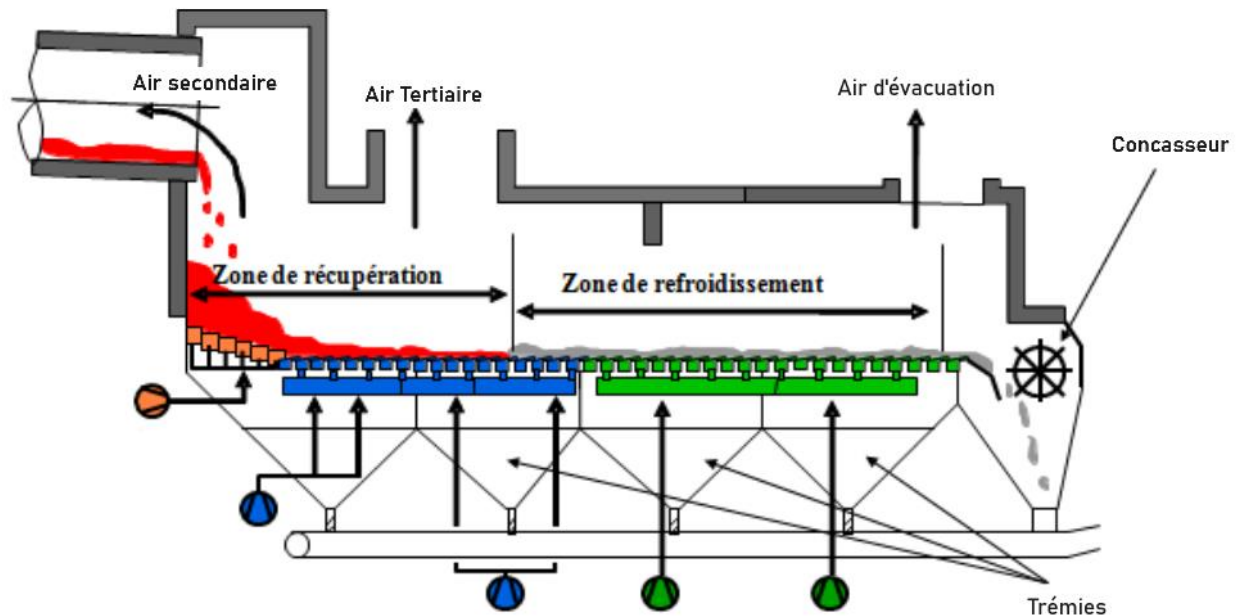


Figure III.7 : Le refroidisseur à grilles

III.3. Transformations Physico-chimiques de l'atelier de cuisson

La cuisson consiste à faire subir à la farine crue, des transformations physico-chimiques qui aboutissent à la formation du clinker. Le cru est alimenté à la tête du préchauffeur et descend à travers les cyclones des cinq étages jusqu'au précalcinateur, puis à la boîte à fumée avant d'être introduit dans le four rotatif [58,59].

En cimenterie, des abréviations sont utilisées pour simplifier le langage plutôt complexe :



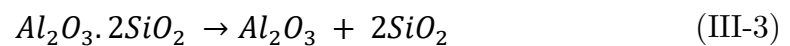
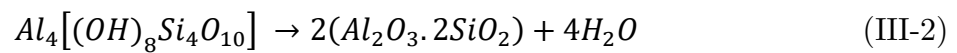
III.3.1. Première transformation : L'échauffement

Dans la tour à cyclones, la matière s'échauffe par convection au contact des gaz chauds sortant du four, et remontant la tour à contre-courant [58]. D'étage en étage, la farine arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, atteignant une température de 800°C.

Les transformations physico-chimiques commencent par le séchage et la déshydratation de la matière entrante à 80°C. L'opération débute à 100°C par l'évaporation de l'eau présente dans le mélange cru, et se poursuit par la déshydratation de l'eau de liaisons entre molécules.

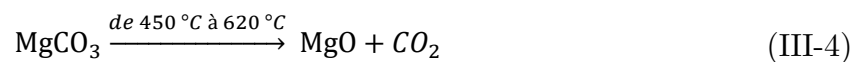


L'argile perd son eau cristalline par une déshydratation de l'eau de sa constitution entre 250 et 450°C.

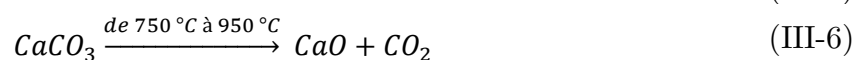


III.3.2. Deuxième transformation : La décarbonatation

Une décarbonatation partielle commence dans les cyclones du préchauffeur à une température de 450°C : C'est la décarbonatation de carbonate de magnésium.



La décarbonatation se poursuit dans le précalcinateur pour la formation de la chaux à partir de carbonate de calcium. Une oxydation du carbone organique présent lors de la combustion libère une quantité significative de dioxyde de carbone (CO_2) :



L'obtention de la chaux vive (CaO) est accompagnée d'un important dégagement gazeux en CO_2 et en H_2O (la perte au feu). Ainsi, la chaleur sépare l'argile en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) et en oxyde de fer (Fe_2O_3), d'où les alcalins constituant le clinker sont prêts à être combinés dans le four ([Tableau III.1](#)).

Tableau III.1 : Constituants de cru entré four.

Teneur en %	Oxydes						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O, K ₂ O	SO ₃
Limite	60 - 69	18 - 24	4 - 8	1 - 8	< 5	< 2	< 3
Moyenne	65	21	6	3	2	1	1

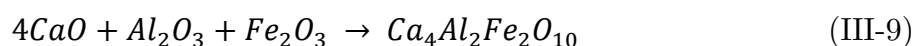
III.3.3. Troisième transformation : La clinkérisation

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, se combinent à la chaux (CaO) provenant du calcaire pour former des silicates et des aluminates de calcium créant ainsi de nouveaux composés chimiques appelés 'minéraux hydrauliques' qui font partie de la composition minéralogique du clinker ([ANNEXE III](#)). La clinkérisation se déroule dans le four rotatif, où la chaleur est transférée par convection entre les gaz et la matière, par conduction entre la paroi et la matière, et par rayonnement entre la flamme et la matière [60].

Les réactions de formation des minéraux hydrauliques sont endothermiques :



Entre les températures 1260 et 1338°C les (C_3A) et (C_4AF) se forment, donnant naissance à la phase liquide qui favorise la formation de l'alite (C_3S).



Les (C_3S) se forment par une combinaison des (C_2S) avec la chaux libre restante, selon un processus exothermique :



Le [tableau III.2](#) présente la teneur en différents composants chimiques du clinker. Il est important de respecter les limites de ces composants pour assurer les propriétés mécaniques et chimiques du clinker, et ainsi maintenir la qualité du produit final.

Tableau III.2 : Les constituants de clinker.

Nom cimentier		Formule chimique	Teneur moyenne [% en poids]
Principaux minéraux de clinker			
Silicate tricalcique (Alite)	C_3S	Ca_3SiO_5	60 %
Silicate bicalcique (Bélite)	C_2S	Ca_2SiO_4	16 %
Aluminate tricalcique	C_3A	$Ca_3Al_2O_6$	10 %
Aluminoferrite tétracalcique	C_4AF	$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	7 %
Composants mineurs			
Chaux libre	C_l	CaO_l	2 %
Oxyde de magnésium		MgO	1 %
Sulfate de potassium		K_2SO_4	0.5 %
Sulfate de sodium		Na_2SO_4	0.5 %

III.3.4. Quatrième transformation : Le refroidissement

La phase liquide favorise les recombinaisons de clinkérisation (fin de formation de C_2S et début de formation de C_3S). A la sortie de four, le clinker est trempé (par un refroidissement violent) et refroidi pour figer ses caractéristiques et empêcher les réactions inverses [57].

Un refroidissement lent provoque trois transformations indésirables :

- i. La décomposition du C_3S en C_2S et en CaO ce qui diminue la résistance du ciment à court terme,
- ii. La cristallisation de la magnésie (MgO) indépendamment de la phase liquide, provoquant l'expansion du ciment lors de l'hydratation,
- iii. Le C_2S change de réseau cristallin modifiant ainsi les propriétés du ciment.

Une partie de l'air soufflé pour refroidir le clinker est récupérée et transférée vers le four (air secondaire) et vers le précalcinateur (air tertiaire). Le clinker sort avec une température d'environ 130°C. La [figure III.8](#) illustre la formation des composants du clinker en fonction des températures du milieu.

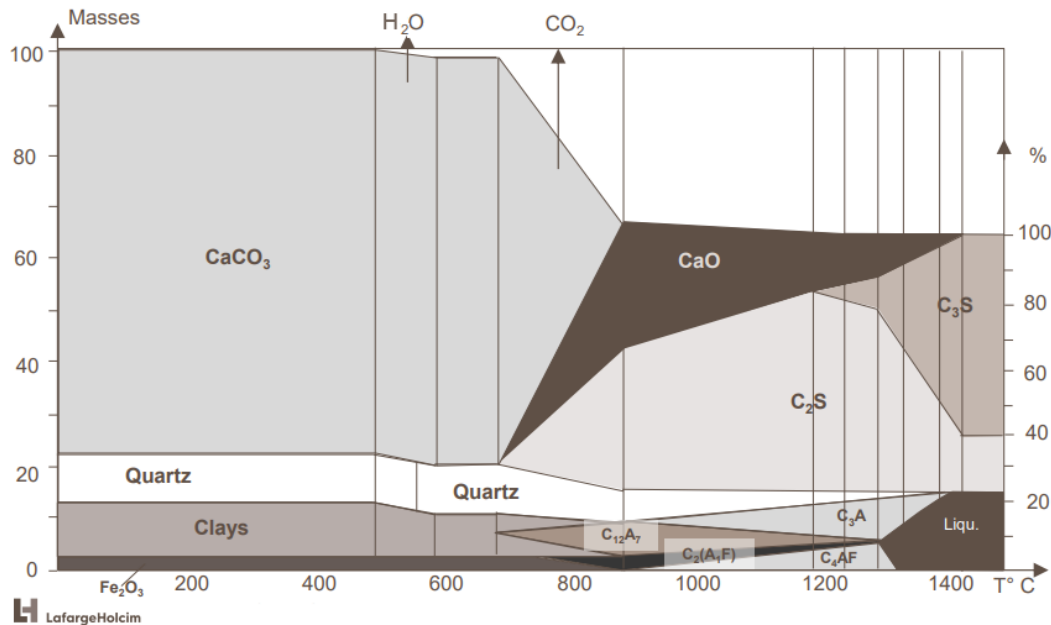


Figure III.8 : La formation des constituants du clinker

III.4. Analyse thermodynamique de l'atelier de cuisson

L'analyse énergétique se base sur le 1^{er} principe de la thermodynamique, aussi connu sous le nom de principe de la conservation de l'énergie. Il signifie simplement qu'il est possible de rendre compte de l'énergie car cette dernière ne se crée ni ne se perd dans les installations et les systèmes en exploitation [61].

En effet, connaître précisément comment l'énergie est utilisée dans une installation permet de trouver des solutions pour optimiser cette consommation, réduire les coûts énergétiques et diminuer les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent aux changements climatiques.

Un bilan massique et énergétique est réalisé sur les unités de pyrotraitement ([Figure III.9](#)). Une évaluation des flux entrants et sortants révèle les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique.

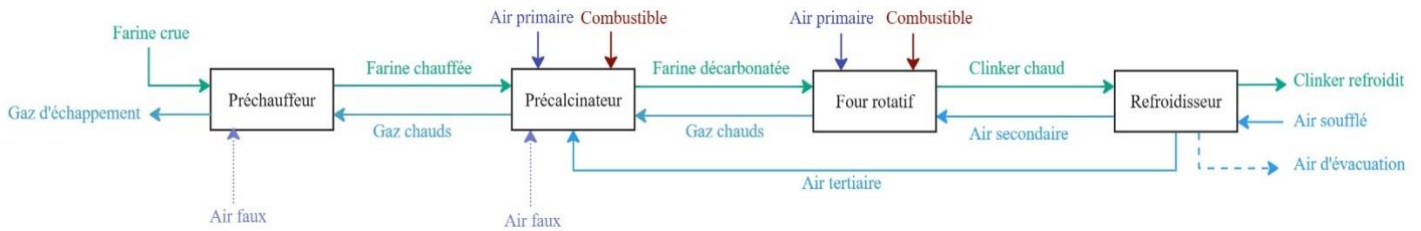


Figure III.9 : Le schéma représentatif des flux échangés dans la ligne de cuisson

Le [tableau III.3](#) donne les conditions opératoires de l'installation Four PH/PC

Tableau III.3 : Conditions opératoires -Four PH/PC

Paramètres	PH	PC	Four rotatif
Température des gaz [°C]	350-950	850-1100	1100-2200
Température des matières [°C]	90-750	750-950	950-1520
Temps de résidence	2 minutes	2-4 secondes	25 minutes

III.4.1. Le bilan massique

Le bilan matière de l'atelier de cuisson du clinker consiste à quantifier et analyser les flux de matières premières et de produit à différentes étapes du processus.

Le [tableau III.4](#) et le [tableau III.5](#) donnent les flux massiques des gaz et des solides respectivement.

- *Bilan de matières gaz*

Le débit massique des gaz est mesuré dans les conditions opératoires, puis converti aux

conditions normales : $\begin{cases} T = 0\text{ °C} \\ P = 1\text{ atm} \end{cases}$

Tableau III.4 : Bilan de matières gaz

Bilan Refroidisseur	Débit	
	Nm^3/h	$Nm^3/kg\text{ Clinker}$
Input (Flux d'entrées)		
Air soufflé de refroidissement	479 722	1.89

Air faux	6 600	0.03
Total des Input	486 322	1.92
Output (Flux de sorties)		
Air secondaire	68 698	0.27
Air tertiaire	114 672	0.45
Air d'évacuation	295 000	1.17
Erreur de mesure	1.6 %	
Total des Output	486 322	1.92

Ce bilan de matière des gaz a permis d'assurer que le système fonctionne correctement mais aussi d'identifier et d'estimer les pertes dues aux airs faux (~1.5% de l'air total dans l'installation). Ces informations sont essentielles pour optimiser le processus et pour améliorer l'efficacité énergétique. L'optimisation peut inclure des améliorations dans l'étanchéité des équipements, des contrôles de flux d'air plus précis, et des ajustements dans la gestion du système de ventilation.

- *Bilan de matières solides*

Le principe de conservation de la matière stipule que, lors de toute transformation, les masses initiales se retrouvent entièrement dans le résultat final. Elle permet ainsi l'établissement d'une certaine forme de comptabilité dans laquelle "Tout ce qui entre" est nécessairement égal à "Tout ce qui sort".

Tableau III.5 : Bilan de matières solides

Bilan Four	Matière humide (t/h)	LOI (En % H_2O)	Matière séchée (t/h)	LOI (En % CO_2)	Matière (t/h)
Input (Flux d'entrées)					
Alimentation matière	420.0	0.4	418.2	35.6	269.3
Total des Input					269.3

Output (Flux de sorties)					
Clinker	-	-	253.0	0.2	252.5
Poussière gaz d'échap	23.0	0.2	23.0	35.1	14.9
Poussière de by-pass	1.2	-	1.2	-	1.2
Erreur de mesure	0.3 %				
Total des Output					269.3

III.4.2 Le bilan énergétique

Ce bilan consiste à compiler toute l'énergie fournie au four à partir du refroidisseur et de combustible injecté, puis à comparer ce total avec le travail thermique total effectué et les pertes de chaleur qui surviennent dans le système. Toute chaleur introduite dans le four (Input) doit être compensée d'une manière ou d'une autre par la chaleur qui sort du système (Output). Pour ce faire, il est nécessaire de tester réellement le système dans des conditions de fonctionnement normales ([Tableau III.6](#) et [Tableau III.7](#)).

La chaleur sensible peut être exprimée par :

$$H = Q \times C_p \times (t_2 - t_1)$$

Où :

Q = Quantité par kg de clinker (quantité = masse ou volume)

t_2 = Température mesurée

t_1 = Température de référence

C_p = Valeur de la chaleur spécifique sous pression constante.

- *Bilan énergétique du refroidisseur*

L'analyse du premier principe de la thermodynamique est une procédure essentielle qui prend en compte les transferts d'énergie entrant et sortant de notre système, ainsi que les modifications de l'énergie interne ([Tableau III.6](#), [III.7](#), [III.8](#)). Elle consiste à établir une équivalence entre le travail accompli et la quantité de chaleur nécessaire pour le réaliser.

Tableau III.6 : Bilan énergétique du refroidisseur

Bilan énergétique du refroidisseur	Spécifications			Energie	
	$Nm^3/kg Ck$	$C_p (\frac{KJ}{kg ^\circ C})$	T ($^\circ C$)	$KJ/kg Ck$	$Kcal/kg Ck$
Température de référence : 20°C Température ambiante : 13°C Pression ambiante : 980 mbar Air primaire : 8260 Nm^3/h STEC : 3041 $KJ/kg Ck$					
Input (Flux d'entrées)					
Clinker	1.03	1.11	1440	1620	387
Air soufflé	1.90	1.30	12	-19.7	-4.7
Air faux	0.03	1.30	13	-0.2	-0.1
Total des Input				1600.1	382.2
Output (Flux de sorties)					
Clinker	1.00	0.81	131	89.7	21.4
Air secondaire	0.27	1.42	1120	438.1	104.6
Air tertiaire	0.45	1.42	1050	680.5	162.5
Air d'évacuation	1.17	1.32	270	384.6	91.9
Radiation				17.8	4.3
Erreur				-10.6	-2.6
Total des Output				1600.1	382.2

- *Bilan énergétique de la tour de cuisson*

Tableau III.7 : Bilan énergétique de la tour de cuisson

Bilan énergétique du four	Spécifications			Energie	
	$Nm^3/kg Ck$	$C_p (\frac{KJ}{kg ^\circ C})$	T ($^\circ C$)	$KJ/kg Ck$	$Kcal/kg Ck$
Température de référence : 20°C Température ambiante : 13°C Pression ambiante : 980 mbar Production Clinker : 6072 t/j STEC : 3041 $KJ/kg Ck$					
Input (Flux d'entrées)					
Combustible				3041.4	726.4

Alimentation matière	1.66	0.88	90	103.4	24.7
Air primaire	0.03	1.30	53	2.2	0.5
Air soufflé	1.89	1.30	12.0	-19.7	-4.7
Total des Input				3129.5	747.5
Output (Flux de sorties)					
Transformation Clinker				1750.0	418.0
Evaporation de l'eau	0.01		2450	17.2	4.1
Gaz d'échappement				516,8	123.4
Air d'évacuation	1.17	1.32	270.0	384.6	91.9
Clinker	1.00	0.81	131	89.7	21.4
Poussière de by-pass				37,7	9
Radiation et Convection	Tour préchauffeur			149.9	35.8
	Four			147.7	35.3
	Refroidisseur			17.8	4.3
	Conduite air tertiaire			23.0	5.5
Erreur : -0.2 %				-5.0	-1.2
Total des Output				3129.5	747.5

- Chaleur de formation de clinker

La chaleur de formation englobe toutes les réactions principales pour transformer le cru en clinker.

Tableau III.8 : Enthalpie de transformation de clinker

Transformation de Clinker	
Chaleur absorbée (Réactions endothermique)	<i>KJ/kg Ck</i>
Echauffement des matières premières (90°C-450°C)	712
Déshydratation de l'argile	165
Préchauffement des matières premières (450°C-900°C)	817
La décarbonatation (900°C)	1990
Clinkérisation	523
La phase liquide	105
Chaleur absorbée Totale	4312
Chaleur libérée (Réactions exothermique)	<i>KJ/kg Ck</i>
Cristallisation de l'argile	42
Formation des phases du clinker	420
Refroidissement de clinker (1400°C-20°C)	2100

Chaleur libérée Totale	2562
L'Energie nécessaire pour produire 1kg de Clinker	1750 ^{KJ}/_{kg Ck}

III.4.3. Résultats de l'analyse des bilans de matière et d'énergie

- **Bilan massique** : Les résultats de la pesée du clinker et des relevés du doseur des matières premières démontrent la précision du système de dosage, avec une marge d'erreur négligeable de 0,3 %, bien en dessous de la valeur en référence de 3%. Les airs faux sont estimés à 1,5%.
- **Bilan énergétique** : La différence entre l'apport total de chaleur et la sortie totale de chaleur est de -0,2%, équivalant à -5.0 KJ/kg clinker. La consommation spécifique de chaleur obtenue est de 3041 KJ/kg clinker, ce qui est inférieur à la plage cible de Holcim de 3100 à 3200 KJ/kg clinker. Cette optimisation a un impact positif sur la température des gaz d'échappement du four, qui se stabilise autour de 279°C.

Les principaux résultats des bilans sont résumés dans le [tableau III.9](#).

Tableau III.9 : Résultats des bilans

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Consommation énergétique STEC optimisée à 3042 KJ/Kg clinker -Température sortie PH à 279 °C - Très bonne efficacité du cyclone, 94,5 % - Bonne température du précalcinateur, à 860 °C - Haute température de l'air secondaire et l'air tertiaire, 1120°C et 1050°C -Emissions CO maîtriser -Grandes réserves dans le système de dérivation -Airs faux maîtriser, 1,5% < 5% (VL Ref) 	<ul style="list-style-type: none"> - Température élevée du clinker sortie refroidisseur, 131°C -Analyseur défaillant, montre des valeurs incorrectes, 7% au lieu de 1.5% - Analyseur de gaz du précalcinateur hors service - Pertes de chaleur élevées dans le préchauffeur, 150 KJ/Kg -Airs faux PH peut être amélioré à 1%

III.5. Conclusion

Ce chapitre a fourni une analyse exhaustive de l'atelier de cuisson de la cimenterie CILAS. Grâce à une étude physico-chimique et thermodynamique, nous avons mis en lumière les interactions complexes et les transformations de matériaux qui se produisent dans ces équipements. L'optimisation de ces processus est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions, contribuant ainsi à une production de ciment plus durable et respectueuse de l'environnement.

CHAPITRE IV

Application Industrielle &

Résultats du Précalcinateur "Low-NO_x"

IV.1. Introduction

Le chapitre aborde l'application industrielle et les résultats obtenus suite à l'intégration du Précalcinateur "Low-NOx" dans la cimenterie CILAS. Plusieurs mesures préalables ont été prises, notamment l'optimisation des processus de production et une gestion opérationnelle rigoureuse.

IV.2. Le développement d'un Précalcinateur "Low-NOx"

La principale source d'énergie thermique utilisée pour la production de clinker provient de la combustion des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Cependant, des avancées technologiques ont permis le développement de Précalcinateurs "Low-NOx". Ces équipements, introduits pour la première fois en 1988 par "Humboldt Wedag" à l'usine de Norcem en Norvège, ont depuis subi de nombreuses améliorations. Ces améliorations ont abouti à un modèle optimal, capable de réduire de manière significative la quantité de NOx-Thermiques générés, tout en optimisant la consommation énergétique [62].

IV.3. Techniques de contrôle des émissions NOx

Les approches de contrôles des émissions des oxydes d'azote (NOx) peuvent être regroupées en deux catégories. Les approches de contrôle de la combustion, où l'accent est mis sur la réduction de la formation des NOx :

- (i) L'optimisation du processus qui vise à améliorer l'efficacité énergétique,
- (ii) La maîtrise opérationnelle par le contrôle des paramètres de cuisson afin de réduire la formation des NOx-Thermiques,

Les approches de contrôle postcombustion, qui contrôlent les NOx formés lors du processus de combustion :

- (iii) L'intégration des brûleurs "Low-NOx" du précalcinateur dans le processus.

IV.3.1. L'optimisation de procédé

Une combustion maîtrisée est nécessaire pour assurer une meilleure régularité de cuisson et éviter des anomalies telles qu'un dégagement de monoxyde de carbone (CO) lors d'une combustion incomplète, un excès d'air et une consommation plus élevée de combustible, une dégradation de la qualité du clinker (sur-cuisson ou sous-cuisson), ainsi que la détérioration du réfractaire du four.

Pour contrôler efficacement les émissions des NOx-Thermiques, un réglage précis de la tuyère du brûleur principal du four rotatif est nécessaire. La combustion est assurée par une alimentation étagée en combustible et en air primaire, qui est soufflé par la tuyère et représente 10 % de l'air total nécessaire à la combustion. Le reste de l'air est fourni par l'air secondaire provenant du refroidisseur, à une température d'environ 1120°C. La chaleur récupérée de l'air secondaire permet de réduire la consommation de gaz naturel dans le four.

i. Contrôle des ratios d'air primaire et secondaire

L'air primaire est responsable de la forme de la flamme, tandis que l'air secondaire assure une bonne turbulence entre l'air et le combustible. Le rapport entre l'air primaire, qui doit être maintenu à 10 % pour une consommation calorifique optimale sans excès d'air, et l'air secondaire, qui alimente le reste de la combustion ($\frac{\text{Air primaire}}{\text{Air secondaire}}$) doit correspondre à un ratio bien déterminé pour assurer une combustion complète.

Le niveau d'oxygène dans la boîte à fumée doit être compris entre deux valeurs limites :

$$1\% < O_2 \text{ (mesuré dans la boîte à fumées)} < 3\%$$

Un niveau d'oxygène inférieur à la limite minimale peut entraîner une condensation de soufre à l'entrée du four, causant un bouchage par sédiments de SOx. Un niveau d'oxygène supérieur à la limite maximale indique un excès d'air non nécessaire, qui consomme plus d'énergie et altère la composition et la qualité finale du clinker [63].

ii. Contrôle de la température et de l'excès d'air dans la zone de combustion

La surveillance continue des émissions d'oxygène et de monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement du four à ciment indique la quantité d'air en excès ([ANNEXE IV](#)). À un niveau donné d'air en excès, les émissions des NOx augmentent à mesure que la température de la zone de combustion augmente. La plage de température typique des solides dans la zone de combustion du four est d'environ 1430 à 1480°C. Maintenir la température de la zone de combustion à une valeur minimale nécessaire permet de minimiser à la fois les besoins énergétiques du processus et les émissions des oxydes d'azote ([Figure IV.1](#)).

En plus de la température appropriée, il est également nécessaire de maintenir une atmosphère oxydante dans la zone de cuisson du clinker pour garantir la qualité du clinker produit. Bien qu'un four puisse fonctionner avec un niveau d'oxygène dans les gaz d'échappement aussi bas que 0,5 %, les opérateurs de four s'efforcent généralement d'atteindre un niveau d'oxygène de 1 à 2 % pour garantir les conditions oxydantes souhaitées dans la zone de cuisson du four [\[60\]](#).

L'expérience montre qu'en réduisant l'air en excès de 10 à 5 % (c'est-à-dire en réduisant les niveaux d'oxygène dans les gaz d'échappement de 2 à 1 %), les émissions des NOx par unité de temps peuvent être réduites d'environ 15 %.

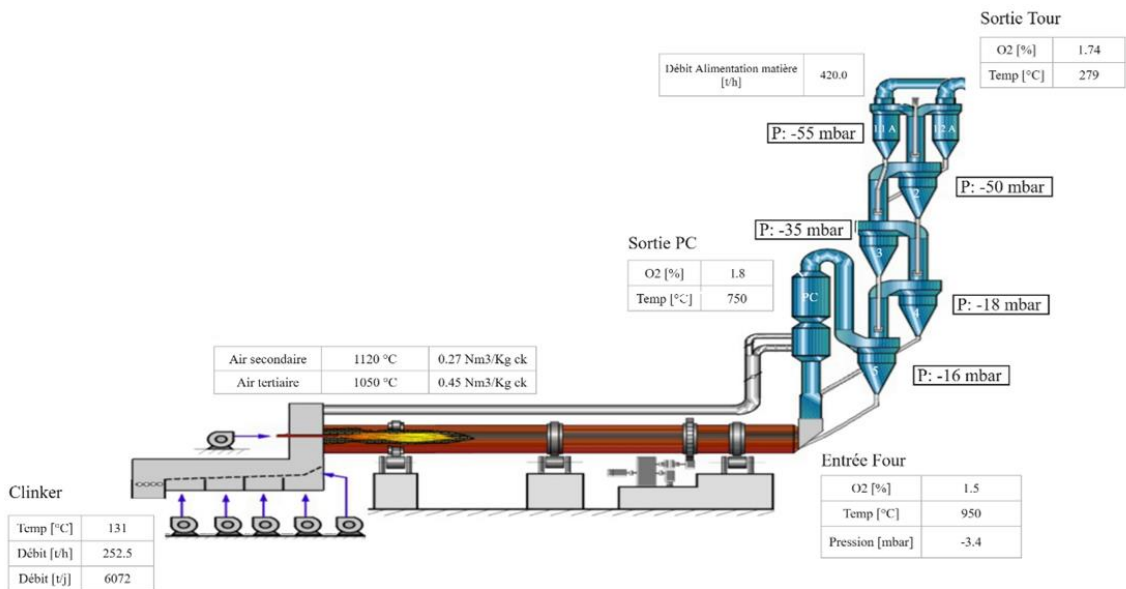


Figure IV.1 : Paramètres opératoires de l'installation

iii. Ajustement de la flamme

La turbulence entre l'air et le combustible est ajustée par la tuyère du brûleur. Une flamme courte, chaude et bien centrée favorise une meilleure réactivité du clinker, prolonge la durée de vie du réfractaire du four et permet un meilleur contrôle des émissions. Le brûleur principal mélange le combustible et l'air primaire de manière à générer une flamme plus grande, créant ainsi une zone de recirculation interne (ZRI) des gaz de combustion (Figure IV.2). Cela permet de diminuer la température du front de flamme et la concentration en oxygène, deux facteurs clés dans la formation des NO_x [64,65].

L'optimisation de la combustion par les ajustements techniques du brûleur principal permet de réduire les émissions des NO_x-Thermiques en améliorant l'efficacité énergétique et la qualité du produit final (ANNEXE IV).

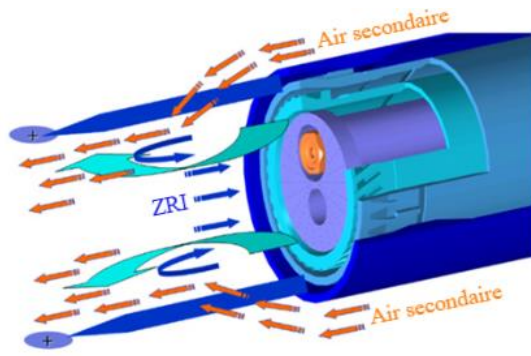


Figure IV.2 : Brûleur Low-NOx

iv. Amélioration du rendement du refroidisseur

Un ajustement précis des débits d'air des ventilateurs de refroidisseur permet une distribution homogène de l'air soufflé à travers la couche de clinker, entraînant un équilibre optimal entre la récupération de chaleur et la température de l'air tertiaire. Des tests d'optimisation des débits des ventilateurs responsables du soufflage de l'air récupéré comme air secondaire et tertiaire ont été réalisés à plusieurs reprises. Une réduction du débit d'air soufflé de $8022 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a été enregistrée lors de la dernière modification.

Tableau IV.1 : Optimisation du débit de soufflage

Ventilateurs	Ancien soufflage préconisé (Nm^3/h)	Ancien soufflage préconisé (Nm^3/h)
FA 09	19 639	18 178
FA 11	21 102	18 501
FA 13	21 102	18 501
FA 15	45 523	43 106
FA 17	64 867	62 079
FA 19	52 765	56 611
FA 21	57 908	57 908
FA 23	59 044	59 044
FA 25	56 340	56 340
FA 27	65678	65678
TOTAL	463 968	455 946

Assurer une meilleure distribution du clinker sur les grilles de refroidisseur, par une augmentation proportionnelle des vitesses des grilles et un ajustement du débit d'alimentation du clinker permis une meilleure récupération de chaleur. Une hauteur moyenne de la couche de clinker est estimée à être 90cm.

Cette optimisation a permis d'augmentée de manière significative la température de l'air tertiaire de 100°C, passant de 950°C à 1050°C. Moins de chaleur additionnelle est nécessaire pour chauffer les matières premières, ce qui conduit à une réduction de la consommation de combustible.

IV.3.2. Maîtrise opérationnelle

Les modifications de procédé sont généralement effectuées pour réduire la consommation en combustible, améliorer la qualité du clinker et augmenter la durée de vie des équipements (tels que le revêtement réfractaire) en stabilisant les paramètres du processus. Étant donné que la formation des NOx est directement liée à la quantité d'énergie consommée dans la fabrication du ciment, l'amélioration de l'efficacité énergétique réduira la formation des NOx.

i. Composition du mélange d'alimentation

Les besoins en chaleur pour produire du clinker dépendent de la composition et de la finesse de la matière première. Les paramètres de contrôle doivent être maintenus dans leur intervalle de tolérance.

- **Le LSF** : Facteur de saturation en chaux, Il est calculé pour déterminer si la quantité de chaux dans le mélange de matières premières est suffisante pour réagir avec les autres composants et former les phases souhaitées dans le clinker.

$$LSF = \frac{CaO}{2.8 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3} = 97 \%$$

Les proportions des constituants chimiques des matières premières varient en fonction de la carrière d'extraction de l'argile et du calcaire. La silice provenant du sable est

plus difficile à combiner avec la chaux que la silice provenant de l'argile. C'est pourquoi il est crucial de suivre le module LSF pour garantir une composition optimale, permettant de produire le clinker souhaité et d'optimiser la consommation de combustible (Figure IV.3).

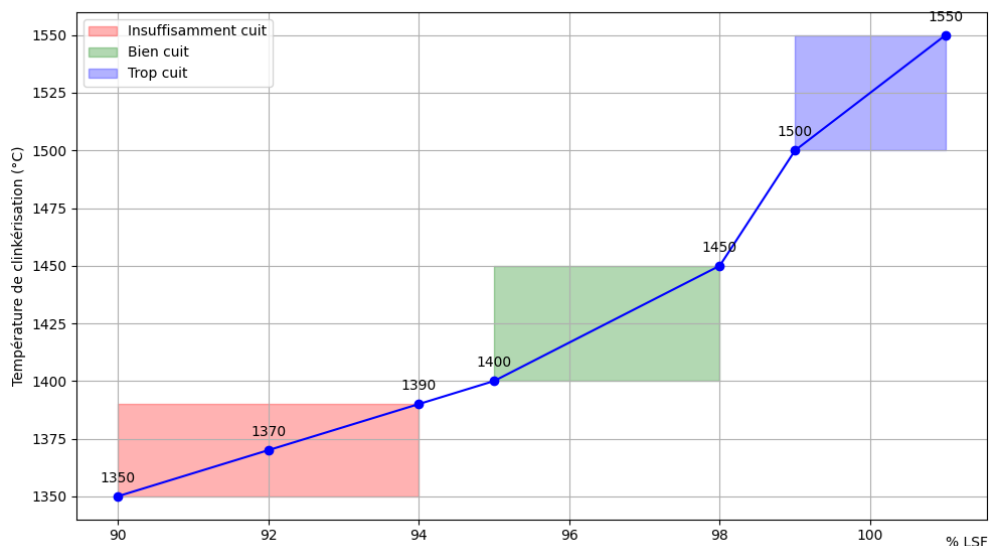


Figure IV.3 : Influence de la température et de LSF sur la cuisson de clinker

- **Le MS** : Module silicique. Il permet de régler la proportion des silicates de calcium par rapport aux aluminates et aluminoferrites.

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

En effet, avec un rapport MS élevé, la somme ($A + F$) est faible, ce qui signifie que le cru comporte peu d'éléments fondants. Lors de la cuisson, la quantité de phase liquide sera faible, rendant la cuisson difficile et augmentant la consommation calorifique. Avec peu de phase liquide, le pourcentage de silicates sera important, ce qui augmentera les résistances mécaniques.

À l'inverse, si le module silicique (MS) est faible, la somme ($A + F$) est élevée. La quantité de phase liquide augmente, facilitant la cuisson et réduisant la consommation calorifique, tout en produisant moins de poussière et augmentant le croûtage.

La valeur du MS varie en moyenne de 2,5 à 3,2. Si le MS augmente :

- La cuisson sera plus difficile.
- Le clinker sera plus poussiéreux.
- La tendance à la formation d'anneaux et de concrétions sera plus faible.
- Le croûtage sera moins important.
- La consommation calorifique sera plus élevée.

Si le MS diminue, les caractéristiques ci-dessus s'inversent.

- **Le MAF** : Module Alumino-Ferreux. Il informe sur la qualité future du clinker, et son aptitude à la cuisson.

$$MAF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Le MAF influe sur le rapport entre aluminates et aluminoferrites (C_3A et C_4AF) qui se forment pendant la cuisson. Le clinker contiendra du C_3A et de C_4AF si après formation du C_4AF il reste de l'alumine pour se combiner en C_3A . La valeur du MAF varie en moyenne entre 1.5 et 2.2.

La dureté des matériaux varie énormément, ce qui impacte le broyage. Cela dépend de la carrière et des matières de correction. Les matériaux comme le Quartz, le marbre et les schistes sont particulièrement difficiles à broyer.

L'ajustement de ces paramètres se fait par un réglage du dosage entre le mélange de calcaire et d'argile, avec du sable et du fer, et par un suivi avec prélèvement d'échantillons toutes les deux heures pour analyse au laboratoire.

ii. Réduction de la teneur en alcalis de la matière première

La teneur en alcalis du ciment fini principalement constitués de sodium (Na) et de potassium (K) sous forme d'oxydes (Na_2O et K_2O) doit généralement être inférieure à un certain niveau acceptable (0.5, 1.5 respectivement). Les exigences de faible teneur en alcalis nécessitent des températures de four plus élevées et des temps de résidence plus longs à haute température pour volatiliser les alcalis présents dans le clinker semi-

fondu. Pour contrôler les émissions d'alcalis, une partie des gaz d'échappement du four est dérivée vers le système du by-pass.

Les besoins supplémentaires en chaleur peuvent également contribuer à une augmentation des émissions des NOx. Ainsi, contrôler la teneur en alcalis dans le mélange de matières premières peut contribuer à une réduction des émissions de NOx [66].

iii. Finesse du cru

Une farine fine permet un meilleur échange thermique et des recombinaisons chimiques plus faciles, cela permet alors de baisser la température de clinkérisation.

La figure IV.4 illustre l'influence de la présence des particules grosses et difficile à broyer (Quartz) dans la farine sur la consommation en combustible.

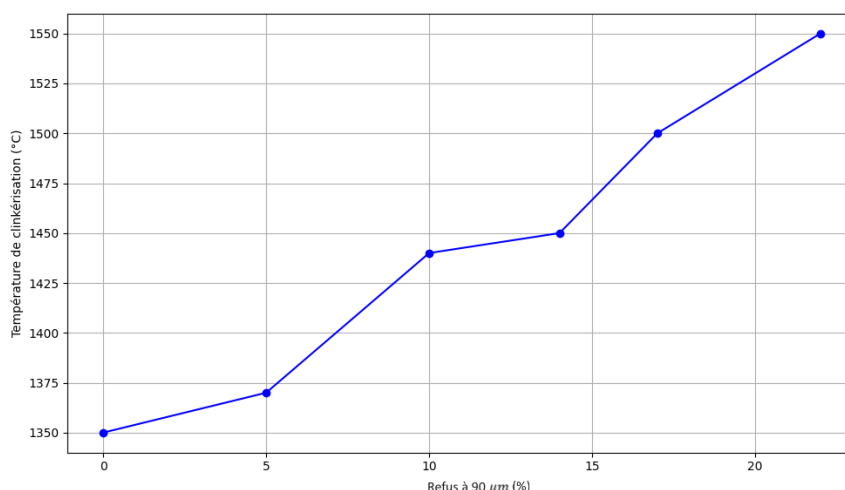


Figure IV.4 : Influence de la finesse du cru sur la température de clinkérisation

Augmenter la vitesse du séparateur (de 3ème génération) de broyeur permet d'accroître les performances en termes de débit, de finesse et de stabilité, et peut ainsi réduire les refus en ne laissant passer que les particules ayant la finesse requise.

Les résultats de cet ajustement ont permis les améliorations suivantes :

Refus à 240 µm: De l'ordre de 1.5 % au lieu de 4%

Refus à 90 µm: De l'ordre de 14 % au lieu de 17%

iv. Stabilité du procédé

La stabilité du système, mesurée en termes de temps moyen entre pannes (MTBF), joue un rôle crucial dans la réduction des émissions des NOx dans les installations industrielles, y compris les cimenteries. Un système stable avec une MTBF élevée signifie que les équipements fonctionnent de manière fiable pendant des périodes prolongées sans défaillances. Cela permet de maintenir des conditions de processus optimales, réduisant ainsi les fluctuations indésirables qui peuvent entraîner une augmentation des émissions des NOx.

Les arrêts fréquents et les redémarrages des équipements peuvent causer des pics de température et des déséquilibres dans l'apport en air et en combustible, conduisant à une combustion incomplète et à une formation accrue des NOx [67].

$$MTBF = \frac{\textit{Durée totale de bon fonctionnement}}{\textit{Nombre de pannes}}$$

v. Origines des matières premières

L'origine des matières premières utilisées dans la production de ciment, telles que l'argile issue des boues de barrage, peut influencer les émissions des NOx de plusieurs manières. Les boues de barrage contiennent des matières organiques azotées qui, lors de la cuisson de l'argile dans le four, se décomposent et libèrent des oxydes d'azote (NOx). Une hétérogénéité dans leur composition peut entraîner une combustion irrégulière, créant des zones avec une combustion incomplète ou non uniforme qui favorisent la formation des NOx [68].

La substitution de l'argile issue des boues de barrage dans le processus de production de ciment a permis de réduire significativement le taux des émissions des NOx de plus de 100 mg/Nm³.

Une réduction des émissions en dessous du seuil fixé par LafargeHolcim en 2023 a été observée.

Cela devient particulièrement évident après avril 2023 (Figure IV.5), où l'on observe une diminution drastique et soutenue des émissions, atteignant des niveaux proches de 700 mg/Nm^3 .

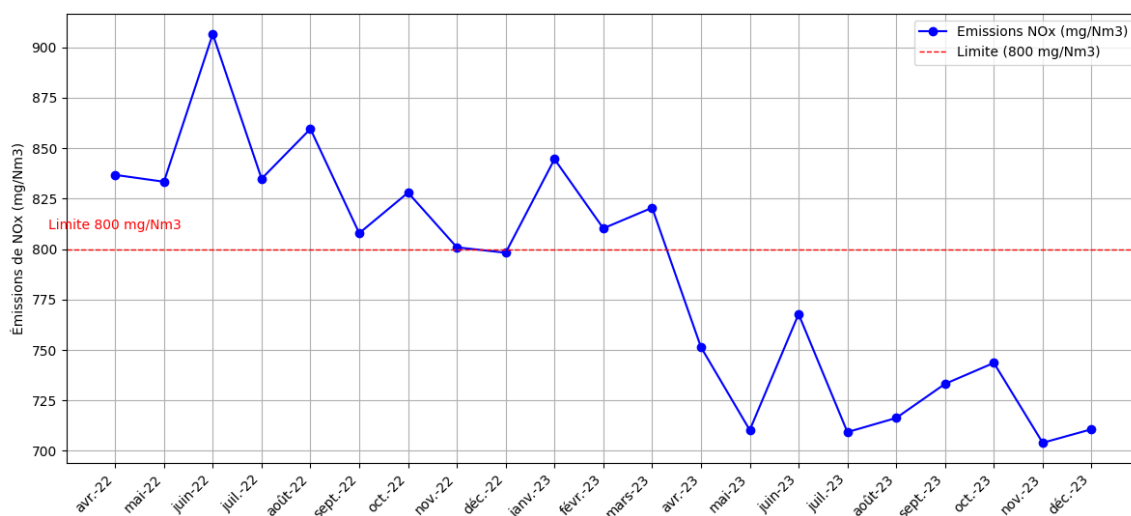


Figure VI.5 : Effet de la substitution des matières premières sur les émissions des NO_x

IV.4. Optimisation de la consommation énergétique

Notre étude sur l'optimisation opérationnelle vise à réduire la consommation de combustible, ce qui se traduit par une réduction significative des coûts d'exploitation et un impact environnemental moindre. La consommation d'énergie thermique STEC (Specific Thermal Energy Consumption) dans la production de clinker à la cimenterie CILAS de Biskra, est passée de 3250 MJ/t en 2022 à 3130 MJ/t en 2024, soit une réduction de 120 MJ/t (Figure IV.6).

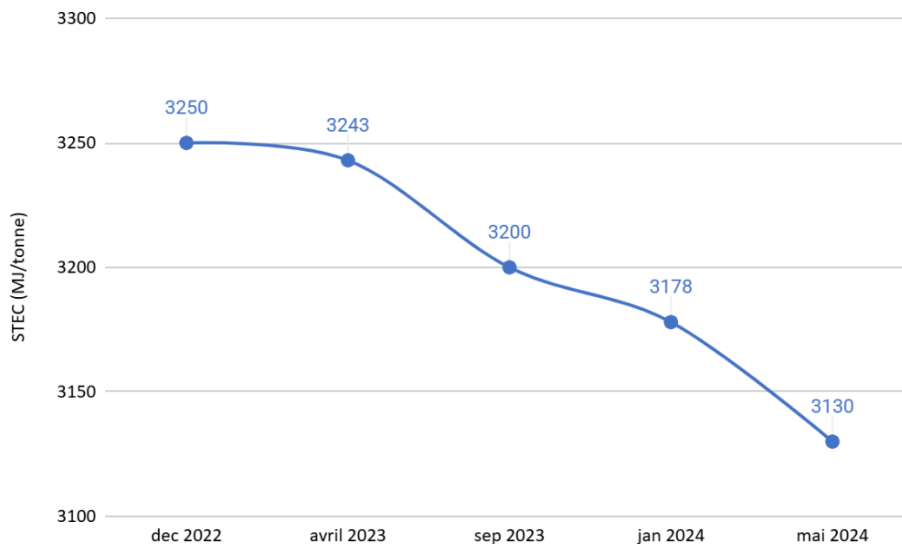


Figure IV.6 : L'optimisation de la consommation d'énergie thermique STEC

L'amélioration de l'efficacité énergétique en appliquant ces mesures primaires de manière cohérente, pour maximiser l'efficacité énergétique et réduire les pertes, notamment en optimisant les conditions de cuisson des fours et en adoptant des technologies avancées de contrôle automatisé, permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment les émissions des oxydes d'azote (NOx).

IV.5. La combustion étagée

La combustion étagée est une technique avancée visant à réduire les émissions des oxydes d'azote (NOx) dans les processus de combustion industriels. Ce principe repose sur l'idée de diviser la combustion en plusieurs zones, pour mieux contrôler les conditions de réaction, les températures de combustion et la distribution de l'air et ainsi maximiser le rendement de la combustion et de la décarbonatation de carbonate.

Les NOx formés dans la zone de combustion du four sont chimiquement réduits en maintenant une atmosphère réductrice à l'extrémité d'alimentation du four en y injectant du combustible. Cette atmosphère réductrice est maintenue dans la région du précalcinateur en contrôlant l'air de combustion de sorte que le combustible utilisé pour la calcination soit d'abord brûlé sous des conditions réductrices pour réduire les NOx,

puis sous des conditions oxydantes pour compléter la réaction de combustion. Le contrôle de l'introduction de la farine crue permet de réguler la température du précalcinateur [69].

L'intégration du précalcinateur dans le processus de fabrication du ciment permet de surpasser les problématiques rencontrées auparavant lorsque la combustion se faisait dans un seul lit : le four rotatif.

- (i) La dépendance thermique entre les deux transformations essentielles à la formation du clinker : la décarbonatation et la clinkérisation.
- (ii) Une qualité d'échange thermique médiocre, augmentant ainsi le temps de décarbonatation à plus de 30 minutes.
- (iii) Entraînement d'un effet d'aéroglossière causé par un fort dégagement des gaz (notamment le CO_2) dans le four.

Et donc, l'utilisation d'un précalcinateur se caractérise par la diminution du diamètre et de la longueur du four, permettant ainsi une bonne stabilité de fonctionnement du four, un meilleur échange thermique et une meilleure récupération énergétique. La [figure IV.7](#) montre l'amélioration du four rotatif après développement de l'installation par intégration du précalcinateur.

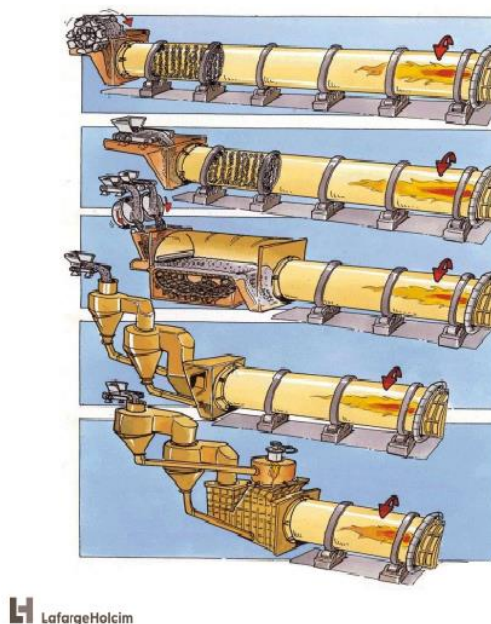


Figure IV.7 : Développement du four rotatif

Selon la littérature [63,70], le type d'installation peut influencer la consommation d'énergie calorifique, entraînant ainsi des variations dans le taux des émissions de NOx (Tableau IV.2).

Tableau IV.2 : Taux d'émissions spécifique des NOx pour différents type d'installation

Type de four	Besoin calorifique [MJ/Kg ck]	Emissions NOx [g/kg ck]
Four long humide	6.3	1.6 – 8.8
Four long sec	4.7	2.8 – 4.8
Four à PH	4.0	1.1 – 5.3
Four à PC	3.5	0.4 – 3.2

Différents processus de réduction des NOx peuvent être combinés de manière synergique dans ce qu'on appelle des processus CombiNOx [71, 46]. Un exemple de tel processus est le rebrûlage avancé (Advanced reburning), dans lequel la combustion étagée dans le précalcinateur est combiné avec l'injection des agents réducteurs (SNCR/SCR).

IV.6. Intégration du Précalcinateur "Low-NOx"

Différents fabricants fournissent des fours avec des conceptions de précalcinateurs variées (ANNEXE IV). Notre étude, confirme l'efficacité de l'installation cimentière avec un système de four à précalcinateur (AS-ILC).

En dehors des différences concernant le conduit d'air tertiaire (AS/AT) et le flux de gaz résiduel provenant du four (ILC/SLC), les précalcinateurs fournis par les différents fabricants diffèrent à bien des égards, tels que :

- La conception géométrique
- L'alimentation en air tertiaire/combustible/matières
- La turbulence et la viscosité à l'intérieur de précalcinateur

Le Précalcinateur "Low-NOx" est composé de deux zones de combustion, chacune équipée de deux brûleurs, capables de produire collectivement 199 MW. Les deux principaux brûleurs, d'une capacité de 135 MW (équivalente à 14 000 Nm³/h), sont positionnés entre l'entrée de la conduite d'air tertiaire et l'entrée de la conduite de la farine du cyclone 4 menant au précalcinateur. Ils injectent le combustible dans le flux d'air tertiaire, favorisant ainsi la décarbonisation. Les brûleurs Low-NOx, d'une capacité de 32 MW chacun, alimentent le flux de gaz d'échappement du four, permettant ainsi de réduire les émissions de NOx (Figure IV.8).

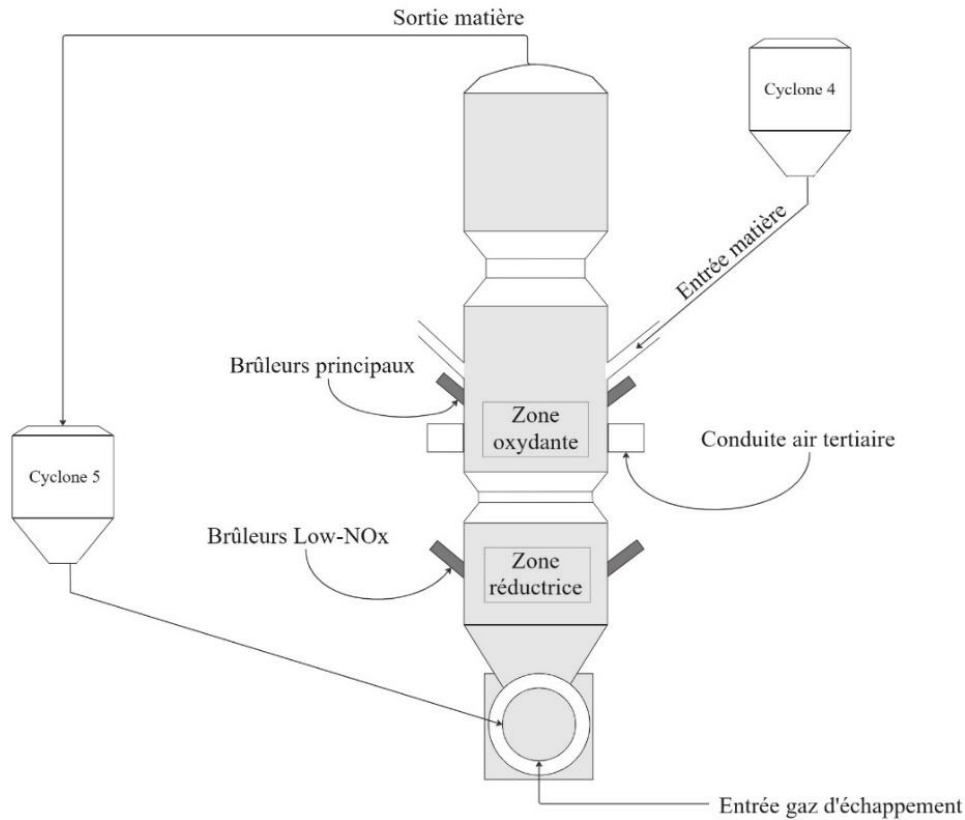


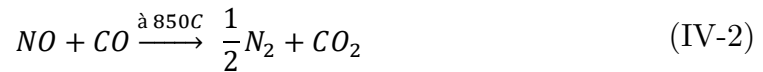
Figure IV.8 : Schématisation du Précalcinateur "Low-NOx"

Les brûleurs Low-NOx sont conçus pour utiliser jusqu'à 40 % du débit de combustible du précalcinateur. Les gaz d'échappement du four contiennent les NOx formés à haute température dans le four. Ils contiennent également une faible teneur en oxygène correspondant uniquement à l'air excédentaire du processus de combustion du four. Dans ce conduit de montée de four élargi, il est maintenant possible d'établir délibérément une atmosphère réductrice pour les gaz d'échappement du four en brûlant une quantité spécifique de combustible dans des conditions sous-stœchiométriques. La concentration en CO augmente dans la zone de postcombustion, et la température est favorable, permettant ainsi la réaction des oxydes d'azote avec le monoxyde de carbone.

- Formation de monoxyde de carbone CO en atmosphère réductrice :



- Réaction des oxydes d'azotes avec le monoxyde de carbone :



L'écoulement parallèle du carburant des brûleurs principaux et de l'air tertiaire dans le précalcinateur, permet à ces deux flux de se mélanger progressivement. Le NOx a donc un temps de résidence suffisant dans la phase gazeuse réductrice. Un temps de séjour adéquat et une turbulence contrôlée assurent une postcombustion efficace et une réduction optimale des émissions des NOx.

Ce processus de combustion étagée (reburning) permet de réduire significativement les émissions des NOx d'environ 30%. Bien que, le niveau moyen de CO n'ait que légèrement augmenté dans l'atmosphère réductrice, il sera combiné avec des réactions dans la zone riche en oxygène.



Le débit d'alimentation gaz dans le précalcinateur avant l'activation des brûleurs Low-NOx a été estimée à 13300 Nm³/h. Le volume de gaz consommé dans les brûleurs Low-NOx représente entre 38 % et 40 % du volume total de gaz.

IV.6.1. Paramètres opératoires du précalcinateur

Les brûleurs Low-NOx doivent être activés à leur capacité maximale pour assurer une atmosphère réductrice, avec un excès d'oxygène estimé à environ 1,5 % à l'entrée du four. La décarbonatation est assurée par les brûleurs principaux et les brûleurs Low-NOx. Le [tableau IV.3](#) donne les paramètres opératoires du précalcinateur.

Tableau IV.3 : Paramètres opératoires du précalcinateur.

Paramètres opératoires	Valeurs
Température	750°C à 1100°C
Dépression	-15mbar à -3mbar
STEC (Consommation calorifique)	1824 KJ/kg Ck

Débit de gaz naturel	13300 Nm ³ /h
-Débit de gaz naturel brûleurs principaux	8100 Nm ³ /h.
-Débit de gaz naturel brûleurs Low-NOx	5220 Nm ³ /h.

La composition de l'air à l'entrée et à la sortie du précalcinateur est donnée dans le [tableau IV.4](#). Une comparaison des mesures avant et après la modification du processus.

Tableau IV.4 : Composition massique des gaz d'échappement

Composition des gaz	Avant l'optimisation opérationnelle			Après l'optimisation opérationnelle		
	Teneur en % O ₂	Mesure CO (en PPM)	Mesure des NOx (en PPM)	Teneur en % O ₂	Mesure CO (en PPM)	Mesure des NOx (en PPM)
Entrée Précalcinateur	3.8 %	70	1700	1.5 %	40	1500
Sortie Précalcinateur	4 %	75	800	1.8 %	43	720

L'intérieur d'un précalcinateur est soumis à des températures extrêmement élevées et à des conditions chimiques agressives, rendant l'installation et l'entretien des capteurs très difficiles. De plus, le flux continu des matières, la présence de divers composants réactifs et les turbulences peuvent perturber les mesures internes, diminuant ainsi la fiabilité des données. Bien que les mesures directes à l'intérieur du précalcinateur soient limitées par ces conditions difficiles, les mesures prises à l'entrée et à la sortie, combinées à des analyses physico-chimiques et thermodynamiques, permettent de déduire les conditions internes et d'optimiser le fonctionnement du précalcinateur pour une réduction efficace des NOx.

IV.6.2. La réduction des oxydes d'azotes (NO_x)

L'étendue de la réduction des oxydes d'azote (NO_x) possible dans le précalcinateur dépend de plusieurs facteurs, notamment (i) le type et la quantité de combustible (ii) les conditions opératoires du précalcinateur (iii) la conception spécifique du système de précalcination.

Les conceptions plus récentes de fours avec préchauffeur et précalcinateur, dotées de deux zones de combustion, constituent l'installation la plus optimale pour maîtriser les émissions atmosphériques et la consommation énergétique dans le processus de fabrication du ciment [72]. Une haute efficacité thermique entraîne une moindre consommation de chaleur et de combustible, ce qui conduit à des émissions de NO_x plus faibles.

Pour atteindre une réduction optimale des NO_x, les conditions suivantes doivent être réunies :

- Générer une atmosphère réductrice (conditions de combustion sous-stoechiométriques)
- Formation de monoxyde de carbone en grande quantité (Combustion incomplète)
- Température des gaz de 800 à 950°C
- Temps de résidence dans la zone réductrice de plus d'une seconde

La réduction efficace des NO_x dans le précalcinateur est le résultat d'une combinaison d'optimisations technologiques, de contrôles précis des conditions opératoires, et de l'utilisation de stratégies de réduction avancées.

L'objectif est de minimiser les émissions tout en maintenant une efficacité énergétique élevée, contribuant ainsi à une production de ciment plus propre et plus durable.

Les résultats de l'intégration des brûleurs Low-NOx du précalcinateur sont présentés sous forme de graphes (figure IV.9) pour une activation réussie le 31 Mars 2024.

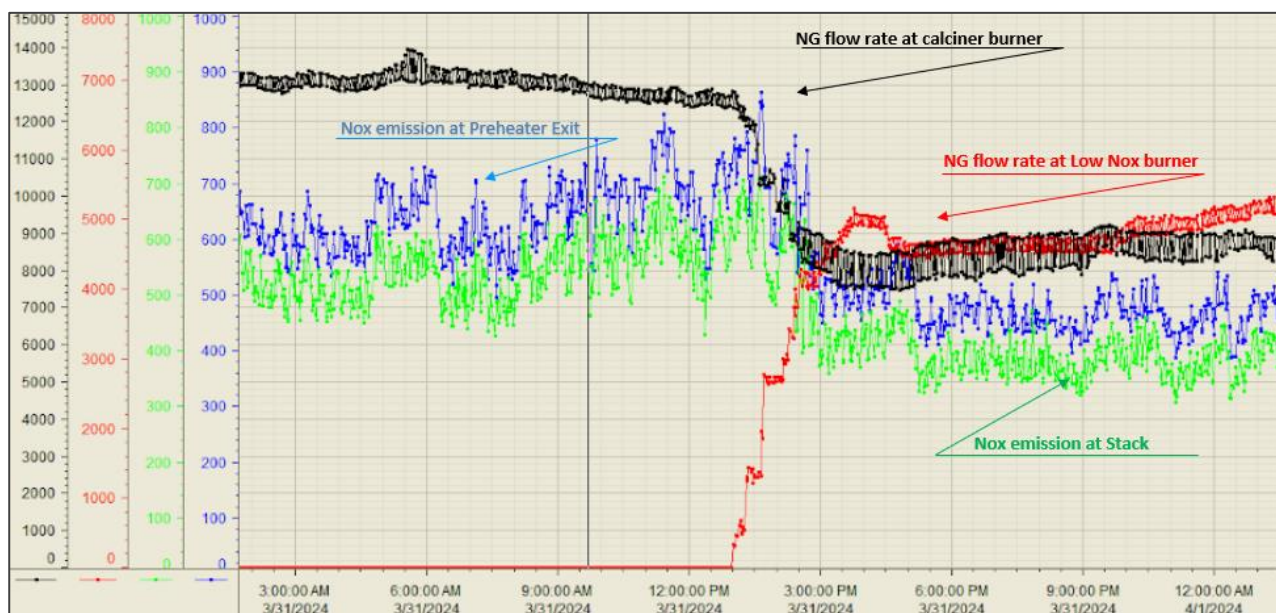


Figure IV.9 : Résultats de l'intégration des brûleurs Low-NOx du précalcinateur

Notes :

La ligne rouge : Débit de gaz d'alimentation des brûleurs Low-NOx

La ligne verte : Les émissions NOx à la cheminée

La ligne bleue : Les émissions NOx sortie tour

La ligne noire : Débit de gaz d'alimentation des brûleurs principaux

Le tableau IV.5 montre le suivi des paramètres influençant la réduction des émissions des oxydes d'azote.

Tableau IV.5 : Résultats de l'intégration des brûleurs Low-NOx du précalcinateur

	Débit brûleurs principaux [Nm^3/h]	Débit brûleur Low-NOx [Nm^3/h]	STEC [MJ/tonne]	Emissions NOx [mg/Nm^3]
25-mars-24	13152.46	0	3100.15	678
26-mars-24	13057.93	0	3115.72	655
27-mars-24	13672.63	0	3140.74	661
28-mars-24	13371.45	0	3157.51	665

29-mars-24	13423.08	4200	3143.98	633
30-mars-24	12897.93	5287	3111.12	615
31-mars-24	11076.38	5277	3120.26	554
1-avr.-24	8320.91	5266	3132.46	467
2-avr.-24	8216.57	5144.33	3134.59	471
3-avr.-24	8383.35	5266.03	3078.32	425
4-avr.-24	8286.41	5223.36	3088.05	398
5-avr.-24	8108.55	5223.35	3057.16	425
6-avr.-24	8189	5220	3110	452

Une comparaison ([Tableau IV.6](#)) des mesures avant et après l'intégration du Précalcinateur Low-NOx est donnée.

Tableau IV.6 : Efficacité de l'intégration des Low-NOx du Précalcinateur

	Avant l'intégration du Précalcinateur Low-NOx	Après l'intégration du Précalcinateur Low-NOx
Mesure des NOx [mg/Nm^3]	660	450

Les résultats montrent une réduction de 30% des émissions des oxydes d'azote à la sortie de la cheminée.

IV.7. Discussion des résultats

IV.7.1. Influence de la température sur la réduction des émissions NOx

Des capteurs de gaz sont placés à la cheminée, à la sortie des gaz d'échappement dans le préchauffeur et dans la boîte à fumées. Un suivi des températures et des pressions est assuré par des capteurs tout au long de l'installation.

La température doit être suffisamment élevée pour permettre la combustion complète du combustible secondaire, mais pas trop élevée pour éviter la formation excessive de NOx-Thermiques. La plage de température optimale se situe généralement entre 850°C et 1050°C. À ces températures, le radical réducteur CO produit par la combustion

incomplète du combustible secondaire, peut réagir efficacement avec les NOx pour les transformer en N_2 .

La concentration en NOx à l'entrée de four est estimée à 1500 PPM. La température est d'environ 1100°C, en raison des gaz chauds provenant du four et de la combustion en cours.

IV.7.2. Influence de la teneur en oxygène sur la réduction des émissions NOx

La teneur en oxygène dans la boîte à fumées et à la sortie du précalcinateur doit être suffisamment basse pour maintenir un environnement réducteur, mais suffisamment élevée pour éviter des complications liées au processus. Une concentration en oxygène optimale doit être maintenue à 1,5 % pour assurer une réduction efficace des NOx. Un excès d'oxygène nécessite une surconsommation de combustible, ce qui n'est pas réalisable car les brûleurs fonctionnent déjà à leur capacité maximale.

L'idée principale de la stratégie de l'activation des brûleurs Low-NOx du précalcinateur, est de maximiser le rapport carburant/air des brûleur, jusqu'à leur capacité nominale afin de garantir la capacité de la puissance thermique à saturer l'air de combustion à l'entrée du précalcinateur.

IV.7.3. Influence de débit d'alimentation du gaz

Le débit initial est réparti pour garantir des conditions optimales dans les deux zones du précalcinateur. Aucune surconsommation calorifique n'est nécessaire pour alimenter les brûleurs Low-NOx afin d'assurer une atmosphère réductrice, ce qui se traduit par des niveaux constants de CO_2 à la cheminée.

IV.8. Alignement de CILAS avec la taxonomie de l'UE

La Taxonomie de l'UE (EU Taxonomy) est un système de classification établi pour définir si une activité économique est durable sur le plan environnemental. Elle fait

partie de la stratégie de l'UE visant à atteindre ses objectifs climatiques et énergétiques pour 2030 et à réaliser le Green Deal européen. La Taxonomie vise à orienter les investissements vers des activités durables, ce qui est crucial pour la transition vers une économie plus verte [73].

Le principal organisme responsable de l'élaboration et de la mise en œuvre de l'EU Taxonomy est la Commission Européenne, en collaboration avec le Conseil de l'Union Européenne et le Parlement Européen. Elle ne fixe pas directement des taxes sur les émissions, mais elle encadre la finance durable pour orienter les investissements vers des activités respectueuses de l'environnement. La régulation des émissions est assurée par des mécanismes comme le EU ETS (Système d'Échange de Quotas d'Émission de l'UE) et des directives sur la qualité de l'air, supervisées par la Commission Européenne et les agences nationales de l'environnement, qui imposent également les sanctions en cas de non-conformité.

IV.8.1. Les objectifs de la Taxonomie de l'UE

Pour qu'une activité soit considérée conforme à la Taxonomie de l'UE, elle doit répondre à des critères spécifiques liés à six objectifs environnementaux (Figure IV.10).

- L'atténuation du changement climatique.
- L'adaptation au changement climatique.
- L'utilisation durable et la protection des ressources hydriques et marines.
- La transition vers une économie circulaire.
- La prévention et le contrôle de la pollution.
- La protection et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes.

IV.8.2. Implication de CILAS dans la Taxonomie de l'UE

La réduction des émissions des oxydes d'azote (NOx) en dessous de la réglementation algérienne, des normes internes et des législations européennes, répond à l'objectif de

la prévention et de contrôle de la pollution atmosphérique causée par les activités de secteur cimentier.

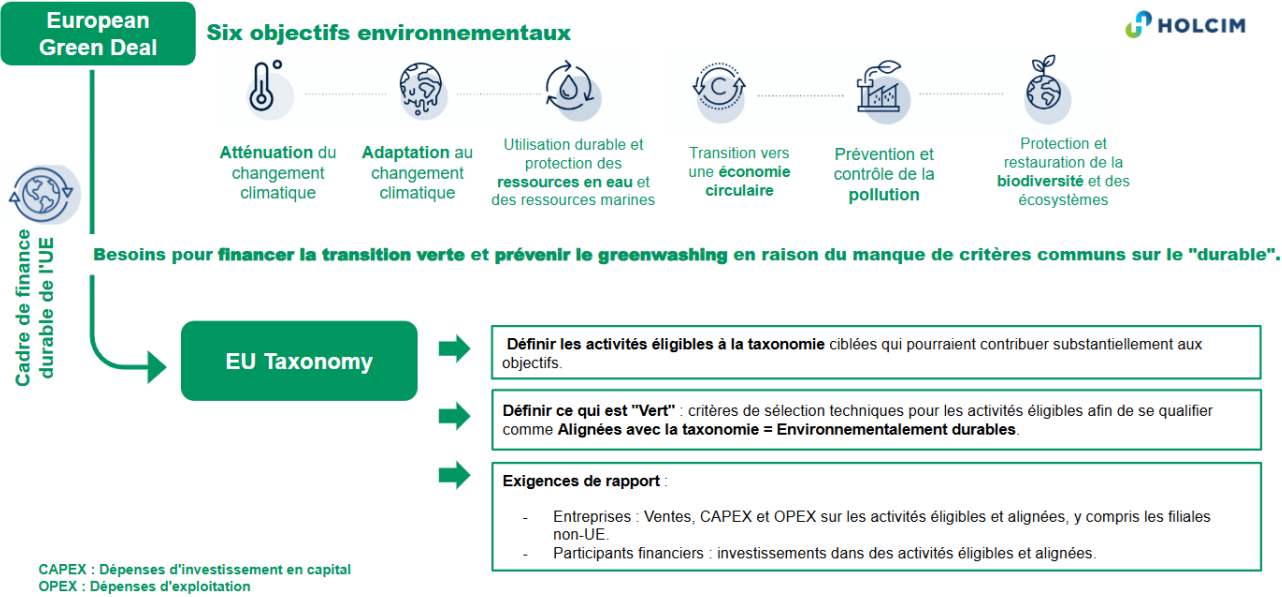


Figure IV.10 : Objectifs de la Taxonomie de l’UE

IV.9. Conclusion

L'intégration du Précalcinateur Low-NOx dans la cimenterie CILAS a démontré des résultats significatifs en termes de réduction des émissions des oxydes d'azote (NOx), confirmant ainsi l'efficacité de cette technologie dans un contexte industriel. Les efforts d'optimisation des processus et de maîtrise opérationnelle antérieurs ont joué un rôle crucial dans la réussite de cette implantation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La réduction des émissions des oxydes d'azotes (NOx) est l'objectif clé de cette étude. Plusieurs approches technologiques ont été développées pour répondre aux normes environnementales strictes. Parmi les techniques de réduction mises en place par les industriels cimentiers, des mesures primaires visant à réduire la formation des NOx à la source, et des mesures secondaires, permettant de convertir les oxydes d'azote en substances non nuisibles à l'aide d'agents réducteurs.

Le processus de combustion dans l'atelier de cuisson est à l'origine de la formation des NOx-Thermiques. Le taux des émissions augmente avec la température élevée (à partir de 1200°C) dans le four rotatif, ainsi qu'avec l'excès en oxygène dans l'installation.

Les analyses des transformations physicochimiques et du procédé thermodynamiques, ont permis d'évaluer l'efficacité de l'installation après adaptation des mesures d'optimisation opérationnelle, et d'identification des possibilités d'amélioration de la consommation calorifique.

Les principaux résultats des bilans massique et énergétique sont, l'optimisation de la consommation de combustible par l'amélioration de rendement de refroidisseur, augmentant ainsi la température de l'air tertiaire par 100°C. La démarche d'optimisation du processus, par ajustement de ratio d'air et de combustible injectés par la tuyère à 10% en air primaire nécessaire à la combustion complète et en maintenant une teneur en oxygène à l'entrée de four à une valeur limite de 1,5%, ont assuré une combustion complète par une flamme courte, forte et chaude minimisant ainsi la formation des sédiments dans les conduites de l'installation.

Parallèlement, nous avons élaboré une démarche de maîtrise opérationnelle rigoureuse pour assurer une performance optimale et cohérente du système. Cela a impliqué la

surveillance continue des paramètres de fonctionnement pour maintenir les conditions optimales de combustion et de calcination. Maintenir les paramètres de suivi de la composition de mélange d'alimentation, LSF, MS et MAF à des valeurs moyennes de 97%, 2.8% et 2% respectivement. Minimiser la teneur en alcalis et augmenter la vitesse de séparateur de broyeur pour réduire les refus des particules grosses, ont assuré une combustion moins consommatrice en énergie calorifique et une cuisson facile de clinker.

L'optimisation énergétique est un axe central de cette étude. Un gain en STEC de 120 MJ/ Tonne de clinker, sans compromettre la qualité de produit final permet une augmentation de la production de l'usine.

Une analyse de l'argile issue des boues de barrage, utilisée comme matière première dans la fabrication de ciment, a montré une constitution riche en matières azotées. Le changement de la source de l'argile a permis de réduire les émissions des oxydes d'azote de 100 mg/Nm^3 .

L'intégration du Précalcinateur "Low-NOx" s'est avérée efficace dans la réduction des émissions des oxydes d'azote, avec une diminution notable de 30% allant d'une moyenne de 670 mg/Nm^3 à moins de 450 mg/Nm^3 .

Ce succès dans la réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx) sans altérer d'autres paramètres et en assurant une efficacité énergétique maximisant la production, s'aligne avec les objectifs futurs tracés par l'usine CILAS et la Taxonomie de l'UE.

En conclusion, ce travail met en avant l'importance d'une approche holistique dans la gestion des cimenteries, intégrant l'innovation technologique, l'optimisation énergétique et le contrôle des émissions atmosphériques. Les résultats obtenus à CILAS offrent des perspectives prometteuses pour l'industrie du ciment et peuvent servir de référence pour d'autres cimenteries souhaitant améliorer leurs pratiques et réduire leur impact environnemental.

Références Bibliographiques

- [1] H. Gérard, Comment l'industrie du ciment et du béton peut-elle atteindre le Zéro émission nette d'ici 2050 ? ,2023.
- [2] Site Holcim, <https://www.holcim.com>, [Consulté le 15/03/2024]
- [3] Site Lafarge Algérie, <https://www.lafarge.dz>, [Consulté le 15/03/2024]
- [4] Site Lafarge Algérie, <https://www.lafarge.dz/cp-inauguration-cilas>, [Consulté le 15/03/2024]
- [5] Google Earth, Usine CILAS, Biskra, Algérie. [Consulté le 22/06/2024]
- [6] Etude de danger, Etude d'impact cimenterie CILAS, Biskra, 2017.
- [7] J. Abdo, Ciments, Techniques de l'ingénieur, *Réf. : C920 V2*, 2020.
- [8] F. Ghomari, Science des matériaux de construction, Université de Tlemcen, 2006.
- [9] W. Pauchet, Les Ciments, Techniques de l'ingénieur, *Réf. : TBA1010 V2*, 2019.
- [10] A. Philip *and al.*, 2019, The Cement Plant Operations Handbook for Dry-process Plants, *7th Edition*, 2019.
- [11] K. Hamzi, Modélisation de la précalcination industrielle de la farine crue a ciment de l'unité de Meftah, Mémoire de Master, Université de Blida, 2015.
- [12] La contribution de l'industrie cimentière à la réduction des émissions de CO₂, FEBELCEM.
- [13] N. Tebina, Impact finesse de ciment sur le temps de prise et le durcissement du mortier, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2022.
- [14] J. Watts, Concrete : the most destructive material on Earth, *The Guardian*, 2019.
- [15] M. NICHANE *and al.*, Changements climatique et ressources en eau en Algérie : Vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptatio, 2014.
- [16] Changement climatique et terres émergées : Résumé à l'intention des décideurs (GIEC), *IPCC*, 2020.

- [17] Changement climatique, Les bases scientifiques physiques : Résumé à l'intention des décideurs (GIEC), *IPCC*, 2021.
- [18] Troisième communication nationale de l'Algérie, Convention cadre des nations unies sur le changement climatique, 2023.
- [19] National Inventory Report of Algeria, Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2023.
- [20] Factsheet : The EU Taxonomy's, uptake on the ground, EU Sustainable Finance, 2024.
- [21] S. AMROUN, Caractérisation de nouveaux ciments à base de verre finement broyé et étude de leurs durabilité et résistances, Mémoire de projet de fin d'études, 2022.
- [22] Feuille de route de décarbonation de la filière Ciment : Scopes CO_2 , Conseil National de l'Industrie, 2023.
- [23] F. Schorcht *and al.*, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, *EC*, 2013.
- [24] S. Dahech *and al.*, Pollution atmosphérique et brise de mer à Annaba, (Nord-Est de l'Algérie) : Cas de l'ozone et du dioxyde de soufre, 2019.
- [25] Monoxyde de carbone, Fiche toxicologique n°47, *INRS*, 2021.
- [26] Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment, Centre d'activités régionales pour la production propre (*CAR/PP*) : Plan d'action pour la Méditerranée, 2008.
- [27] A. Bougara *and al.*, Estimation des particules de poussières causée par l'industrie cimentière, 2011.
- [28] P.P. Naldeo, Étude d'une cimenterie : Optimiser les procédés de fabrication ou baisser l'usage du ciment ? ,2020.
- [29] T.H.T. Nguyen, Emissions polluantes des NO_x : Mécanisme de formation et de réduction, 2013.
- [30] S. Guermouche *and al.*, Chimie minérale descriptive : L'azote et l'acide nitrique, *Edition Al-Djazair*, 2013.

- [31] Muchnok *and al.*, Reducing Cement Plant Emissions via Algae Cultivation and Anaerobic Digestion. UF Journal of Undergraduate Research, 2023.
- [32] Y. Najjar, Gaseous pollutants formation and their harmful effects on health and environment, 2011.
- [33] A. Asthana *and al.*, Modélisation de la formation des NO_x dans le lit d'un incinérateur d'ordures ménagères à grille, *hal-00196681f*, 2007.
- [34] A. Asthana *and al.*, Modélisation de la formation des NO_x dans le lit d'un incinérateur d'ordures ménagères à grille, 2007.
- [35] F. Biagioli, Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NO_x emissions from industrial gas turbine burners, 2007.
- [36] Z. Li *and al.*, A kinetics mechanism of NO_x formation and reduction based on density functional theory, 2023.
- [37] NO_x control technologies for the cement industry : Final report, *EPA-457/R-00-002*, 2000.
- [38] Nørskov *and al.*, Combustion of solid alternative fuels in the cement kiln burner, 2012.
- [39] C.P. Fenimore, Studies of fuel-nitrogen species in rich flame gases, 1979.
- [40] F. Inambao *and al.*, The NO_x Formation Routes : Biodiesel, Combustion, Performance and Emissions Characteristics, 2020.
- [41] Thi. Nguyen, Émissions polluantes des NO_x : mécanisme de formation et de réduction, Thèse, 2013.
- [42] I. Iliuta *and al.*, Modeling of In-Line Low-NO_x calciners : A parametric study. Chemical Engineering Science, 2001.
- [43] Possibilités techniques et économiques de réduction des émissions de NO_x dans le secteur des cimenteries françaises, Convention MEEDDM, *INERIS*, 2010.
- [44] Th. Bris, Etude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse sur un brûleur à swirl bas NO_x, 2010.

- [45] T.V. Guseva *and al.*, Nitrogen oxide emissions reducing in cement production, IOP Conf., 2021.
- [46] Mathias Barreau, Étude de la réduction catalytique sélective (SCR) des NOx par un mélange éthanol-ammoniac, Université de Poitiers, 2017.
- [47] W. Doyle *and al.*, NOx Emissions Control from Stationary Sources, 2014.
- [48] B. Neuffer *and al.*, Alternative Control Techniques Document Update - NOx Emissions from New Cement Kilns, 2007.
- [49] Dj. Touil *and al.*, Modélisation d'un préchauffeur à cyclones d'une cimenterie et analyse des pertes physico-chimiques d'exergie, 2007.
- [50] H. Geoffrey Modern cement plant design with a view to efficiency and the environment, Presentation, *IEEE*, 1994.
- [51] Alternative control techniques document : NOx emissions from cement manufacturing, 1994.
- [52] F. Huchet, Rotary kiln process : An overview of physical mechanisms, models and applications, 2022.
- [53] R. Bastier *and al.*, Fours de cimenterie-Atelier de cuisson du clinker, Techniques de l'ingénieur, 2020.
- [54] R. Bastier *and al.*, Fours de cimenterie-Four rotatifs, Techniques de l'ingénieur, *Réf : BE8845 v2*, 2001.
- [55] FEECO International, The rotary kiln handbook, Algoma, 2018.
- [56] G. Kabir, *and al.*, Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant, 1994.
- [57] R. Bastier *and al.*, Fours de cimenterie-Refroidisseurs à clinker, Techniques de l'ingénieur, 2000.
- [58] G. Kabir *and al.*, Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plan, 2009.

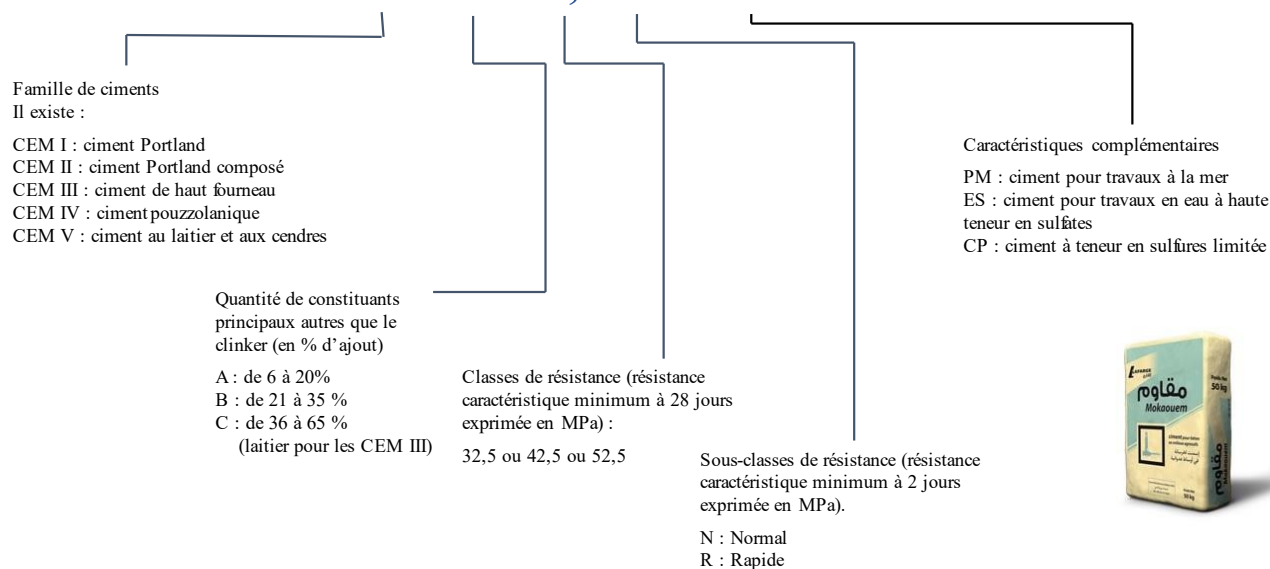
- [59] B.A. Sabrah, *and al.*, Physico-Mechanical and Chemical Properties of Composite Cement Containing High Percentages of Mechanically Activated Egyptian Slag, 2014.
- [60] Yu Yang *and al.*, Numerical simulation of low nitrogen oxides emissions through cement precalciner structure and parameter optimization, 2020.
- [61] M.Z. Sogut *and al.*, Investigation of effect of varying dead-state temperatures on energy and exergy efficiencies of a Raw Mill process in a cement plant, 2009.
- [62] L.A. Tokheim, Burning chamber installation for increased use of alternative fuels at Norcem Brevik, Norway, 2006.
- [63] L.A. Tokheim, The impact of staged combustion on the operation of a precalciner cement klin, 1999.
- [64] H. Zaidaoui, Etude des flammes turbulentes non-prémélangées stabilisées par un swirler : Effets de la recirculation des gaz de combustion et de l'enrichissement à l'oxygène, 2020.
- [65] J. Kelly *and al.*, Near-Zero NO_x Burner, California Energy Commission Report, 2018.
- [66] Maciej, *and al.*, Effect of alkalis on products of enforced carbonation of cement paste. Construction and Building Materials, 2021.
- [67] A.B. Ocnasu, Evaluation de la sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution par la simulation Monte Carlo : application à des stratégies de maintenance optimales, Université Polytechnique de Bucarest, 2008.
- [68] J.M. Commandre, Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de coques de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie, Thèse doctorat, 2002.
- [69] Duy Quang Dao, Technologies de recombustion avancée des oxydes d'azote : Etudes expérimentale et cinétique sur pilote semi-industriel. Chimie analytique. Université des Sciences et Technologie de Lille, 2010.
- [70] F. Akgun, Investigation of energy saving and NO_x reduction possibilities in a rotary cement kiln, 2001.

- [71] J.H. Kim *and al.*, Reduction of NO_x Emission from the Cement Industry in South Korea: A Review, 2022.
- [72] Y. Gu *and al.*, Impact of co-processing sewage sludge on cement kiln NO_x emissions reduction, 2021.
- [73] Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, 2021.
- [74] P. Tettamanzi, The European Union (EU) Green Taxonomy: Codifying Sustainability to Provide Certainty to the Markets, 2023.
- [75] J.F. Weinberg, The first half-million years of combustion research and today's burning problems, 1975.

ANNEXES

I.1 Nomenclature du Ciment

CEM III/A 42,5 N- ES



I.2 Composition du Ciment

Composants	Calcaire (en %)	Argile (en %)	Sable (en %)	Fer (en %)	Matière première (en %)
SiO_2	0.5-50	33-78	80-99	0.5-30	12-16
Al_2O_3	0.1-20	7-30	0.5-7	0.2-4	2-5
Fe_2O_3	0.2-5.9	4-15	0-4	50-93	1.5-2.5
Mn_2O_3	0.02-0.15	0.09	0.05	0.1-4	0-5
CaO	20-55	0.2-25	0.1-3	0.1-34	40-45
MgO	0.2-6	0.3-5	0.3-0.5	0.5-7	0.3-5
K_2O	0.3-5	0.4-5	0.2-3	0.1-1	0.1-1.5
Na_2O	0-1.5	0.1-1.5	0-1	0.1-1	0.1-0.5
SO_3	0-0.7	0-4	0-0.5	0-3	0-1.5
Cl	0-0.6	0-1	Traces	0-0.5	0-0.3
TiO_2	0-0.7	0.2-1.8	0-0.5	0-3	0-0.5
P_2O_5	0-0.8	0-1	0-0.1	0-1	0-0.8
ZrO_5		0.02			
$CaCO_3$	96				
LOI	2-44	1-20	≤ 5	0.1-30	32-36

Source : Scharcht et al., 2013.

I.2 Types de ciments et leurs composantes

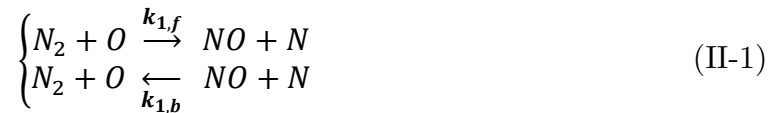
Type Ciments	Nomenclature		Composition										Additifs Mineurs	
			Constituants principaux									Limestone		
			Clinker	Blast Furnace Slag	Silica Fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	L			LL
						Natural	Natural Calcined	Siliceous	Calcareous					
K	S	D	P	Q	V	W	T							
CEM I	Portland cement	CEM I	95–100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5	
CEM II	Portland - slag cement	CEM II/A-S	80–95	6–20	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5	
		CEM II/B-S	65–79	21–35	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5	
	Portland - silica fume cement	CEM II/A-D	90–94	-	6–10	-	-	-	-	-	-	-	0–5	
	Portland - pozzolana cement	CEM II/A-P	80–94	-	-	6–20	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-P	65–79	-	-	21–35	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/A-Q	80–94	-	-	-	6–20	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-Q	65–79	-	-	-	21–35	-	-	-	-	-	-	0–5
	Portland - fly ash cement	CEM II/A-V	80–94	-	-	-	-	6–20	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-V	65–79	-	-	-	-	21–35	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/A-W	80–94	-	-	-	-	-	6–20	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-W	65–79	-	-	-	-	-	21–35	-	-	-	-	0–5
	Portland - burnt shale	CEM II/A-T	80–94	-	-	-	-	-	-	6–20	-	-	-	0–5
		CEM II/B-T	65–79	-	-	-	-	-	-	21–35	-	-	-	0–5
	Portland - limestone cement	CEM II/A-L	80–94	-	-	-	-	-	-	-	6–20	-	-	0–5
CEM II/B-L		65–79	-	-	-	-	-	-	-	21–35	-	-	0–5	

Type Ciments	Nomenclature	Composition											
		Constituants principaux										Additifs Mineurs	
		Clinker	Blast Furnace Slag	Silica Fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
					Natural	Natural Calcined	Siliceous	Calcareous					
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL				
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland- composite cement	CEM II/A-M	80-94	6-20								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5	
CEM III	Blast furnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement ⁽⁵⁾	CEM IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	0-5	
CEM V	Composite cement ⁽⁵⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50		-	-	-	-	0-5	

II.1 Mécanisme étendu de *Zeldovich*

$K = A T^n e^{-\frac{E}{RT}}$	A $\left[\frac{m^3}{mol.s}\right]$	n dans T^n	E/R [K]
$k_{1,f}$	$1.8 \cdot 10^8$	0	-38370
$k_{1,b}$	$3.8 \cdot 10^7$	0	-425
$k_{2,f}$	$1.8 \cdot 10^4$	1	-4680
$k_{2,b}$	$3.8 \cdot 10^3$	1	-20820
$k_{3,f}$	$7.1 \cdot 10^7$	0	-450
$k_{3,b}$	$1.7 \cdot 10^8$	0	-24560

Ce mécanisme chimique constitué de deux réactions en chaîne a été proposé pour la première fois par Zeldovich.



Parfois, la réaction suivante, impliquant uniquement des réactifs radicalaires, est également incluse :



Les équations (1.1), (1.2) et (1.3) sont désignées sous le nom de mécanisme étendu de Zeldovich. Les constantes de vitesse d'Arrhenius sont données dans le Tableau II.1. La forte liaison triple dans la molécule d'azote rend la première réaction l'étape limitante du mécanisme. Cela explique également la forte dépendance à la température du mécanisme de Zeldovich.

- K : Constante de vitesse
- A : Constante d'Arrhénius

- E : Energie d'activation
- R : Constante des gaz parfait, égale à 8,31 J.K⁻¹.mol⁻¹
- T : la température en K

II.1 Mécanisme de *Fenimore*

La formation des NO_x à partir des combustibles riches en azote (Le coke de pétrole, le charbon) est désigné comme le mécanisme de Fenimore.

Les étapes initiales du mécanisme sont :



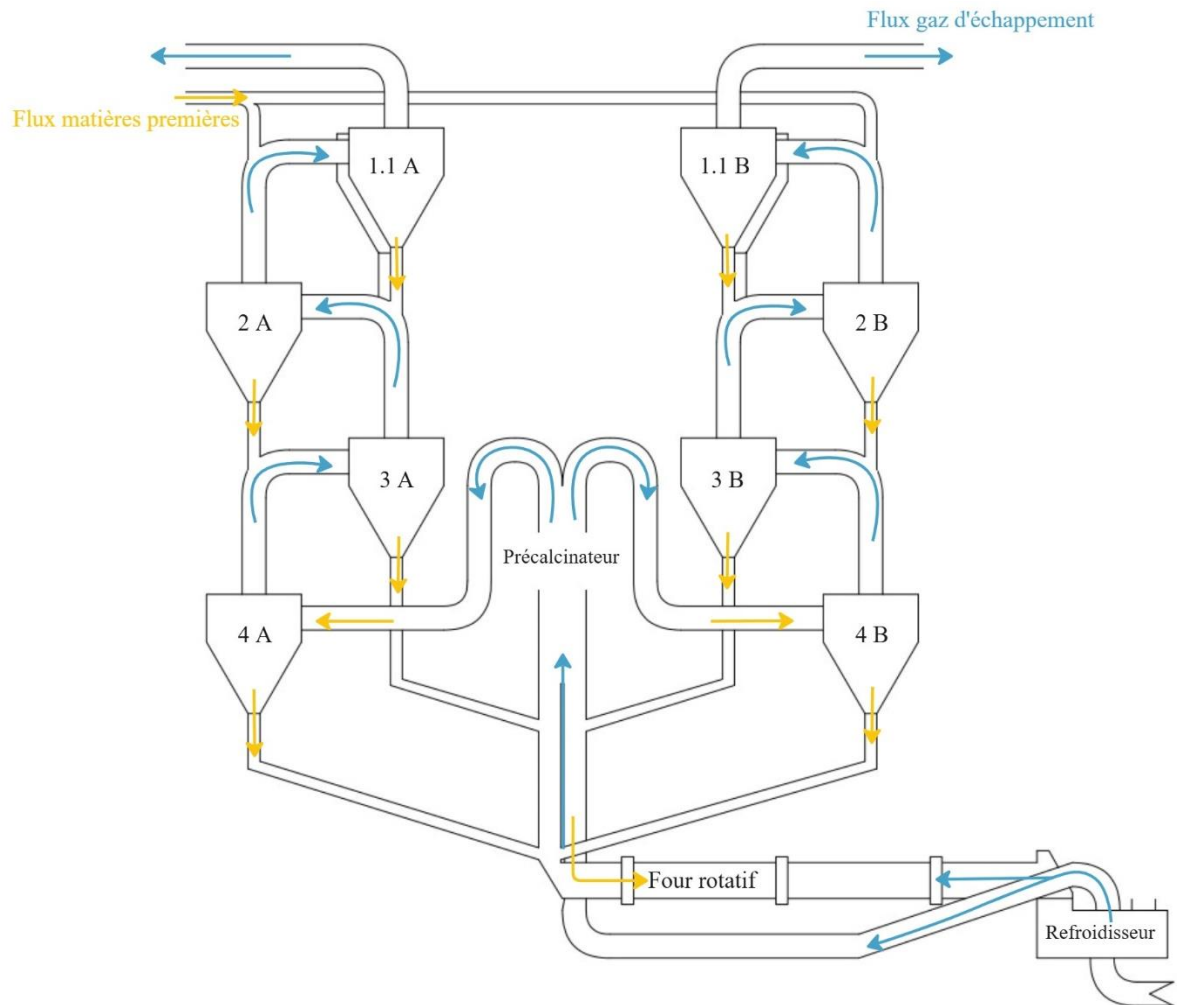
Le rapport d'équivalence du carburant, ϕ , est fréquemment utilisé dans le domaine de la combustion, il est défini comme :

$$\phi \triangleq \frac{\left(\frac{m_{air}}{m_{comb}}\right)_{réel}}{\left(\frac{m_{air}}{m_{comb}}\right)_{stœchiométrique}}$$

III.1 Propriétés et compositions du gaz naturel

<i>Propriétés du Gaz Naturel</i>	
m (g/mol)	18.72
Pouvoir Calorifique Supérieur ($\Delta\tilde{H}_s$)	39.92 MJ/m ³
Pouvoir Calorifique Inférieur ($\Delta\tilde{H}_i$)	9533.89 Kcal/m ³
	36.07 MJ/m ³
	8615.97 Kcal/m ³
<i>Constituants</i>	<i>% Molaire</i>
Azote	5.057
Dioxyde de carbone	0.169
Méthane	84.208
Éthane	7.800
Propane	1.883
i-Butane	0.264
n-Butane	0.414
Néo-Pentane	0.000
i-Pentane	0.082
n-Pentane	0.090
Hexanes	0.021
Heptanes	0.007
Benzène	0.002
Octanes	0.001
Toluène	0.000
Nonanes	0.001
Décanes	0.000
TOTAL	100.000

III.2 Schématisation des flux échanger dans l'atelier de cuisson



III.2 Spécifications techniques de l'installation

Capacité Silo farine	8000 Tonnes
Capacité des trémies d'alimentation préchauffeur	120 Tonnes
Débit d'alimentation farine	420 Tonnes/heures
Capacité de la tour de préchauffage	5000 Tonnes/jours
Ventilateur ID Fan	1079015 m^3/h
	9600 Pa

Précalcinateur

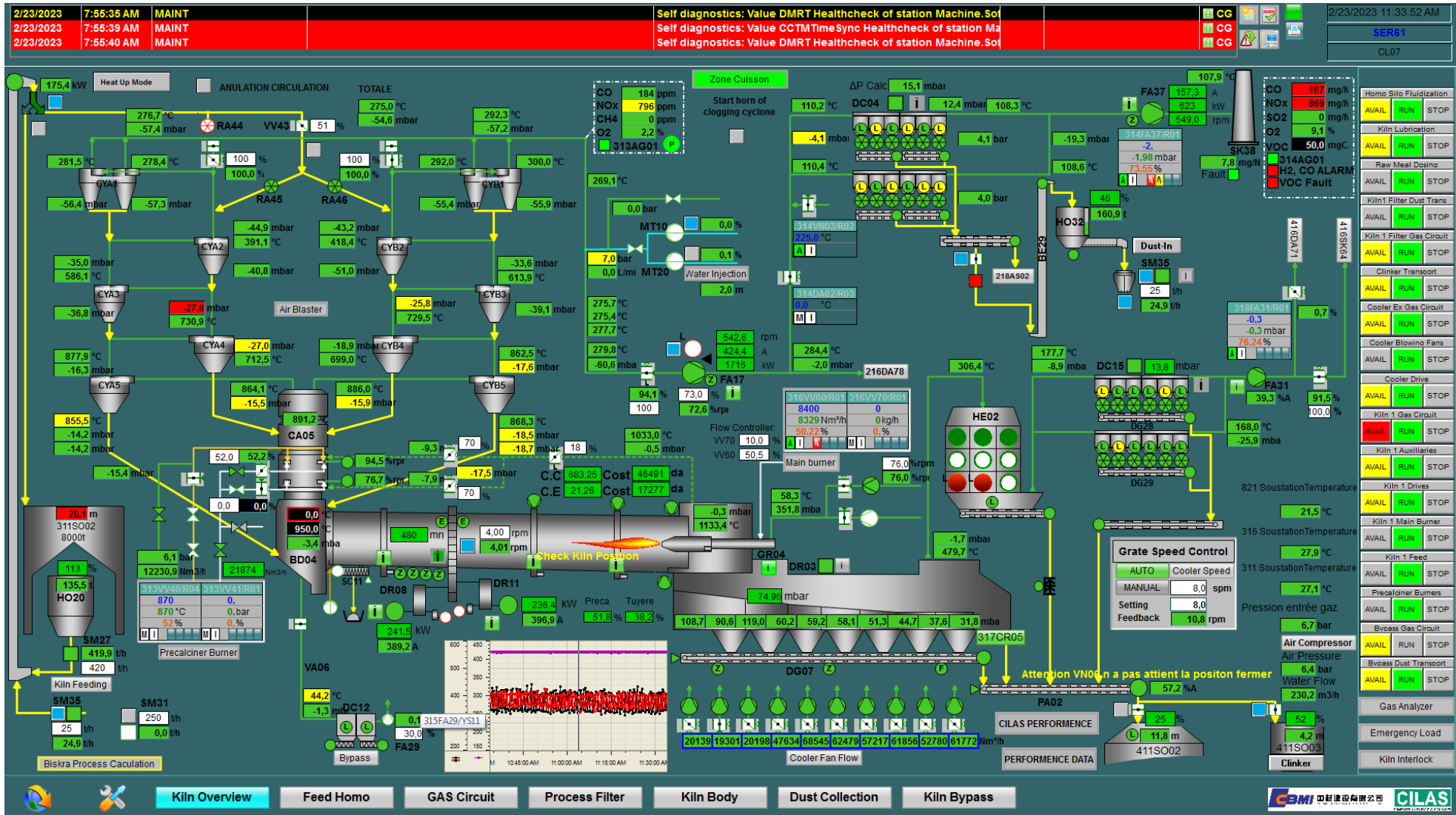
Consommation calorifique STEC	60 % du combustible
Dimensions	$\varnothing 7500 \cdot 39\ 500\ mm$

Volume utile	1182.2 m^3
2 brûleurs principaux	67.5 MW/h 6200 Nm^3/h (Gaz naturel) 5800 Kg/h (Gasoil)
2 brûleurs Low-NOx	32.5 MW/h 3100 Nm^3/h (Gaz naturel) 2740 Kg/h (Gasoil)

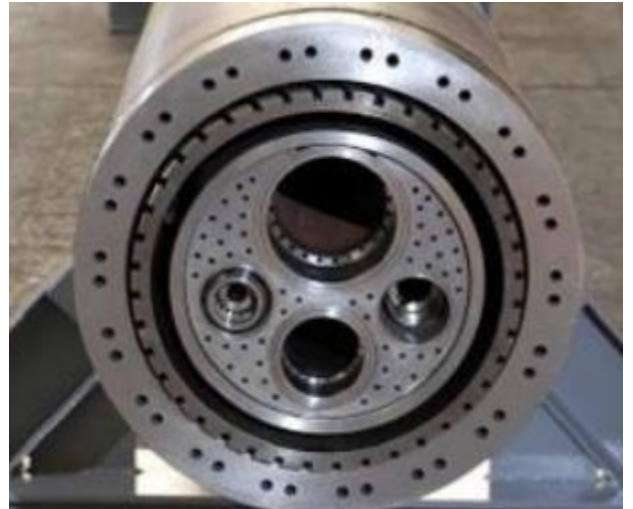
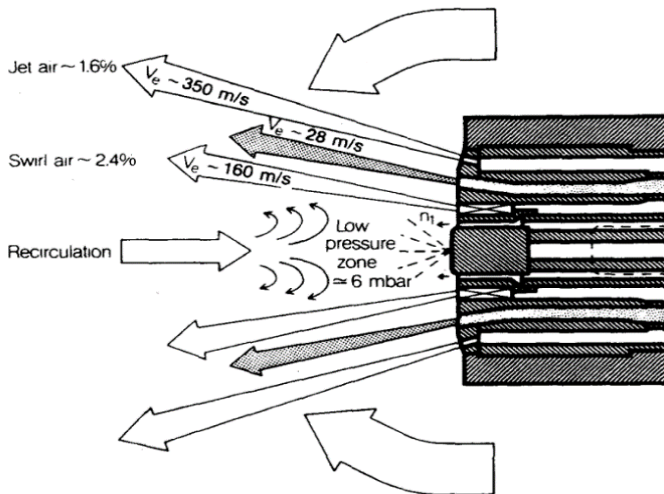
Four rotatif

Dimensions	$\emptyset 5 \cdot 74 m$
Inclinaison	4 %
Vitesse de rotation	4.22 tr/min
Consommation calorifique STEC	765 kcal/kg

IV.1 Paramètres opératoires de l'installation



IV.2 Brûleur Low-NO_x (Combustion étagée)



IV.4 Types d'installation

Type d'installation	Nom de l'installation	Références
Four long sans precalcinateur	Ancienne installation du combustion (Long Kiln)	[75]
Four à préchauffeur	Kiln preheater (PH-Kiln)	[63]
Four à PH/PC	PH/PC Kiln	[63]
Precalcinateur avec conduite d'air tertiaire	AS-ILC or AS- SLC	[63]
Precalcinateur avec conduite d'air tertiaire	AT-ILC or AT-SLC	[68]
Precalcinateur avec cyclones tour	ILC Kiln	[71]
Precalcinateur séparer	SLC Kiln	[69]