



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institute de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département**

Maintenance en Electromécanique

**MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Electromécanique industrielle

**Spécialité :** Maintenance en électromécanique

**Thème**

**Etude analytique du Bilan Énergétique d'un four  
rotatif d'une cimenterie**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Nom Prénom**

BELHADJ Aicha & BAOUCHE Rania

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom             | Grade | Etablissement | Qualité   |
|---------------------------|-------|---------------|-----------|
| BOUHAMRI Nouredine        | MCA   | IMSI          | President |
| BOUHAFS Mohammed          | MCA   | IMSI          | Encadreur |
| DARRAMDANE Mohammed zohir | MCA   | IMSI          | Examineur |

**2025/2026**

## *Remerciement*

Premièrement, nous remercions Allah pour la force et la volonté qu'Il nous a accordées afin de mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'occasion de la réalisation de notre projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master, et nous sommes conscientes que cette réalisation n'aurait pas été possible sans le soutien et l'aide de plusieurs personnes.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant, **M. Mohamed Bouhafs**, pour son accompagnement, ses conseils et ses orientations tout au long de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de **l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle – Université d'Oran 2** pour leur contribution à notre formation.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour le temps qu'ils y consacrent.

Nous remercions chaleureusement les responsables et le personnel de la cimenterie **Holcim Algerie-Oggaz** pour leur accueil et leur disponibilité. Une dédicace spéciale est adressée à **M. Hocine Ouamara**, chargé des travaux électriques et instrumentation, pour sa gentillesse et son aide précieuse.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos chers parents pour leur soutien et leurs encouragements constants.

## *Dédicace*

Avec l'aide **d'Allah**, s'achève aujourd'hui l'une des étapes les plus importantes de ma vie.

À Lui, je rends grâce et louange pour la force, la patience et la volonté qu'Il m'a données.

À ma mère **Mme Fatima Imam**, la personne la plus chère à mon cœur, ton amour inconditionnel, tes prières et ton soutien dans tous les domaines ont été la lumière de mon chemin. Mon succès est ton succès. Je t'aime infiniment.

À mon père **M. Mhamed Belhadj**, pour ta présence à mes côtés, tes encouragements, tes sacrifices et ta confiance en moi. Je t'offre ce travail en signe de reconnaissance pour tout ton effort et ton dévouement. Merci pour tout, papa

À mes frères, merci pour votre amour, votre soutien et votre présence dans chaque moment de ma vie. Vous êtes ma force et ma motivation.

À mon binôme et amie **Mme Rania Baouche**, merci pour ces journées remplies de travail, de fous rires, de stress et d'espoirs partagés. Ces nuits d'étude resteront à jamais gravées dans ma mémoire.

À mon amie de lycée **Mme Hiba Chahmi**, malgré nos chemins différents à l'université, notre amitié est restée forte et précieuse.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma réussite par un conseil, une parole, un encouragement ou une prière, je vous dis du fond du cœur : MERCI.

*Aicha Belhadj.*

## *Dédicace*

En refermant ce chapitre important de ma vie, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à celles et ceux qui ont été les étoiles guidant mon parcours. Présents dans les moments de joie comme dans les épreuves, vous avez été un soutien indéfectible, une force précieuse qui a rendu ce chemin vers la réussite plus accessible. Votre présence constante a nourri mon inspiration et renforcé ma détermination tout au long de cette quête de savoir. C'est avec une immense gratitude que je dédie ce mémoire à mes parents.

Je rends grâce à Dieu le Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire à ma chère mère **Mme Naouel Ghribli**, pour son soutien inconditionnel, son amour infini et ses encouragements constants, qui ont été pour moi une source permanente de motivation.

À mon père **M. Hadj Baouche**, pour ses sacrifices, ses efforts et son dévouement afin de m'offrir les meilleures conditions de réussite dans mes études.

À mon frère Mohamed et mes sœurs Wiam et Bochra, pour leur soutien, leur affection et leurs encouragements sincères.

À mon binôme Mme Aicha Belhadj, merci d'avoir partagé les nuits blanches, et les fous rires, nous avons passé des moments inoubliables. Cette réussite est autant la tienne que la mienne.

Enfin, à toute ma famille, proche et lointaine, pour leur soutien et leurs prières.

***Rania Baouche.***

## Résumé

Ce travail présente une étude analytique du bilan énergétique et thermique d'un four rotatif de cimenterie appliqué à un cas industriel réel. Le modèle développé est structuré en deux niveaux : (i) un modèle de transfert de chaleur basé sur les équations des flux thermiques dans le four rotatif, intégrant les mécanismes de conduction, convection et rayonnement, et (ii) un modèle d'audit énergétique fondé sur les bilans d'énergie du système, exprimés en termes d'énergie entrante et d'énergie sortante. La résolution numérique du modèle a été réalisée à l'aide du langage Fortran, à partir de données industrielles réelles. Une étude paramétrique a été conduite afin d'évaluer l'influence des conditions opératoires (températures, débits massiques et vitesses de rotation) sur les flux thermiques et sur le bilan énergétique global du four. L'objectif est d'identifier la distribution de l'énergie de combustion, de quantifier les pertes thermiques et de proposer des axes d'optimisation en vue d'améliorer l'efficacité énergétique du four rotatif.

**Mots clés :** Four rotatif, cimenterie, méthode analytique, flux de chaleur, transfert thermique, Fortran, audit énergétique.

## ملخص

يقدم هذا العمل دراسة تحليلية للحصيلة الطاقوية والحرارية لفرن دوار في صناعة الإسمنت، وذلك من خلال تطبيقه على حالة صناعية حقيقية. يعتمد النموذج المطور على مستويين أساسيين: أولاً: نموذج انتقال الحرارة، المبني على معادلات التدفقات الحرارية داخل الفرن الدوار، مع الأخذ بعين الاعتبار آليات التوصيل والحمل والإشعاع. ثانياً: نموذج التدقيق الطاقوي، القائم على موازين الطاقة للنظام، والمعتبر عنها من حيث الطاقة الداخلة والطاقة الخارجة. تمت المعالجة العددية لهذا النموذج باستخدام لغة Fortran، اعتماداً على معطيات صناعية حقيقية. كما أجريت دراسة بارامترية لتقييم تأثير ظروف التشغيل، مثل درجات الحرارة، ومعدلات التدفق الكتلي، وسرعات الدوران، على التدفقات الحرارية والحصيلة الطاقوية الإجمالية للفرن. يهدف هذا العمل إلى تحديد توزيع طاقة الاحتراق، وتقدير الفوائد الحرارية، واقتراح محاور للتحسين من أجل رفع الكفاءة الطاقوية للفرن الدوار.

**الكلمات المفتاحية:** الفرن الدوار، صناعة الإسمنت، المنهج التحليلي، التدفقات الحرارية، انتقال الحرارة، فورتران، التدقيق الطاقوي.

## Abstract

This work presents an analytical study of the energy and thermal balance of a cement rotary kiln applied to an industrial case. The developed model is structured in two levels: (i) a heat transfer model based on the thermal flux equations in the rotary kiln, incorporating conduction, convection, and radiation mechanisms, and (ii) an energy audit model based on the system energy balances, expressed in terms of energy input and energy output. The numerical solution of the model was performed using the Fortran programming language, based on real industrial data. A parametric study was conducted to evaluate the influence of operating conditions (temperatures, mass flow rates, and rotational speeds) on heat fluxes and the overall energy balance of the kiln. The objective is to identify the distribution of combustion energy, quantify thermal losses, and propose optimization strategies to improve the energy efficiency of the rotary kiln.

**Keywords:** Rotary kiln, cement plant, analytical method, heat flux, heat transfer, Fortran, energy audit.

## Sommaire

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Liste des figures.....                                                                  | ix        |
| Nomenclature .....                                                                      | xii       |
| Introduction générale .....                                                             | 1         |
| <b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LA CIMENTERIE, LE CIMENT ET LE FOUR ROTATIF .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>I.1. Introduction .....</b>                                                          | <b>2</b>  |
| <b>I.2. Généralité sur la cimenterie .....</b>                                          | <b>2</b>  |
| 1. Définition .....                                                                     | 2         |
| 2. Types des cimenteries .....                                                          | 2         |
| 3. Matier premier du ciment .....                                                       | 3         |
| 4. Procède de fabrication du ciment.....                                                | 3         |
| 4.1. Préparation de cru .....                                                           | 4         |
| 4.2. Préchauffage .....                                                                 | 6         |
| 4.3. Cuisson dans le four rotatif.....                                                  | 6         |
| 4.4. Refroidissement du clinker .....                                                   | 6         |
| 4.5. Broyage final du ciment.....                                                       | 8         |
| 4.6. Contrôle de qualité.....                                                           | 8         |
| <b>I.3. Généralité sur le ciment.....</b>                                               | <b>9</b>  |
| 1. Définition .....                                                                     | 9         |
| 2. Constituants principaux du ciment .....                                              | 9         |
| 3. Types de ciment .....                                                                | 9         |
| <b>I.4. Généralités sur le four rotatif.....</b>                                        | <b>11</b> |
| 1. Définition .....                                                                     | 11        |
| 2. Principe de fonctionnement .....                                                     | 11        |
| 3. Description du four rotatif .....                                                    | 13        |
| 3.1. Structure du four .....                                                            | 13        |
| 3.2. Phénomènes thermiques et protection interne du four rotatif.....                   | 17        |
| <b>I.5. Conclusion : .....</b>                                                          | <b>21</b> |
| <b>CHAPITRE II : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU BILAN THERMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>II.1. Introduction.....</b>                                                          | <b>22</b> |
| <b>II.2. Recherche bibliographique .....</b>                                            | <b>22</b> |
| <b>II.3. Le.....</b>                                                                    | <b>25</b> |
| <b>II.3.1. Analyse des mécanismes de transfert de chaleur dans le four rotatif.....</b> | <b>25</b> |
| 1. Transfert de chaleur par convection.....                                             | 25        |
| 2. Transfert de chaleur par conduction .....                                            | 26        |

|                                                                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3. Transfert de chaleur par rayonnement .....                                                                             | 26        |
| II.3.2. Etude du bilan thermique.....                                                                                     | 26        |
| <b>II.3.3. Modelé Mathématique.....</b>                                                                                   | <b>27</b> |
| 1. Le transfert de chaleur de GAZ « G » et les briques réfractaires (paroi interne)<br>« B » ( $Q_{RGB}+Q_{CGB}$ ).....   | 28        |
| 2. Transfert de chaleur entre le gaz « G » et le solide (lit de matière<br>« b ») ( $Q_{RGb}+Q_{CGb}$ ).....              | 30        |
| B. Par Rayonnement.....                                                                                                   | 31        |
| 3. Transfert de chaleur entre réfractaires (paroi interne) « b » et le solide<br>« B » ( $Q_{Cond-Bb}+Q_{Rad-Bb}$ ) ..... | 31        |
| <b>II.4. Modélisation thermodynamique de four rotatif .....</b>                                                           | <b>36</b> |
| 1. Étude du bilan énergétique .....                                                                                       | 37        |
| 1.1. Bilan de masse du système .....                                                                                      | 37        |
| 2. Bilan énergétique .....                                                                                                | 38        |
| A. Entrées énergétiques du système : .....                                                                                | 39        |
| B. Sorties énergétiques du système .....                                                                                  | 40        |
| <b>II.5. Conclusion .....</b>                                                                                             | <b>41</b> |
| <b>CHAPITRE III : SIMULATION NUMÉRIQUE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE ET<br/>THERMIQUE AVEC FORTRAN.....</b>                        | <b>22</b> |
| <b>III.1. Introduction.....</b>                                                                                           | <b>43</b> |
| <b>III.2. Présentation générale du langage Fortran.....</b>                                                               | <b>43</b> |
| 1. Historique.....                                                                                                        | 43        |
| 2. Principes du langage Fortran .....                                                                                     | 43        |
| 3. Développement du langage FORTRAN .....                                                                                 | 44        |
| 4. Intérêt du langage Fortran.....                                                                                        | 44        |
| 5. Structure de fonctionnement de FORTRAN .....                                                                           | 45        |
| 5.1. Écriture du programme .....                                                                                          | 45        |
| 5.2. Compilation (compilateur FORTRAN).....                                                                               | 45        |
| 5.3. Exécution (processeur/unité de calcul).....                                                                          | 45        |
| 5.4. Résultats (sortie : écran / fichiers) .....                                                                          | 45        |
| 6. Flux de travail de programmation de base :.....                                                                        | 45        |
| 7. Conception et implémentation d'un programme Fortran .....                                                              | 46        |
| 8. Structure d'un programme Fortran .....                                                                                 | 47        |
| 1. Données du système étudié et paramètres de calcul .....                                                                | 54        |
| 1.1. Données géométriques du four .....                                                                                   | 54        |
| 1.2. Données opératoires (fonctionnement .....                                                                            | 54        |
| 1.3. Propriétés thermo physiques .....                                                                                    | 55        |

|                                        |                                                                                                    |           |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4.                                   | Données thermiques.....                                                                            | 56        |
| 1.5.                                   | Paramètre de réfractaire et couches de four.....                                                   | 56        |
| <b>III.4.</b>                          | <b>Organigramme de la simulation numérique.....</b>                                                | <b>56</b> |
| <b>III.5.</b>                          | <b>Conclusion.....</b>                                                                             | <b>58</b> |
| <b>CHAPITRE IV :</b>                   | <b>RESULTATS ET DISSCUSION .....</b>                                                               | <b>43</b> |
| <b>IV.1.</b>                           | <b>Introduction .....</b>                                                                          | <b>59</b> |
| <b>IV.2.</b>                           | <b>Résultats et discussion.....</b>                                                                | <b>59</b> |
| <b>IV.3.</b>                           | <b>Résultats du bilan énergétique .....</b>                                                        | <b>60</b> |
| <b>IV.4.</b>                           | <b>Étude paramétrique du bilan énergétique .....</b>                                               | <b>61</b> |
| 1.                                     | Energie entrant :.....                                                                             | 61        |
| 1.1.                                   | Influence de débit de gaz bruleur sur énergie de combustion (variation du débit de gaz) .....      | 61        |
| 1.2.                                   | Influence de température de matières premier sur Energie interne du cru .                          | 62        |
| 1.3.                                   | Influence de débit de la matière premier sur Energie interne du cru .....                          | 62        |
| 1.4.                                   | Influence de débit de l'eau sur L'énergie transportée par l'eau de refroidissement .....           | 63        |
| 1.5.                                   | Diagramme de l'énergie entrante du système .....                                                   | 64        |
| 2.                                     | Energie sortant .....                                                                              | 65        |
| 2.1.                                   | L'énergie chimique nécessaire pour former le clinker .....                                         | 65        |
| 2.2.                                   | Influence de température des gaz sortie sur la chaleur perdue .....                                | 66        |
| 2.3.                                   | Influence de débit de l'eau sur la chaleur apportée au four par l'air chaud du refroidisseur ..... | 67        |
| 2.4.                                   | Influence de débit poussière sur les Pertes de chaleur dues à la poussière .....                   | 68        |
| 2.5.                                   | Influence de la température de la virole sur les pertes par rayonnement de virole.....             | 69        |
| 2.6.                                   | Influence de la température de la virole sur les pertes de chaleur par convection .....            | 70        |
| 2.7.                                   | Diagramme énergie sortant de système .....                                                         | 71        |
| <b>IV.5.</b>                           | <b>Étude de la distribution des flux thermiques issus de la combustion .....</b>                   | <b>72</b> |
| 1.                                     | Quantité de chaleur par convection entre gaz et brique.....                                        | 73        |
| 2.                                     | Quantité de chaleur par convection entre gaz et solide .....                                       | 73        |
| 3.                                     | Quantité de chaleur par conduction entre brique et solide.....                                     | 74        |
| 4.                                     | Les pertes de chaleur perdue vers l'environnement par rayonnement et convection .....              | 75        |
| <b>IV.6.</b>                           | <b>Conclusion et discussion .....</b>                                                              | <b>76</b> |
| <b>Conclusion Générale.....</b>        |                                                                                                    | <b>79</b> |
| <b>Reference bibliographique .....</b> |                                                                                                    | <b>80</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1. Les principales méthodes de fabrication du ciment [6].....                                                                                                         | 2  |
| Figure I-2. Les opérations en carrière. [8].....                                                                                                                               | 3  |
| Figure I-3. Les principales étapes de la fabrication du ciment [9] .....                                                                                                       | 4  |
| Figure I-4. Concassage de la matière première dans une cimenterie .....                                                                                                        | 4  |
| Figure I-5. Les machines de stacker et reclaimer .....                                                                                                                         | 5  |
| Figure I-6. Le broyeur à boulets [9].....                                                                                                                                      | 5  |
| Figure I-7. Fonctionnement du cyclone de la tour de préchauffage [1].....                                                                                                      | 6  |
| Figure I-8. Refroidisseur rotatif de l'eau dans la production de ciment blanc. ....                                                                                            | 7  |
| Figure I-9. Variation de la température de sortie du clinker au cours du temps .....                                                                                           | 8  |
| Figure I-10. Silo de stockage de ciment finale .....                                                                                                                           | 8  |
| Figure I-11. Laboratoire de contrôle (cure + tests du ciment/béton) .....                                                                                                      | 9  |
| Figure I-12. Vue générale du four rotatif et de ses principaux composants. ....                                                                                                | 11 |
| Figure I-13. Diagramme Température et durée de passage des gaz et des matières dans la cuisson [21].....                                                                       | 12 |
| Figure I-14. Virole d'un four rotatif.....                                                                                                                                     | 14 |
| Figure I-15. Ventilateurs de refroidissement de la virole du four rotatif .....                                                                                                | 14 |
| Figure I-16. Bandage et système de calage.....                                                                                                                                 | 15 |
| Figure I-17. Schéma d'un galet de support d'un four rotatif [19] .....                                                                                                         | 15 |
| Figure I-18. Système d'entraînement du four rotatif d'une cimenterie. ....                                                                                                     | 16 |
| Figure I-19. Couronne dentée d'un four rotatif .....                                                                                                                           | 17 |
| Figure I-20. Contraintes sur le garnissage du four [9].....                                                                                                                    | 17 |
| Figure I-21. L'état des briques réfractaires avant et après fonctionnement du four .....                                                                                       | 19 |
| Figure I-22. (A)Composition de brûleur de four rotatif. (B)corps de brûleur .....                                                                                              | 20 |
| Figure I-23. (a)Un profil physique des réfractaires d'un four rotatif (épaisseur de croutage).<br>(b) une analyse chimique des matériaux constituant des réfractaires.[9]..... | 21 |
| <br>Figure II- 1. Mode de transfert thermique du four rotatif [38] .....                                                                                                       | 27 |
| Figure II- 2. Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale (condition stationnaire) [48]. ....                            | 28 |
| Figure II- 3. (a) Couches de paroi dans la zone de cuisson d'un four à ciment. (b) Résistances des couches. [70].....                                                          | 33 |
| Figure II- 4. Le réseau de résistance thermique pour le flux de chaleur à travers le manteau du four rotatif. [64] .....                                                       | 35 |
| Figure II- 5. Présentation de la disposition réfractaire et de la couche anzast dans un four rotatif.....                                                                      | 36 |
| Figure II- 6. Bilan massique du système de four. [69].....                                                                                                                     | 37 |
| Figure II- 7. Schéma de Contrôle du volume, des différents flux et des composants du système de four. [69].....                                                                | 38 |
| <br>Figure III- 1. Exemples de contenu de lignes en Fortran.....                                                                                                               | 44 |
| Figure III- 2. Schéma du processus de programmation en Fortran. Les fichiers sont représentés par des ronds blancs et les programmes externes par des cases vertes.[75]        | 46 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FigureIII- 3.Schéma représentatif des différentes étapes de la conception d'un programme Fortran. [1] .....                         | 47 |
| Figure III- 4.Modélisation 3D et caractéristiques géométriques des différentes zones de briques réfractaires du four rotatif. ....  | 50 |
| FigureIII- 5.Dessin technique du four rotatif et répartition des zones de briquetage réfractaire .....                              | 51 |
| Figure III- 6.Plan de calepinage et de soudage de la virole du four rotatif .....                                                   | 52 |
| Figure III- 7.Schéma synoptique de supervision et de contrôle du four rotatif de ciment blanc de la cimenterie HOLCIM-Algerie. .... | 53 |
|                                                                                                                                     |    |
| Figure IV- 1.Variation de l'énergie de combustion en fonction du débit de gaz .....                                                 | 61 |
| Figure IV- 2.Variation de l'Energie interne de cru en fonction de la température de cru $T_{cru}$ .....                             | 62 |
| Figure IV- 3.Variation de l'énergie interne du cru en fonction de débit. ....                                                       | 63 |
| Figure IV- 4.Variation de l'énergie transportée par le refroidisseur en fonction du débit d'eau.....                                | 64 |
| Figure IV- 5.Répartition énergétique des différents flux entrant du système .....                                                   | 65 |
| Figure IV- 6. Contribution des oxydes à l'Energie de formation du clinker. ....                                                     | 66 |
| Figure IV- 7.Variation de la chaleur perdue des gaz sortie en fonction de la température $T_{eg}$ .....                             | 67 |
| Figure IV- 8.Variation de la chaleur apportée par l'eau de refroidisseur en fonction de débit de l'eau.....                         | 68 |
| Figure IV- 9.Variation des pertes de chaleur dues aux poussières en fonction de débit de poussières.....                            | 69 |
| Figure IV- 10.Influence de la température de la virole sur les pertes par rayonnement (kJ/kg de clinker). ....                      | 70 |
| Figure IV- 11.Variation des pertes par convection de la surface de virole en fonction de température .....                          | 71 |
| Figure IV- 12.Diagramme des pertes et énergies sortantes du four en pourcentage.....                                                | 72 |
| Figure IV- 13.Répartition de la quantité de chaleur échangée entre gaz et brique .....                                              | 73 |
| Figure IV- 14. Répartition de la quantité de chaleur échangée entre gaz et solide.....                                              | 74 |
| Figure IV- 15. Répartition de la quantité de chaleur échangée entre solide et brique....                                            | 75 |
| Figure IV- 16.Répartition les pertes de chaleur perdue vers l'environnement.....                                                    | 76 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I-1. Propriétés des différents types de briques réfractaires [9] .....                                 | 18 |
| Tableau II- 1. Composants chimiques des matières premières et du clinker de la cimenterie HOLCIM Algerie. .... | 38 |
| Tableau III- 1. Paramètres géométriques du four rotatif.....                                                   | 54 |
| Tableau III- 2. Conditions opératoires du four rotatif.....                                                    | 55 |
| Tableau III- 3. Propriétés thermo-physiques utilisées dans le système .....                                    | 56 |
| Tableau III- 4. Températures caractéristiques des différents milieux du four rotatif.....                      | 56 |
| Tableau III- 5. Caractéristiques de réfractaire et couches de four .....                                       | 56 |
| Tableau IV- 1. Table de bilan énergétique de système étudiée .....                                             | 60 |

## Nomenclature

### Lettres latines

|              |                                                    |                    |
|--------------|----------------------------------------------------|--------------------|
| $Q$          | Énergie par 1kg de clinker                         | kJ/kg              |
| $\dot{m}$    | Débit massique                                     | kg/s               |
| $m$          | La masse                                           | kg                 |
| $\dot{E}$    | Energie                                            | kJ/s               |
| $C_p$        | Capacité thermique massique                        | J/kg.k             |
| $Q$          | Le flux de chaleur                                 | W                  |
| $T$          | Température                                        | K                  |
| $K_p$        | Conductivité thermique de paroi                    | W/mK               |
| $L$          | Longueur                                           | m                  |
| $C$          | Chaleur spécifique                                 | kJ/kg °C           |
| $D$          | Diamètre du four                                   |                    |
| $h$          | Coefficient de transfert de chaleur par convection | W/m <sup>2</sup> K |
| $H$          | Pouvoir calorifique inférieur                      | kJ/kg              |
| $D_e$        | Diamètre hydraulique du four                       | m                  |
| $r_{in}$     | Rayon intérieur du four                            |                    |
| $r_{ex}$     | Rayon extérieur du four                            |                    |
| $L_{gcl}$    | Longueur de la chorde du lit                       | m                  |
| $T_w$        | Température de la paroi intérieure du four         | K                  |
| $r_w$        | Rayon interne (paroi interne / gaz)                | m                  |
| $K$          | Conductivité thermique                             | W/mK               |
| $T_s$        | Température de la surface de virole                | K                  |
| $T_{\infty}$ | Température ambiante                               | K                  |
| $e$          | Epaisseur                                          | m                  |
| $v$          | Vitesse                                            | m/s                |

### Indices

|      |                                        |
|------|----------------------------------------|
| cl   | Clinker                                |
| G    | Gaz                                    |
| b    | Lit/matérielle/solide                  |
| Rad  | Rayonnement                            |
| cru  | Matières premières de ciment           |
| rm   | Raw material                           |
| B    | Les briques réfractaires/paroi interne |
| Ref  | Réfractaire                            |
| Cond | Conduction                             |
| Conv | Convection                             |
| g    | Gaz de combustible (CH <sub>4</sub> )  |

|                               |                                                    |                                               |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| wc                            | Water cooling (l'eau de refroidisseur)             |                                               |
| eg                            | Gaz d'échappement du four (exhaust gas)            |                                               |
| <b>Nombres adimensionnels</b> |                                                    |                                               |
| Nu                            | Nombre de Nusselt                                  |                                               |
| ReD                           | Nombre de Reynolds axial                           |                                               |
| Re $\omega$                   | Nombre de Reynolds angulaire                       |                                               |
| P <sub>r</sub>                | Nombre de Prandtl                                  |                                               |
| <b>Symboles grecs</b>         |                                                    |                                               |
| $\Phi$                        | Flux de chaleur                                    | W                                             |
| $\varepsilon$                 | Émissivité                                         |                                               |
| $\sigma$                      | Constante de Stefan-Boltzmann                      | $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ |
| $\eta$                        | Fraction de solide                                 |                                               |
| $\rho$                        | Masse volumique                                    | kg/m <sup>3</sup>                             |
| $\Psi, \Omega, \phi$          | Facteurs géométriques du transfert par rayonnement |                                               |
| $\eta$                        | Rendement                                          |                                               |
| $\theta$                      | Angle du lit de matériau/repos                     | rad                                           |
| $\beta$                       | Angle de remplissage du four                       | rad                                           |
| $\nu$                         | Viscosité cinématique                              | m <sup>2</sup> /s                             |
| $\omega$                      | Vitesse de rotation                                | rad/s                                         |
| $\mu$                         | Viscosité dynamique                                | Pa·s                                          |
| $\alpha$                      | Absorptivité du gaz                                |                                               |
| $\varphi$                     | Densité de flux thermique                          | W.m <sup>2</sup>                              |

**Introduction générale**

L'industrie cimentière occupe une place essentielle dans le développement économique et industriel en raison de son rôle fondamental dans la production des matériaux de construction. Cependant, cette industrie se caractérise par une consommation énergétique très élevée, notamment au niveau du procédé de fabrication du clinker, dont le four rotatif constitue l'élément principal. Le fonctionnement de cet équipement nécessite d'importantes quantités d'énergie thermique pour assurer les transformations physico-chimiques de la matière première. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours rotatifs représente aujourd'hui un enjeu majeur tant sur le plan économique qu'environnemental.

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude du bilan énergétique et thermique du four rotatif. L'objectif est de comprendre comment l'énergie est utilisée dans le four, comment la chaleur se répartit, et quelles sont les principales pertes d'énergie. Cela permet aussi de proposer des solutions pour améliorer le rendement du four et réduire la consommation d'énergie.

Pour réaliser cette étude, on a utilisé une méthode basée sur un modèle mathématique qui décrit les échanges thermiques dans le four (conduction, convection et rayonnement). Ensuite, ce modèle a été programmé avec le langage FORTRAN afin de faire des simulations numériques en utilisant des données industrielles.

On a également étudié l'influence de plusieurs paramètres de fonctionnement comme les températures, les débits, ainsi que les vitesses axiale et angulaire du four. Cela permet de voir comment ces paramètres influencent les flux de chaleur et le comportement énergétique du système.

Les résultats obtenus permettent de faire un audit énergétique du four en identifiant les énergies entrantes et sortantes, ainsi que les pertes thermiques principales. Cette étude aide à mieux comprendre le fonctionnement du four rotatif et à proposer des conditions de fonctionnement plus efficaces.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres : le premier chapitre présente des généralités sur le ciment et le four rotatif, le deuxième chapitre décrit le modèle mathématique du bilan énergétique et thermique, le troisième chapitre présente la simulation numérique sous FORTRAN. Dans ce chapitre, on présente aussi les données du cas réel du four rotatif de HOLCIM Algérie, ainsi que les différents schémas et la description du système étudié., et le dernier chapitre est consacré aux résultats et à leur discussion.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale, suivie des perspectives de travail et de la liste complète des références bibliographiques utilisées pour l'élaboration de cette étude.



**CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LA  
CIMENTERIE, LE CIMENT ET LE FOUR  
ROTATIF**

## I.1. Introduction

Ce premier chapitre est consacré aux généralités sur la cimenterie, le ciment et le four rotatif. Il a pour objectif de présenter les notions de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'une installation de production de ciment. Dans un premier temps nous aborderons des généralités sur la cimenterie notamment sa définition, les différents types de cimenteries, les matières premières utilisées ainsi que le procédé de fabrication du ciment. Ensuite, nous présenterons des généralités sur le ciment, en donnant sa définition, ses principaux constituants et les différents types de ciment existants. Enfin nous intéresserons au four rotatif, élément central de la production du clinker. Nous décrirons son principe de fonctionnement, sa structure (virole, bandage, galets, système d'entraînement et ventilateurs) ainsi que les phénomènes thermiques et les systèmes de protection interne tels que les briques réfractaires, le brûleur, la flamme et le croûtage.

Ce chapitre constitue ainsi une base essentielle pour la compréhension des échanges thermiques dans le four rotatif qui représentent l'objectif principal de ce mémoire.

## I.2. Généralité sur la cimenterie

### 1. Définition

La cimenterie est une usine industrielle spécialisée dans la production de ciment. Elle assure la transformation de la matière première (principalement le calcaire et l'argile) extraits des carrières en une poudre qui cuisant dans le four rotatif pour produire le clinker, puis le broyage avec des ajouts pour un liant adaptée aux différentes applications comme la production de béton, les routes, en raison de ses propriétés de résistance et de durabilité.[1]

### 2. Types des cimenteries

Les cimenteries sont différentes selon la méthode utilisée pour fabriquer le clinker. Il existe principalement deux types :

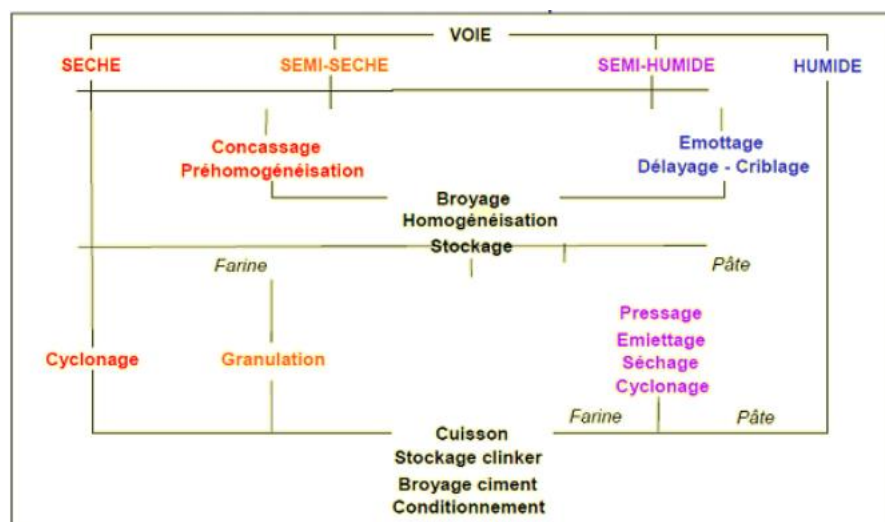


Figure I-1. Les principales méthodes de fabrication du ciment [6]

- Le procédé par voie sec : c'est la technique très utilisée aujourd'hui dans les installations industrielles de la production du ciment. Les matières premières sont broyées à sec dans des Broyeurs sécheurs, ce qui permet d'obtenir une poudre très fine appelée le « cru ».

Ensuite, cette poudre est chauffée dans le préchauffeur (pre-heater), puis elle entre dans le four rotatif pour former le clinker.[1]

- Le procédé par voie humide : Le procédé par voie humide est une méthode ancienne, peu utilisée dans les cimenteries modernes, car elle consomme beaucoup d'énergie. Dans ce procédé, les matières premières sont mélangées avec de l'eau pour former une pâte (contient de 30-40% l'eau), qui est ensuite cuite dans le four rotatif à haute température et une grande quantité de chaleur, car une partie importante de l'énergie est utilisée pour évaporer l'eau, contrairement au procédé par voie sèche qui consomme moins d'énergie.[6]

### 3. Matier premier du ciment

Le ciment préparé par la cuisson de la matière première qui est principalement de calcaire  $\text{CaCO}_3$  (70-80%), argile, fer, l'alumine etc...

Les matières premières sont extraites de carrières situées près des usines par dynamitage des montagnes ou par forage.

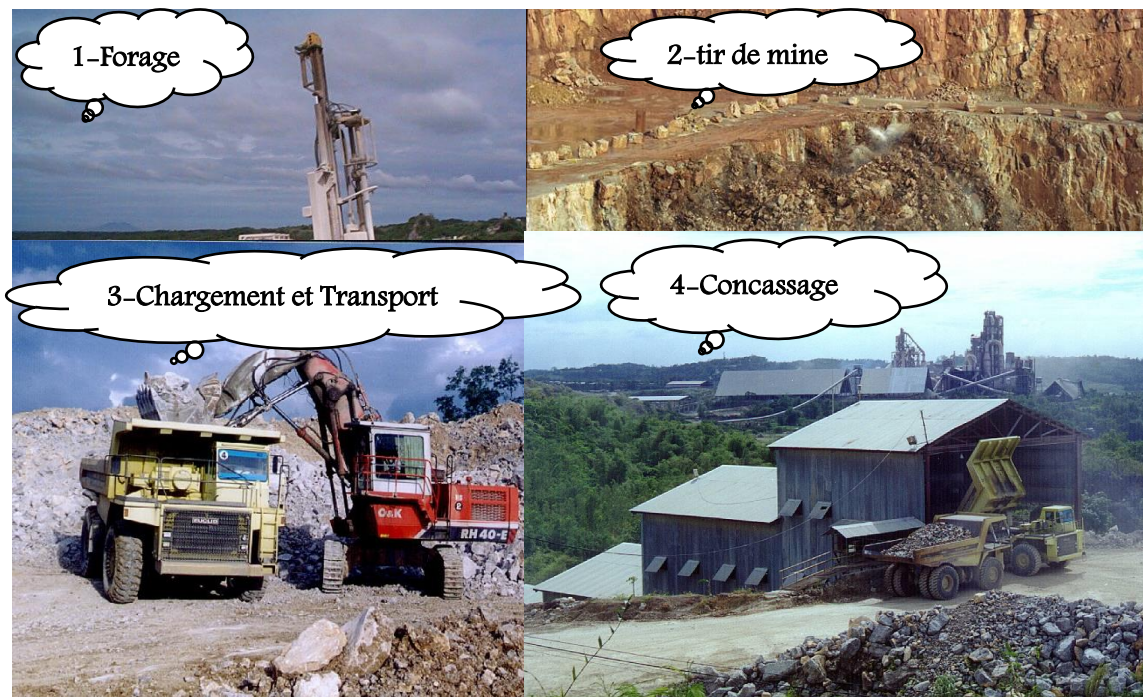


Figure I-2. Les opérations en carrière. [8]

### 4. Procède de fabrication du ciment

Après l'extraction des matières premières, elles sont transportées vers l'usine pour subir plusieurs étapes de préparation :

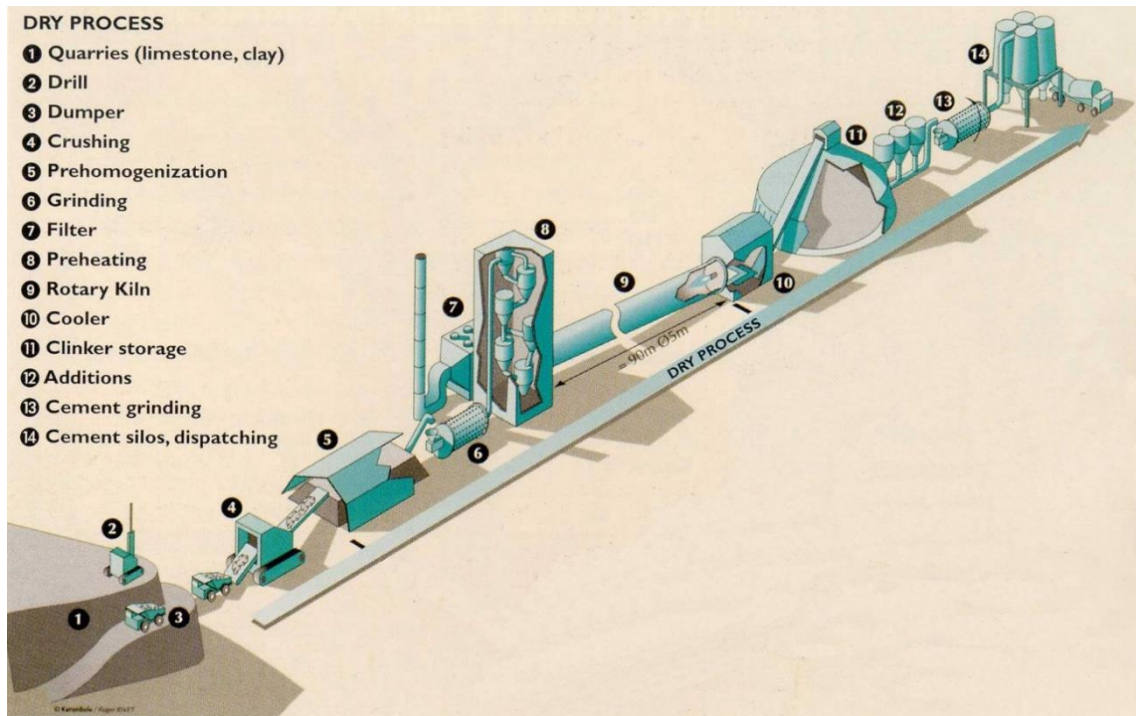


Figure I-3. Les principales étapes de la fabrication du ciment [9]

#### 4.1. Préparation de cru

1. Concassage : Les matières premières sont très grosses, elles sont donc cassées par le concassage pour devenir plus petits et faciliter les étapes de procéder suivantes



Figure I-4. Concassage de la matière premier dans une cimenterie

2. Pré-homogénéisation : Les matières premières ne présentent pas une composition chimique uniforme. Ainsi, lors de l'étape de pré-homogénéisation, elles sont mélangées afin d'obtenir une composition plus homogène. Cette opération est réalisée à l'aide de deux machines principales : le stacker (empileur), qui dépose les matières en couches, et le reclaimier, qui les récupère en assurant leur mélange.[1]



Figure I-5. Les machines de stacker et reclaimier

### 3. Séchage et broyage :

- Dans la voie sèche, les matières premières (calcaire, argile, etc.) contiennent de l'humidité. On utilise des gaz chauds provenant du four rotatif pour les sécher pendant le broyage. Cela permet d'éviter que la matière colle dans le broyeur et facilite le broyage.[7]
- Dans le principe de voie humide, les matières premières sont broyées en présence d'eau dans des broyeurs humides. Elles forment ensuite une pâte qui est introduite directement dans le four rotatif, où elle est séchée puis cuite pour former le clinker.[6]

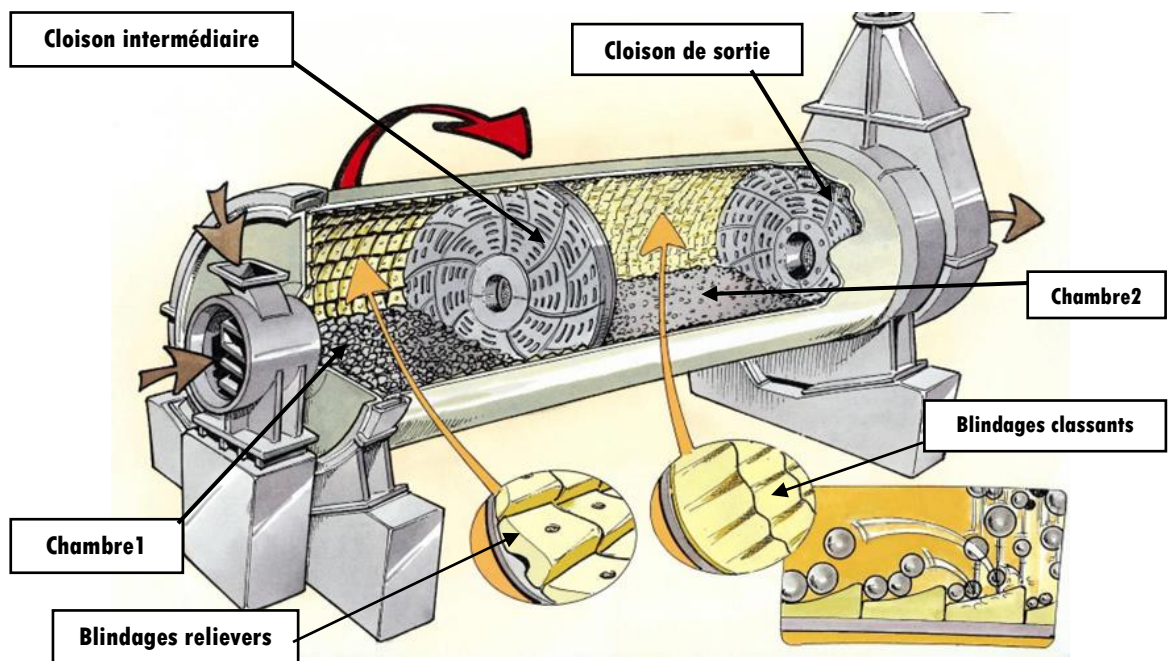


Figure I-6. Le broyeur à boulets [9]

## 4.2.Préchauffage

Est une étape importante qui permet de chauffer le cru avant sa cuisson dans le four rotatif. Il se fait dans une tour composée de 4 à 5 cyclones. Le cru descend de haut vers le bas, tandis que les gaz chauds provenant du four montent du bas vers le haut. Ainsi, le cru est chauffé progressivement grâce à un échange de chaleur. Pour améliorer l'efficacité d'un four rotatif.

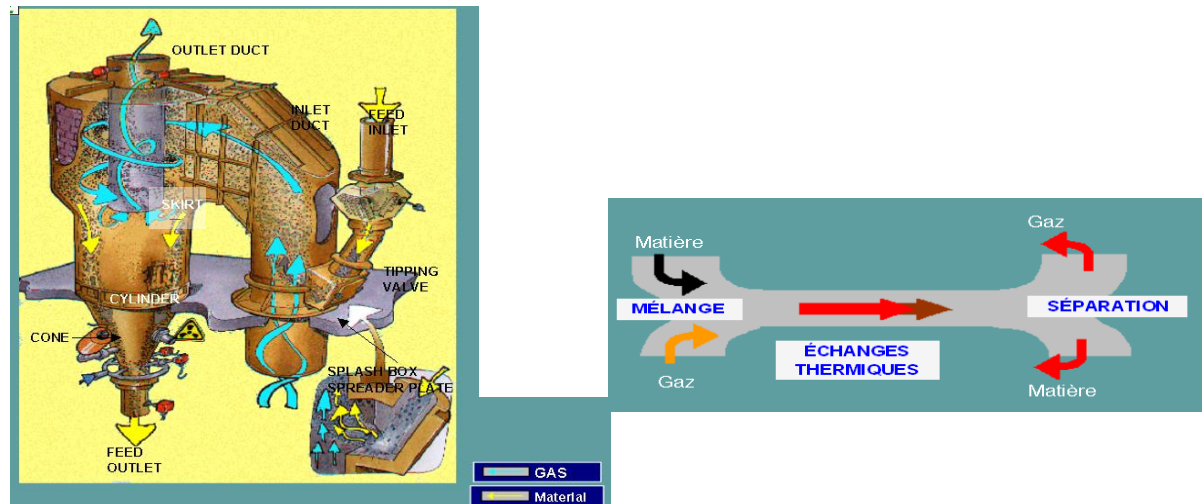


Figure I-7. Fonctionnement du cyclone de la tour de préchauffage [1]

## 4.3.Cuisson dans le four rotatif

La cuisson dans le four rotatif est une étape importante. Le cru entre dans le four et est chauffé à une température très élevée (1250 jusqu'à 1450°C). Avec la chaleur dans plusieurs zones, il se transforme en clinker.

## 4.4.Refroidissement du clinker

Après la sortie de four rotatif et fini l'étape de cuisson, le clinker est très chaud et se présente sous forme de granulés. Il est rapidement refroidi avec de l'air pour atteindre environ 100°C. Cette étape est importante car il permet de fixer sa composition chimique et améliore la qualité de ciment tout en refroidissant le clinker et en récupérant la chaleur pour la réutiliser dans la combustion du four. Il existe principalement des refroidisseurs à grille :

- Refroidisseur à grille mobile : le clinker avance sur une grille en mouvement avec de l'air soufflé par en dessous.
- Refroidisseur à grille fixe (à retournement) : le clinker avance grâce à des plaques, tandis que la grille reste fixe.
- Refroidisseur rotatif (air) [6]

Le clinker finalement stoker dans les silos.

### 4.4.1. Refroidisseur rotatif à eau (cas du ciment blanc)

Dans le cas de la production du ciment blanc, le refroidissement du clinker constitue une étape particulièrement critique. Contrairement au ciment gris où le refroidissement est généralement assuré par de l'air, le ciment blanc nécessite un refroidissement spécifique

afin de préserver sa pureté chimique et sa couleur (le point critique c'est la couleur blancheur, la réaction sensible. A haute température, certaines phases de clinker ex :  $C_3S$ ,  $C_2S$  deviennent instables lors du refroidissement. En présence d'oxygène (air), il existe un risque de formation de phases secondaires colorées, notamment liées à l'oxydation de certains éléments, ce qui peut entraîner une dégradation de la blancheur du produit final). Pour cette raison, on utilise un refroidisseur rotatif à eau, permettant un refroidissement indirect, homogène et mieux contrôlé.



Figure I-8. Refroidisseur rotatif de l'eau dans la production de ciment blanc.

- Système de régulation du refroidissement : Le refroidissement du clinker dans le refroidisseur rotatif à eau est contrôlé automatiquement grâce à un capteur de température placé à la sortie. Ce capteur mesure en continu la température du clinker après refroidissement (voir figure I-9). Si la température est correcte (clinker bien refroidi), le débit d'eau reste stable. En revanche, si la température est trop élevée (refroidissement insuffisant) le système augmente le débit d'eau afin d'améliorer le refroidissement. Ces informations sont transmises à une **station de régulation de l'eau** qui ajuste le débit d'eau de refroidissement en fonction de la température mesurée. Ainsi, le système fonctionne en boucle de contrôle : le capteur mesure, la station analyse, puis ajuste le débit d'eau pour garantir un refroidissement efficace et maintenir une température optimale du clinker.



Figure I-9. Variation de la température de sortie du clinker au cours du temps

#### 4.5. Broyage final du ciment

C'est la dernière étape dans le procédé de fabrication de ciment. Après le refroidissement le clinker est dur (comme des petites pierres), ensuite il est broyé avec une petite quantité de gypses pour ralentir la prise du ciment (éviter que le ciment durcisse trop vite). Ensuite, le ciment est stocké dans des silos avant son utilisation ou son transport.



Figure I-10. Silo de stockage de ciment finale

#### 4.6. Contrôle de qualité

Après la fabrication, le ciment est contrôlé dans un laboratoire pour vérifier qu'il respecte les normes et qu'il est adapté à l'utilisation en construction. Il est soumis plusieurs essais comme le temps de prise, la résistance mécanique et la stabilité.



Figure I-11. Laboratoire de contrôle (cure + tests du ciment/béton)

Les éprouvettes sont mises dans l'eau (figure I-11) pour bien durcir avant de tester leur résistance. Cette étape est importante pour vérifier la qualité du ciment.

### I.3. Généralité sur le ciment

#### 1. Définition

Le ciment est le matériau de base dans la composition du béton, Il se présente sous forme d'une poudre minérale très fin. Il est qualifié de liant hydraulique en raison de sa capacité à durcir au contact de l'eau, propriété essentielle pour les applications dans le domaine de la construction. Après durcissement, les liants hydrauliques conservent leur résistance mécanique ainsi que leur stabilité structurelle, même en présence d'eau.[2]

#### 2. Constituants principaux du ciment

Le mélange utilisé dans une cimenterie est généralement composé de 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Ces deux éléments sont d'abord broyés puis chauffés à très haute température dans le four rotatif pour produire le clinker. D'autre part le clinker est à nouveau broyé avec des ajouts qui améliorent le temps de prise, Résistance, Durabilité, Régularité, couleur, etc... [3]

En fonction des types de constituants ajoutés et de leurs proportions, on distingue plusieurs catégories principales de ciments.

#### 3. Types de ciment

Il existe plusieurs types de ciment, classés selon les normes en fonction de leur teneur en clinker et en ajouts minéraux.

- Le ciment Portland CEM I - norme NF EN 197-1 : contient de 95% de clinker au maximum et des ajouts secondaires en faible quantité 5% au minimum. La norme impose aussi des limites de résistance à la compression pour chaque essai, mesurée sur un mortier normal selon la NF EN 196-1. Sur les compositions chimiques est important pour la résistance du béton en milieu agressif donc le ciment doit contenir moins de 4 % de  $\text{SO}_3$  et moins de 0,10 % d'ions chlorure.

- Le ciment portland composée CEM II -norme NF EN 197 - 1 : sont fabrique à partir de minimum de 65% de clinker et 35% au totale de constituants tels que cendres volantes, fumée de silice pouzzolanes, laitiers de haut fourneau. Comme pour le CEM I, des limites de résistance minimal sont fixes a 2, 7 et 28 jours et aussi des limites pour la composition chimique (le  $\text{SO}_3$  doit être inferieur ou égale à 3.5%,4%,4.5%, ou 5% selon le type et la classe de ciment et les ions chlorure doivent être 0,10 % au maximum)  
Le CEM II généralement utilise pour les ouvrages massifs où l'élévation de température doit rester faible.
- Le ciment blanc : c'est ciment de types CEM I et CEM II et est conforme à la norme NF EN 197-1.il est obtenue grâce à l'utilisation de matière premier très pure comme le kaolin et le calcaire pauvres en oxyde de fer, par sa blancheur le ciment blanc met en valeur la couleur des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut aussi être colorée avec des pigments, ce qui permet d'obtenir une grande variété de teintes pour les bétons de structure.
- Le ciment comportant du laitier de haut fourneau - norme NF EN 197- 1 : se divisent en trois types selon la quantité de laitier. Il s'agit du ciment Portland au laitier (CEM II/A-S ou B-S), du ciment de haut fourneau (CEM III/A, B ou C) et du ciment composé (CEM V/A ou B). Les valeurs limites de résistance sont similaires à celles des CEM I. La teneur en  $\text{SO}_3$  doit être inférieure ou égale à 5 % pour le CEM III/C, 4,5 % pour les CEM III/A ou B, 4 % pour le CEM V (4,5 % pour les classes 42,5 R et 52,5) et entre 3,5 % et 4 % pour le CEM VI. Ce type de ciments est utilisé surtout pour les travaux difficiles ou on milieu progressif, ils sont aussi adaptés aux environnements agricoles.
- Le ciment prompt naturel CNP - norme NF P 15 - 314 : est fabriquer à très haut température (~1000-1200°C) pour chauffer le mélange de naturelle du calcaire et l'argile sa temps de prise est 4 minutes. La quantité de  $\text{SO}_3$  est limitée selon la classe du ciment : elle ne doit pas dépasser 3,0 % pour les classes 12,5 et 22,5, et 2,5 % pour la classe 5. Ce ciment est destiné à des travaux simples de bâtiment. Ils ne doivent pas être utilisés en milieux agressifs.
- Le ciment d'aluminates de calcium CA norme NF EN 14647 : Le ciment alumineux, appelé aussi ciment fondu ou ciment d'aluminates de calcium, est obtenu en chauffant jusqu'à fusion un mélange de calcaire et de bauxite. Ensuite, ce mélange est broyé finement, sans ajout de gypse, avec une finesse proche de celle du ciment Portland. Le temps de prise est 90 minutes au maximum, il est utilisé pour les travaux en mer et dans les eaux riches en sulfates. Sa forte chaleur d'hydratation liée à son durcissement rapide, permet de l'utiliser par temps froid (-10 °C). C'est aussi un ciment réfractaire, capable de résister à des températures élevées, jusqu'à environ 1 300 °C. [4]

## I.4. Généralités sur le four rotatif

### 1. Définition

Un four rotatif est un équipement industriel utilisé pour le traitement thermique des matériaux à haute température ( $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ). Il est formé d'un cylindre qui tourne, dans lequel circulent des gaz chauds, permettant de transformer les propriétés des matériaux [10]. La matière est introduite à une extrémité du four. Grâce à la rotation et à l'inclinaison du cylindre, elle se déplace progressivement à l'intérieur. Pendant ce déplacement, elle est chauffée par les gaz chauds, ce qui entraîne des transformations physiques et chimiques. À la sortie, le produit est récupéré puis refroidi selon le procédé. Dans le cas de la cimenterie, il assure la transformation du cru en clinker à travers différentes zones thermiques (préchauffage, décarbonatation et cuisson). Les échanges thermiques entre les gaz chauds et la matière solide permettent les réactions physico-chimiques nécessaires à la formation du produit final. [11]

Le four rotatif est utilisé dans plusieurs domaines, comme la fabrication du ciment, où il permet de transformer les matières premières en clinker. Il est également utilisé dans le traitement thermique des métaux, ainsi que dans les domaines de l'environnement et de la chimie, notamment pour l'incinération des déchets dangereux et la production de charbon actif.

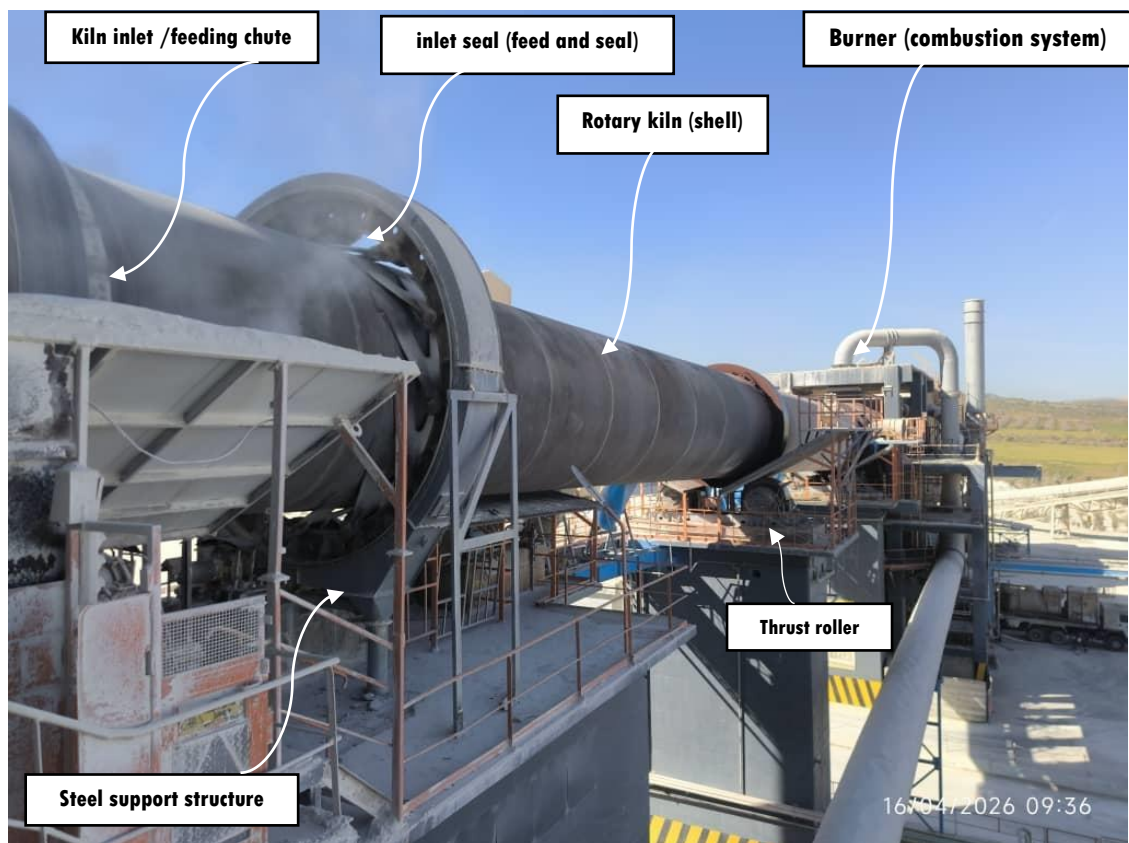


Figure I-12. Vue générale du four rotatif et de ses principaux composants.

### 2. Principe de fonctionnement

Le four rotatif est un long (varie entre 60 jusqu'à 110 mètres) soutenu par des galets regroupés en stations de roulement (figure 1.14) et cylindre incliné (entre 3 – 3.5%) vers

la sortie de clinker ce qui permet à la matière de se déplacer naturellement à l'intérieur de refroidisseur (figure1-12). Il tourne lentement, avec une vitesse généralement de 1.7 jusqu'à 4 tr/min.

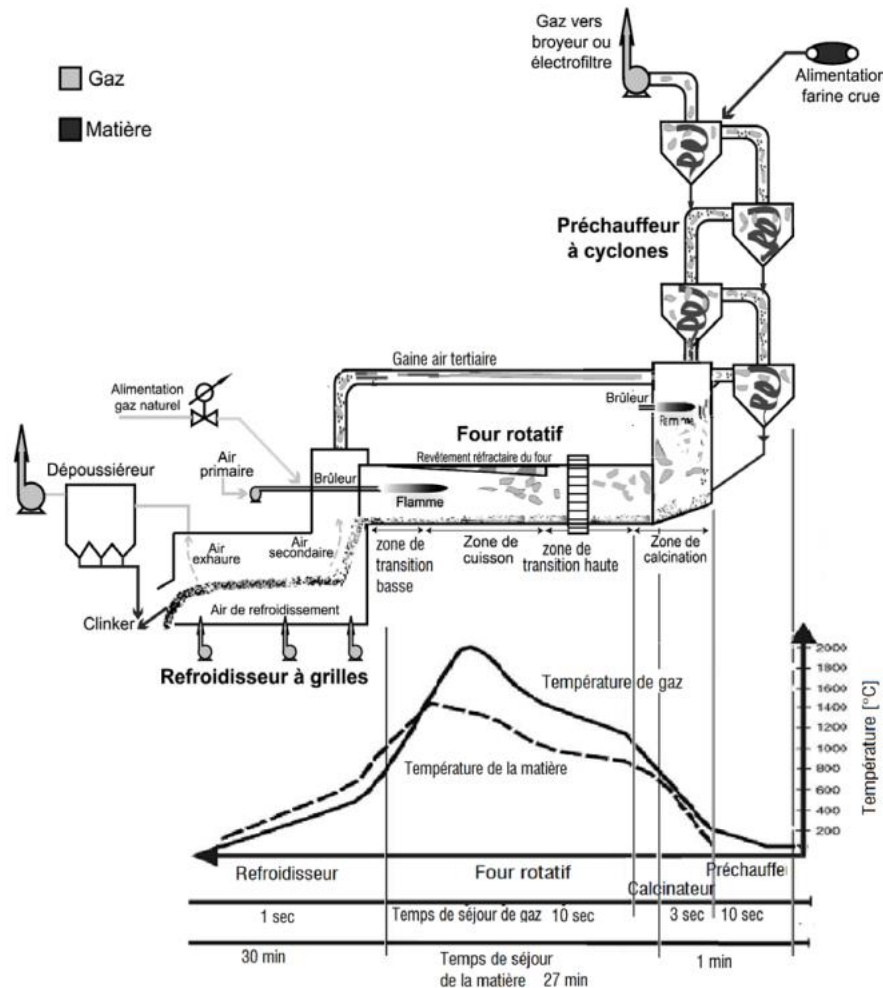


Figure I-13. Diagramme Température et durée de passage des gaz et des matières dans la cuisson [21]

La rotation du four peut se faire de deux façons : soit par un système avec une couronne dentée fixée sur la virole (figure I-19), soit directement par les galets, qui tournent de manière synchronisée pour réduire les contraintes mécaniques.[21]

Le four rotatif est divisé en plusieurs zones, chacune caractérisée par des conditions de température et de fonctionnement différentes :

- Zone de calcination ( $\sim 800^{\circ}\text{C}$ ) / Décarbonatation ( $800-1000^{\circ}\text{C}$ ) : où la matière sèche puis commence les réactions chimiques en raison de l'augmentation de la température, cette zone caractériser par une abrasion mécanique du briquetage due au glissement de la matière à l'entrée du four et la présence d'un bandage et de la couronne d'entraînement (figure1.16)

- Zone de transition (1000-1250°C) : début de la phase liquide de métiers en raison de augmentation progressivement de température. Dans cette zone le croutage est instable et les briques réfractaires subissent plusieurs contraintes : des chocs thermiques, une forte chaleur, des attaques chimiques et des efforts mécaniques.
- Zone de cuisson (1250 -1500°C) : c'est la zone la plus chaude du four ou la phase liquide du clinker, il caractérise par croutage stable, les contraintes chimiques (réactions d'oxydoréduction, infiltration des composants de la phase liquide du clinker) et les contraintes thermiques (chute de croutage).
- Zone de refroidissement (1200-1000°C) : ou le clinker commence à refroidir avant la sortie de four, cette zone caractérise par l'absence de croutage peut aussi présenter des déformations de la virole en raison des contraintes mécaniques et thermiques.[9]

### 3. Description du four rotatif

Le four rotatif est un cylindre métallique long (plus que 60 mètres) avec un diamètre de 4 jusqu'à 7 mètres, il est un peu incliné par rapport à l'horizontale (3 jusqu'à 3.5%) qui tourne sur lui-même.[12]

#### 3.1. Structure du four

Le four rotatif est composé de :

- **Une virole :**
- La virole du four rotatif est le cylindre métallique principal, il est généralement fabriqué en acier pour chaudière de haute qualité, souvent de type A42CP ou E26-3 [14], qui constitue la structure du four. Elle tourne autour de son axe et est légèrement inclinée pour permettre le déplacement de la matière à l'intérieur. La virole supporte le revêtement réfractaire interne, qui protège la structure métallique contre les hautes températures et l'usure. Elle repose sur des galets (rouleaux de support) et est entraînée en rotation par un système mécanique (moteur, couronne dentée). La virole joue donc un rôle essentiel en assurant à la fois le transport de la matière et le bon fonctionnement thermique du four.
- La virole est assemblée par soudage. Il existe des soudures longitudinales et circulaires. On utilise souvent le soudage à l'arc submergé (SAW) et le soudage manuel.[15]



Figure I-14. Virole d'un four rotatif

**Les ventilateurs du four :** Les ventilateurs du four rotatif sont installés à l'extérieur du four autour de la virole. À l'intérieur du four la température est très élevée (jusqu'à 1500 °C dans la zone de cuisson). Cette chaleur traverse le revêtement réfractaire ce qui peut rendre la virole très chaude et provoquer des risques de déformation ainsi que des problèmes mécaniques. Pour éviter ces problèmes, des ventilateurs sont placés le long du four surtout dans les zones les plus chaudes (zone de flamme et zone de cuisson). Ils soufflent de l'air froid sur la surface extérieure de la virole afin de réduire sa température et de protéger la structure métallique contre la surchauffe.



Figure I-15. Ventilateurs de refroidissement de la virole du four rotatif

- **Les bondages** : appelés aussi “tyres”, sont des couronnes en acier montées autour de la virole du four rotatif. Ils permettent de soutenir le four en reposant sur les galets et assurent une bonne répartition des charges. Les bandages jouent un rôle essentiel dans la stabilité du four et facilitent sa rotation tout en réduisant les contraintes mécaniques sur la virole. [15]

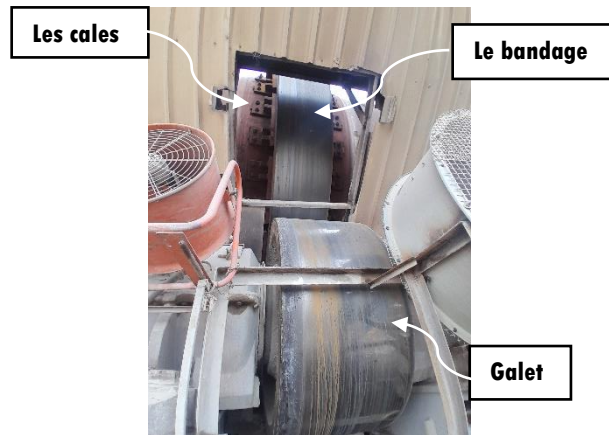


Figure I-16. Bandage et système de calage

- **Le galet** Le galet est un composant structural important qui supporte la charge radiale du four et assure la rotation de la virole. Il s'agit d'un rouleau sur lequel repose le bandage du four, permettant ainsi sa rotation. Comme illustré dans la figure [1.14], le galet est constitué de plusieurs éléments, notamment un axe, un coussinet, une bride et un système de lubrification.

Il existe plusieurs types des galets du four rotatif : on a galets porteurs (support rollers) ce sont les plus important qui supportent le poids du four et du bandage et permettre la rotation, galets de guidage (thrust rollers) Placés sur les côtés du bondage pour maintenir la position du four.[17]

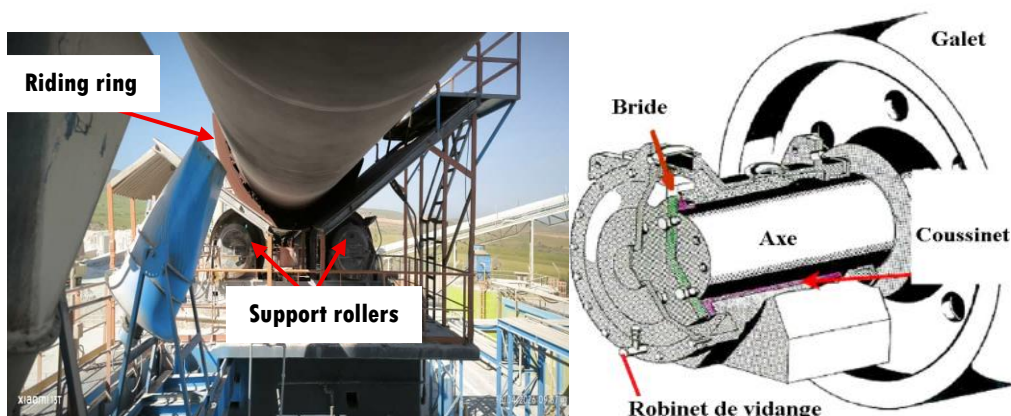


Figure I-17. Schéma d'un galet de support d'un four rotatif [19]

- **Système d'entraînement du four** : est l'ensemble des équipements mécaniques qui permettent de faire tourner le four autour de son axe

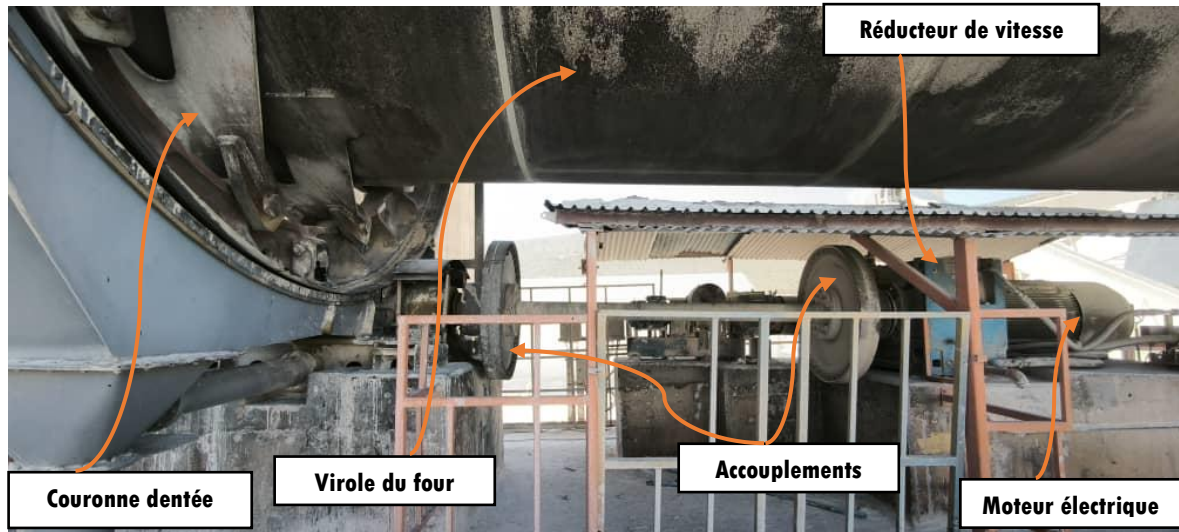


Figure I-18. Système d'entraînement du four rotatif d'une cimenterie.

Comme le montre la figure (I-18) les principaux équipements du système d'entraînement sont :

- Moteur électrique : Fournit la puissance nécessaire, souvent à vitesse variable pour contrôler le temps de séjour de la matière.
- Accouplement : ils divisent en deux types, accouplement haute vitesse entre le moteur et le réducteur qui absorber les vibrations et accouplement basse vitesse entre le réducteur et le pignon d'attaque (figure I-19) absorber des désalignements radiaux et angulaires beaucoup plus importants pour le mouvement du four. Utilisation de deux accouplements car la taille (très long plus de 70metres) du four plus la charge des matières.
- Réducteur de vitesse : réduire la haute vitesse du moteur pour adaptée la vitesse lente du four (1 jusqu'à 3 tr/min).
- Pignon : Petit engrenage entraîné par le réducteur.
- Couronne dentée : une grande engrenage cylindre placer et fixer autour de la virole du four figure (I-19), qui est entraîné par le pignon d'attaque pour assure la rotation du four.



Figure I-19. Couronne dentée d'un four rotatif

### 3.2. Phénomènes thermiques et protection interne du four rotatif

#### - Briques Réfractaires :

Les briques réfractaires constituent le revêtement interne du four rotatif et jouent un rôle essentiel dans la protection thermique surtout dans la zone de cuisson du clinker car est d'assurer isolation entre les gaz chaud à l'intérieur du four et la virole externe il permet la protection contre la déformation.

Les briques réfractaires classées selon leur composition chimique et leur résistance thermique, comme montre la figure (I-20) le rôle de réfractaire qui protéger la virole contre la contrainte de chaleur, les réactions chimiques et les efforts mécanique. Ils assurent également la protection des équipements de production (four, préchauffeur, refroidisseur, etc....) [9]

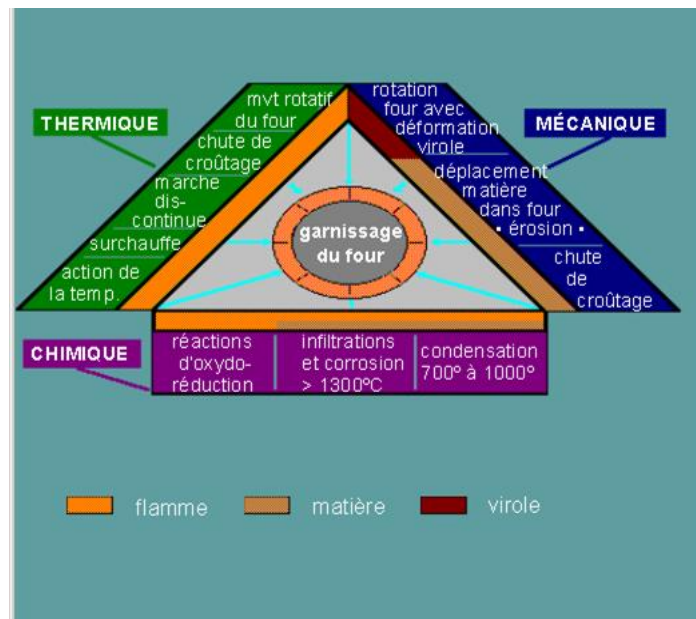


Figure I-20. Contraintes sur le garnissage du four [9]

- Chaque zone du four rotatif possède un type de réfractaire spécifique (tableau I-1). Les matériaux réfractaires se classent principalement par la résistance de chaleur, la nature chimique (conductivité thermique), niveaux de température et les contraintes mécaniques.

| Réfractaire                                     | Isolante                   | Alumine<br>75-85%          | Magnésie<br>- Chrome           | Magnésie<br>- Spinelle |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Applications                                    | Zone de<br>décarbonatation | Zone de<br>refroidissement | Zone de<br>cuisson /transition | Zone de<br>cuisson     |
| Conductivité<br>thermique (W/m<br>– K (1000°C)) | 0.6                        | 2.1                        | 2.6                            | 2.7                    |
| Porosité<br>apparent (%)                        | 25 – 35                    | 17 – 19                    | 17 - 19                        | 17 - 19                |
| Resist-<br>compression à<br>froid(N/mm2)        | 20                         | 85                         | 50                             | 50                     |
| Réfractarité °C                                 | 1350                       | 1600                       | 1550                           | 1700                   |

Tableau I-1. Propriétés des différents types de briques réfractaires [9]

- La décision de remplacer les briques réfractaires dans un four rotatif ne dépend pas d'un seul critère mais de plusieurs facteurs comme la température de virole, la formation du croûtage, ainsi que le types de remplacement du brique (par exemple au niveau de couronne ou de bondage), également les conditions du fonctionnement du four et la zone jouent un rôle important. Dans la zone transition du four les briques doivent souvent être remplacées chaque année car elles sont attaquées par les réactions chimiques de cru donc pour décider du remplacement il faut surtout regarder l'infiltration des briques et pas seulement leur épaisseur car elles peuvent être abîmées à l'intérieur même si elles semblent encore en bon état.[9]

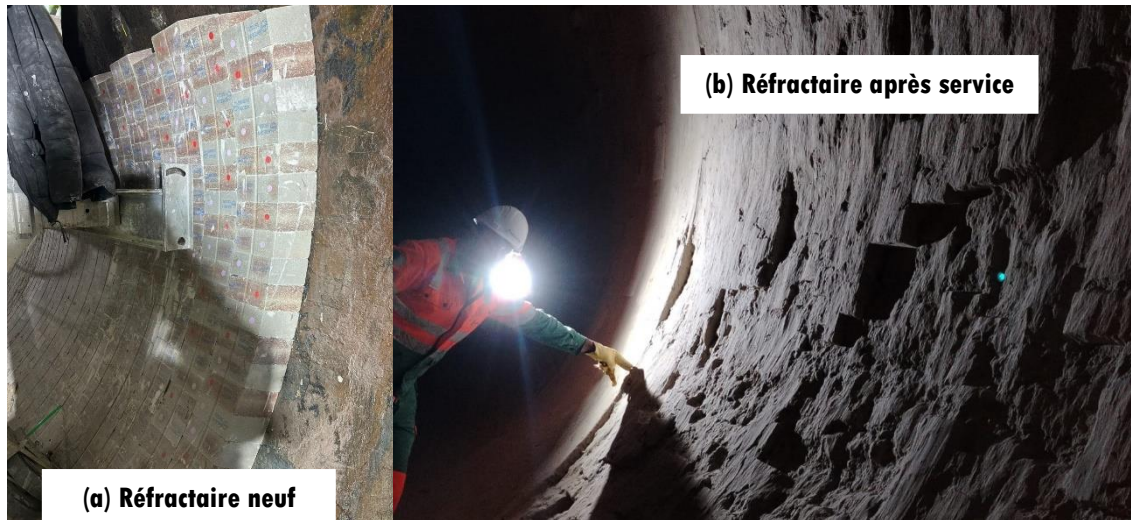


Figure I-21. L'état des briques réfractaires avant et après fonctionnement du four

- **Le Bruleur** : est un équipement qui assure la production de la flamme et la génération de la chaleur dans le four. Il est placé à l'extrémité du four. Il sert à injecter le combustible et à le brûler pour produire la chaleur nécessaire. Cette chaleur permet de traiter les matériaux comme le ciment ou les minéraux. [20]

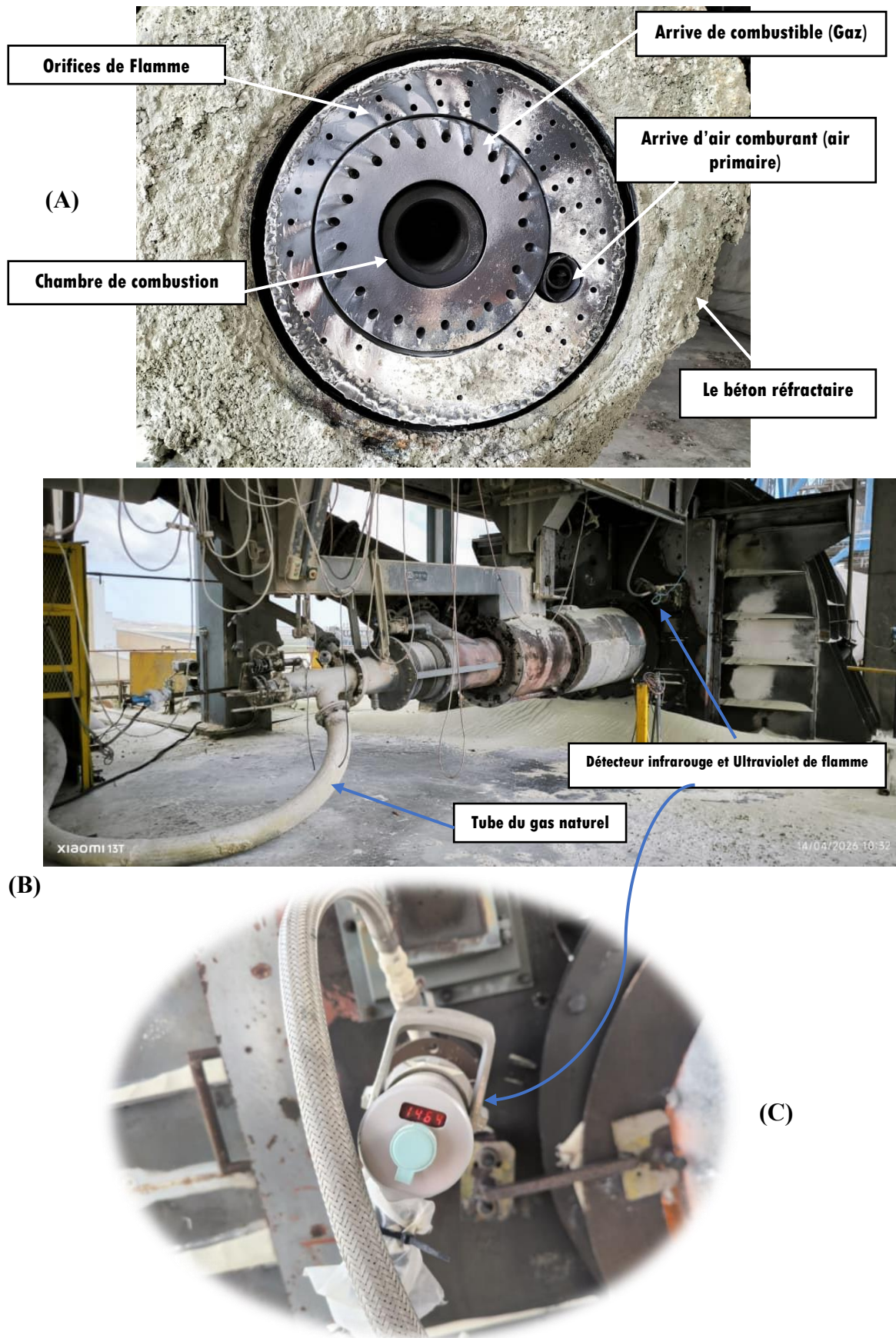
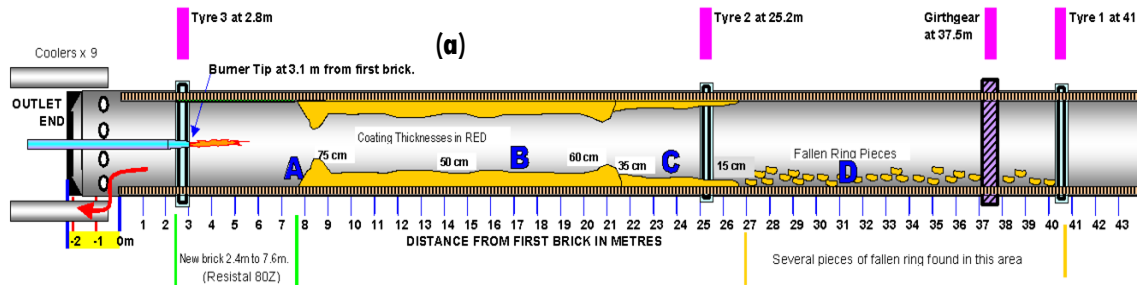


Figure I-22. (A)Composition de bruleur de four rotatif. (B)corps de bruleur

**- La flamme :**

La flamme est la manifestation visible de la combustion, un phénomène très ancien connu par l'homme depuis des centaines de milliers d'années. Elle apparaît lorsqu'un combustible réagit avec un comburant généralement l'oxygène de l'air en libérant de la chaleur et de la lumière. La flamme résulte en réalité de plusieurs phénomènes qui agissent en même temps. Il y a d'abord les réactions chimiques de combustion qui produisent de l'énergie, Ensuite cette énergie se diffuse sous forme de chaleur vers l'environnement ce qui entretient la réaction. Enfin des transferts de matière assurent l'arrivée des gaz réactifs dans la zone de combustion et l'évacuation des produits formés. [22]

- Le croûtage :** C'est une masse solide ou semi-liquide qui se forme dans la zone de cuisson grâce de la température élevés des Gas agissant comme une couche isolante. Elle protège les briques réfractaires de la chaleur extrême et de l'usure mécanique, augmentant ainsi leur durée de vie.[23]



| SAMPLE | % SiO <sub>2</sub> | % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % CaO | % MgO | % SO <sub>3</sub> | % K <sub>2</sub> O | % Na <sub>2</sub> O | % Cl <sup>-</sup> |
|--------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| A      | 22,3               | 6,34                             | 2,92                             | 62,84 | 0,92  | 2,46              | 0,33               | 0,06                | 0,08              |
| B      | 20,5               | 4,82                             | 2,68                             | 59,10 | 0,78  | 7,78              | 0,92               | 0,10                | 0,05              |
| C      | 22,5               | 5,61                             | 2,94                             | 86,11 | 0,90  | 8,86              | 0,95               | 0,07                | 0,03              |
| D      | 21,1               | 4,78                             | 2,62                             | 56,00 | 0,77  | 14,00             | 0,91               | 0,08                | 0,71              |
| E      | 16,9               | 1,97                             | 2,18                             | 64,10 | 0,44  | 5,37              | 0,91               | 0,08                | 0,03              |

(b)

Figure I-23. (a)Un profil physique du réfractaires d'un four rotatif (épaisseur de croutage). (b) une analyse chimique des matériaux constituant du réfractaires.[9]

**I.5. Conclusion :**

On conclut que le four rotatif équipement centrale dans la fabrication de ciment par la cuisson de clinker. Nous avons décrit les éléments principaux du four ainsi que son fonctionnement général et les phénomènes liés à la chaleur donc ce chapitre c'est une base pour mieux comprendre la suite du travail sur l'étude du bilan thermique et énergétique du four rotatif



**CHAPITRE II : MODÉLISATION  
MATHÉMATIQUE DU BILAN THERMIQUE  
ET ÉNERGÉTIQUE**

## **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous développons la modélisation du comportement thermique du four rotatif de cimenterie à travers une approche basée sur les mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur. L'objectif est de représenter de manière analytique les différents flux thermiques intervenant dans le système afin de mieux comprendre la répartition et les échanges d'énergie au sein du four.

Le four rotatif constitue un système thermodynamique complexe dans lequel coexistent plusieurs modes de transfert de chaleur, notamment la convection, le rayonnement et la conduction, en interaction avec les flux de matière et de gaz.

Ainsi, ce chapitre présente dans un premier temps les équations et relations mathématiques décrivant les principaux mécanismes de transfert de chaleur dans le four. Ensuite, un bilan énergétique global du système est établi, en identifiant les différentes entrées et sorties d'énergie, telles que l'énergie apportée par les combustibles et l'air de combustion, ainsi que les pertes thermiques liées aux gaz d'échappement, au clinker, aux parois du four et aux autres sources de dissipation. Cette modélisation constitue une étape fondamentale pour analyser l'efficacité énergétique du four rotatif et pour identifier les zones de pertes thermiques, en vue d'une éventuelle optimisation du procédé de cuisson du clinker.

## **II.2. Recherche bibliographique**

Cette recherche bibliographique présente quelques études sur les fours rotatifs, notamment sur le transfert de chaleur et la consommation d'énergie, qui nous ont aidés à mieux comprendre le sujet et à réaliser notre travail :

Les travaux dans l'article de Mujumdar et al [24]. Ont d'abord proposé un modèle global du four rotatif intégrant les phénomènes de combustion, de transfert de chaleur et les possibilités de réduction de la consommation énergétique.

Dans la continuité de ces recherches, les mêmes auteurs [25], ont ensuite développé un modèle plus détaillé basé sur une approche unidimensionnelle des réactions et des transferts thermiques dans le lit de matière afin de mieux analyser l'influence des paramètres de fonctionnement sur les performances du four.

Dans leur étude, Engin et Ari [26] ont réalisé une analyse énergétique d'un four rotatif de cimenterie en Turquie. Les résultats montrent qu'environ 40 % de l'énergie est perdue principalement par les gaz chauds, le refroidisseur et la surface du four. Les auteurs proposent des solutions de récupération de chaleur permettant de récupérer jusqu'à 15,6 % de l'énergie totale.

Gorog, Adams et Brimacombe [27] ont développé un modèle mathématique de la zone de flamme dans un four rotatif. Le modèle permet de prédire les profils de température et le transfert de chaleur vers le lit de matière et les parois. Les résultats montrent que des paramètres comme le type de combustible, la température de l'air secondaire et l'enrichissement en oxygène influencent fortement la longueur de la flamme et l'efficacité du transfert de chaleur.

Barr et al [28] ont développé un modèle de transfert de chaleur dans un four rotatif, validé par des essais sur un four pilote. Les résultats montrent que le transfert de chaleur dépend fortement de la position dans le four et du type de matériau (inerte ou réactif). Ils ont aussi

observé que la réaction de calcination augmente fortement le transfert de chaleur vers le lit de matière.

Dans la deuxième partie, Barr [29] ont développé un modèle unifié de transfert de chaleur dans la section transversale d'un four rotatif. Le modèle combine la conduction dans la paroi, le rayonnement dans les gaz et les échanges thermiques avec le lit de matière. Il a été validé sur un four pilote avec différents matériaux.

Xiao et al [30]. Ont développé un modèle mathématique pour simuler le fonctionnement d'un four rotatif et la distribution des variables le long de sa longueur. Le modèle est basé sur les bilans de masse et de chaleur en régime stationnaire, en tenant compte des cinétiques des réactions. Il a été validé sur plusieurs fours pilotes et industriels avec de bons résultats.

Etude de Boateng et Barr [31] ont développé un modèle thermique du four rotatif en intégrant le transfert de chaleur vers le lit de matière. Le modèle combine une approche unidimensionnelle avec une représentation bidimensionnelle du lit, ce qui permet une meilleure estimation des températures dans le four. Il améliore la simulation des échanges thermiques entre les gaz, la paroi et le matériau. Cette approche permet une meilleure compréhension du comportement thermique du four rotatif.

Dans leur étude, Khurana, Banerjee et Gaitonde [32] ont réalisé un bilan énergétique d'une cimenterie afin d'analyser les possibilités de cogénération. Les résultats montrent qu'environ 35 % de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans les flux de déchets. Les auteurs proposent un système de récupération de chaleur permettant de produire de l'électricité à partir des gaz chauds. Cette solution améliore l'efficacité énergétique globale du procédé et réduit la consommation d'énergie primaire

Ortiz et al [33]. Ont analysé les performances d'un four rotatif pilote utiliser pour la fabrication de charbon activé à l'aide d'un modèle mathématique stationnaire. Le modèle permet de prédire les profils de température et les variations de masse dans le four. Les résultats montrent que le temps de séjour et les débits de gaz et de vapeur influencent fortement le procédé d'activation.

Li et al [34]. Ont développé un modèle mathématique de transfert de chaleur dans un four rotatif en tenant compte de l'effet de la rotation sur les coefficients d'échange thermique. Le modèle unidimensionnel permet de prédire les profils de température et les flux de chaleur dans le four. Les résultats sont en bon accord avec les données expérimentales et expliquent le couplage thermique entre le lit de matière et la paroi.

Herz, Sonavane et Specht [35] ont analysé les mécanismes locaux de transfert de chaleur dans les fours rotatifs à flamme directe. Ils ont étudié expérimentalement le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi et le lit de matière à l'aide d'un four pilote. Les résultats montrent que la vitesse de rotation, le taux de remplissage et les propriétés des matériaux influencent fortement le transfert de chaleur.

Thammavong et al [36]. Ont développé un dispositif expérimental pour analyser les échanges thermiques dans un four rotatif chauffé extérieurement. L'installation permet d'étudier l'influence de paramètres comme le débit de solide et la vitesse de rotation sur le transfert de chaleur. Les résultats montrent que ces paramètres affectent directement le coefficient d'échange entre le solide et la paroi.

Yang et al [37]. Ont développé un modèle mathématique pour simuler le transfert de chaleur dans un four rotatif d'alumine. Le modèle prend en compte la convection, le rayonnement, la conduction ainsi que les changements de phase et les réactions chimiques. Les résultats montrent une bonne correspondance avec les températures mesurées sur la paroi du four. Ce modèle permet d'améliorer la compréhension et l'optimisation des performances du four rotatif.

Moussi et al [38]. Ont développé un modèle d'un four rotatif de cimenterie basé sur les bilans de matière et d'énergie couplés aux cinétiques des réactions. Le four est représenté par une succession de réacteurs adaptés aux différentes zones du procédé. Le modèle permet de prédire les profils de température et la composition des gaz et des solides le long du four. Les résultats montrent une bonne concordance avec les données expérimentales et mettent en évidence l'importance des interactions entre réactions chimiques et transferts thermiques.

Mungyeke-Bisulandu et al [39]. Ont analysé les paramètres influençant la consommation énergétique d'un four rotatif cimentier et proposé des solutions d'optimisation. Les résultats montrent que les pertes thermiques sont principalement localisées dans les zones de décarbonatation et de cuisson. L'étude met en évidence une forte production d'entropie et une efficacité énergétique réelle plus faible que celle estimée par le rendement global. Les auteurs recommandent notamment l'utilisation de réfractaires à faible conductivité thermique pour réduire les pertes d'énergie.

Dans leur étude, Nhuchhen, Basu et Acharya [40] ont analysé le transfert de chaleur dans un réacteur rotatif chauffé indirectement. Ils ont développé un modèle pour estimer le coefficient global d'échange thermique entre la paroi et les solides en mouvement. Les résultats montrent une bonne concordance avec les données expérimentales disponibles. Cette étude contribue à améliorer la conception et la modélisation des réacteurs rotatifs.

Shahin et al [41]. Ont réalisé une analyse énergétique d'un procédé de production de chaux comprenant le préchauffeur, le four rotatif et le refroidisseur. Le modèle développé, basé sur les bilans d'énergie et les réactions chimiques, a été validé par des données expérimentales. Les résultats montrent que l'augmentation du temps de séjour et la réduction de l'excès d'air permettent de diminuer la consommation de combustible.

Njeng et al [42]. Ont analysé le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi et le solide dans un four rotatif muni de releveurs. Des essais expérimentaux ont été réalisés sur un four pilote afin de mesurer les profils de température et déterminer ce coefficient par bilan énergétique. Les résultats montrent que la vitesse de rotation, le taux de remplissage et la géométrie des releveurs influencent fortement le transfert de chaleur.

Gunnarsson et al [43]. Ont développé un modèle tridimensionnel du transfert radiatif dans un four rotatif avec présence de lit de matière. Le modèle prend en compte les échanges de chaleur par rayonnement, convection et conduction, ainsi que les réactions exothermiques dans le lit. Les résultats montrent une bonne concordance avec les mesures industrielles, avec des erreurs inférieures à 11 %.

Fierro et al [44]. Ont évalué la récupération de la chaleur perdue par rayonnement sur la surface d'un four rotatif à l'aide de simulations CFD et de bilans thermo économiques. Les résultats montrent qu'un système d'absorption peut récupérer jusqu'à 4980 kW de chaleur, permettant la production d'environ 864 kW d'électricité via un cycle ORC.

L'étude met en évidence une amélioration significative de l'efficacité énergétique et une viabilité économique dépendant du prix de l'électricité

Mungyeko Bisulandu et Huchet [45] ont présenté une synthèse des travaux sur la modélisation et les mécanismes physiques des fours rotatifs. Les auteurs analysent les phénomènes de transfert de chaleur, de transport de matière et de réactions thermochimiques. Ils montrent qu'il n'existe pas encore de modèle unique complet, notamment pour le temps de séjour et certains transferts convectifs et conductifs. Cette revue met en évidence les principaux axes de recherche pour améliorer la modélisation et l'optimisation des fours rotatifs.

### **II.3. Le flux de chaleur dans four rotatif**

La finalité d'un four est le transfert de l'énergie thermique à une matière pour en élever la température avec un procédé direct et satisfaire un processus de transformation. La source de chaleur qui est la flamme de diffusion issue d'un brûleur permet les trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection et conduction), la plupart du temps simultanément mais dans des proportions très variables.

Le flux de chaleur dans un four rotatif joue un rôle essentiel dans le procédé de fabrication du clinker, car il influence directement la qualité du produit obtenu, la consommation énergétique du four ainsi que les émissions polluantes générées pendant le fonctionnement. Une bonne maîtrise des échanges thermiques et une analyse précise du flux de chaleur permettent d'améliorer les performances du four, d'optimiser l'utilisation de l'énergie, de diminuer les coûts d'exploitation et de limiter les impacts environnementaux.[21]

#### **II.3.1. Analyse des mécanismes de transfert de chaleur dans le four rotatif**

Les mécanismes de transferts de chaleur sont fortement liés au gradient de température. Dans les fours rotatifs, les transferts de chaleur ont lieu principalement dans la direction transversale et les transferts axiaux peuvent être négligés. En effet, le gradient de température dans la direction axiale du four reste faible. Les transferts de chaleur dans les fours rotatifs impliquent principalement des transferts convectifs et radiatifs entre les matériaux, les gaz, et la paroi. Ainsi, le calcul des échanges de chaleur implique une connaissance des surfaces de transfert, des propriétés convectives et radiatives, et plus particulièrement des coefficients de transfert et de l'émissivité des matériaux solides, de la paroi et des gaz. [47]

##### **1. Transfert de chaleur par convection**

Les transferts de chaleur par convection résultent d'une différence de température. L'étude des transferts de chaleur par convection permet de caractériser les échanges entre un fluide et un solide. Quel que soit le régime d'écoulement du fluide, le taux de transfert de chaleur entre une surface à température  $T_p$  et un fluide à température  $T_f$ , le flux de chaleur transmis est établi par la loi de Newton [47] :

$$\phi = h * A(T_p - T_f) \quad (\text{II.1})$$

## 2. Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est le mode déterminant dans l'échange cyclique entre la paroi interne et le talus de matière. C'est le transfert de chaleur à l'intérieur de la matière qui limite la vitesse de chauffage de la matière et détermine son temps de séjour dans le four. La conduction joue aussi un rôle important pour les parois des fours, puisque c'est elle qui conditionne, en partie les pertes thermiques du four. La loi de Fourier sur la conduction thermique est donc définie comme suit [21] :

$$\Phi = k_p \left( \frac{T_1 - T_2}{e_{1-2}} \right) \quad (\text{II.2})$$

## 3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est un mode d'échange de chaleur par émission et absorption de radiation électromagnétique. La détermination des flux de chaleur échangés par rayonnement nécessite la connaissance des propriétés radiatives, et plus particulièrement les émissivités, des solides, de la paroi du tambour et des gaz ainsi que le choix d'un modèle de rayonnement [47] :

$$\phi = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (\text{II.3})$$

### II.3.2. Etude du bilan thermique

Les bilans thermiques permettent de prendre en compte les enthalpies des réactions et les différents échanges thermiques entre solide, gaz et paroi du four (FigII-1). Afin de simplifier le calcul, les chaleurs spécifiques et les débits massiques du solide (S) et du gaz (G) sont considérés constants.[38]

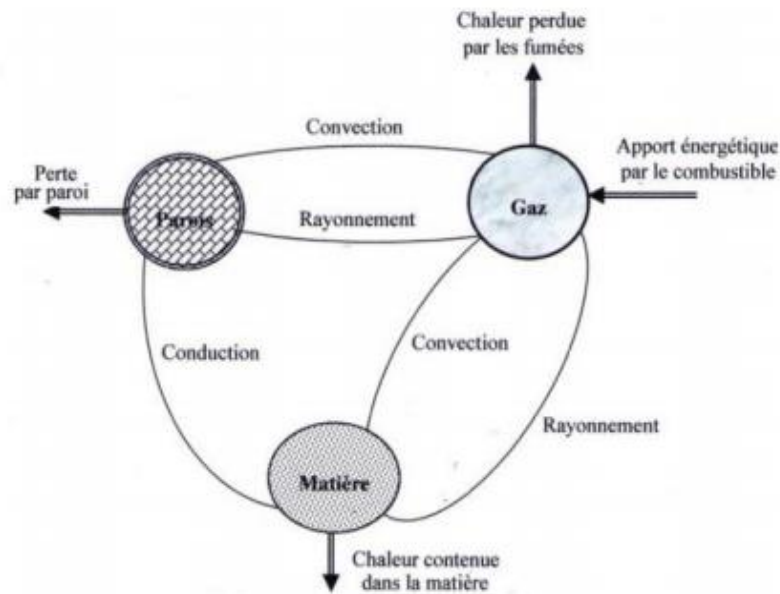


Figure II- 1.Mode de transfert thermique du four rotatif [38]

### II.3.3. Modelé Mathématique

La plupart des études sur les fours rotatifs à clinker utilisent plusieurs approches de modélisation. La première approche utilise le modèle unidimensionnel qui décrit les réactions solide-solide à l'intérieur du four à ciment, en supposant un régime quasi-stationnaire. Le modèle permet d'analyser l'influence des principaux paramètres de fonctionnement et de conception sur la consommation énergétique du four. La seconde approche propose et évalue une solution pratique utilisant un caisson secondaire pour réduire la consommation énergétique des fours rotatifs à ciment.

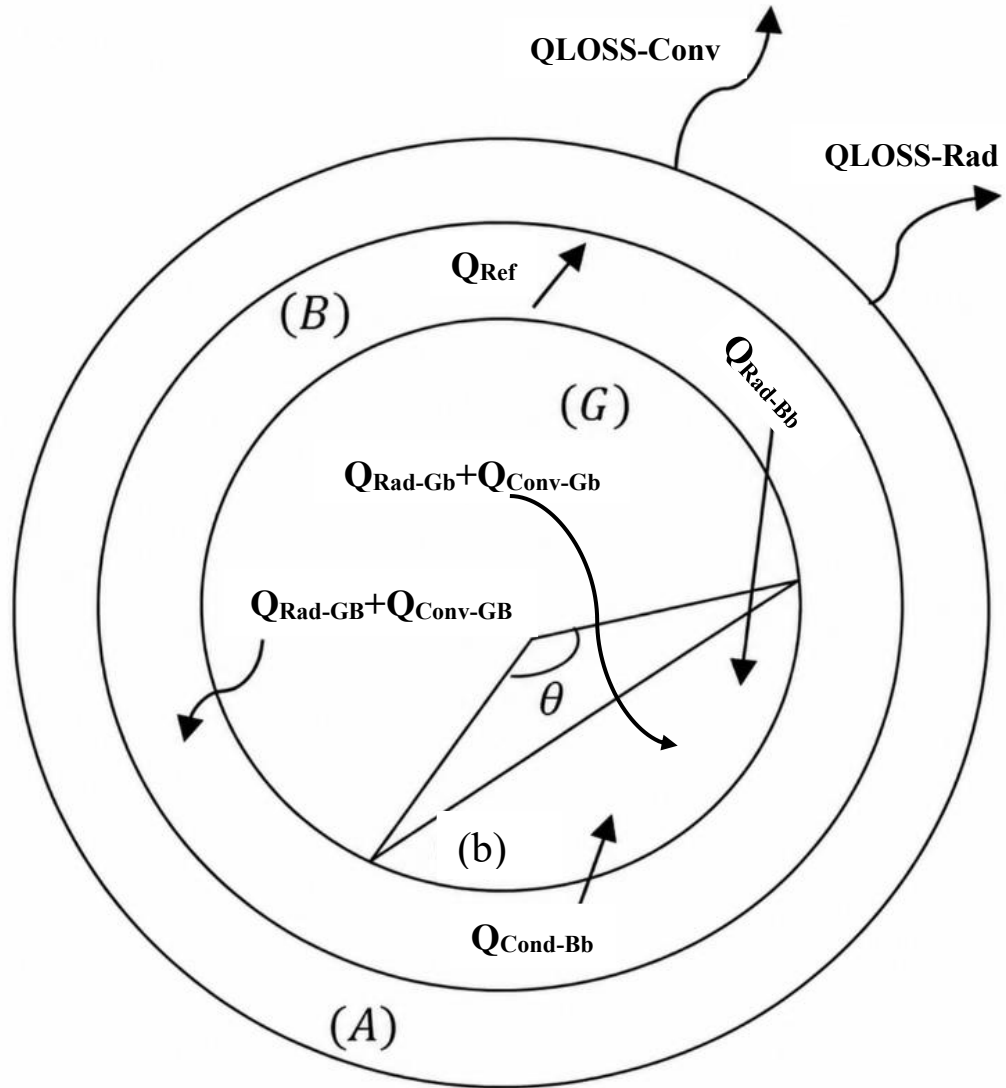


Figure II- 2.Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale (condition stationnaire) [48].

### 1. Le transfert de chaleur de GAZ « G » et les briques réfractaires (paroi interne) « B » ( $Q_{RGB}+Q_{CGB}$ )

#### A. Par convection

Le transfert de chaleur a lieu lorsque les gaz chauds circulent le long de la surface des briques réfractaires à l'intérieur du four rotatif. En se déplaçant, ces gaz transmettent leur énergie thermique aux parois du four, ce qui favorise un chauffage homogène et continu des briques réfractaires. L'équation correspondante est donnée par [49] :

$$Q_{Conv-GB} = h_{GB} A_{GB} (T_G - T_B) \quad (II.4)$$

$A_{GB}$  l'aire d'échange entre le gaz et les briques réfractaires, elle se calcule par des considérations géométriques et est généralement égale :

$$A_{GB} = r_B(2\pi - \theta) \quad (II.5)$$

Qui est l'aire d'échange entre le mur intérieur et le solide rapportée par  $viola$  et al [50].  $h_{GB}$  a été calculé par l'expression de Tscheng et Watkinson [51] qui à travers une étude expérimentale, ont proposé la relation suivante :

$$h_{GB} = 1.54 \frac{K_G}{D_e} R_{eD}^{0.575} R_{ew}^{-0.292} \quad (II.6)$$

Où  $k_G$  a été calculée par l'expression [49] :

$$k_G = -7.494 \times 10^{-3} + 1.709 \times 10^{-4} T_G - 2.377 \times 10^{-7} T_G^2 + 2.202 \times 10^{-10} T_G^3 - 9.463 \times 10^{-14} T_G^4 + 1.581 \times 10^{-17} T_G^5 \quad (II.7)$$

Et  $D_e$ ,  $R_{eD}$ ,  $R_{ew}$  sont calculées par les expressions suivantes [49] :

$$D_e = \frac{0.5 \times D(2\pi - \theta + \sin \theta)}{(\pi - (\frac{\theta}{2}) + \sin(\frac{\theta}{2}))} \quad (II.8)$$

$$R_{eD} = \frac{\rho_G \times v_g \times D_e}{\mu_g} \quad (II.9)$$

$$R_{ew} = \frac{\rho_G \times \omega \times D_e^2}{\mu_g} \quad (II.10)$$

Lorsque l'écoulement est turbulent avec la condition suivante  $10 < \frac{L}{D} < 400$  telle que,  $L$  (la longueur de four), et  $D$  (diamètre de four) la relation de coefficient de convection ( $h_{GB}$ ) de vient, selon l'expression de Kreith et Black [52] :

$$h_{GB} = 0.036 \frac{k_G}{D_e} R_e^{0.8} P_r^{0.33} \left(\frac{D}{L}\right) \quad (II.11)$$

## B. Par Rayonnement

Le flux de chaleur provient des gaz chauds qui cèdent leur énergie thermique aux briques réfractaires situées à l'intérieur du four. Ce transfert thermique joue un rôle important dans le bilan thermique global ainsi que dans l'efficacité du procédé.

Nous avons quelques expressions simplifiées de  $h_{GB}$  qui engendrent des erreurs non négligeables, Celle de Lyons et al. (1962) [53] :

$$h_{Rad-GB} = 2 \sigma \varepsilon_G \varepsilon_B (T_G^3 + T_B^3) \quad (II.12)$$

$$\text{Et : } h_{Rad-GB} = \sigma \varepsilon_G \frac{T_G^4 - T_B^4}{T_G - T_B} \quad (II.13)$$

Par ailleurs Ketslakh et Tsibin (1978) ont proposé une expression plus précise à savoir [54] :

$$h_{GB} = \sigma \Psi \frac{T_G^4 - T_B^4}{T_G - T_B} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } \Psi = \varepsilon_G \varepsilon_B [1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_b)] \Omega \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Où : } \Phi = \frac{\sin(\pi - \theta/2)}{\pi - \theta/2} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Et : } \Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B) [1 - \Phi(1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_b))]} \quad (\text{II.17})$$

Toutefois, Hottel et Sarofim (1967) [55] proposent une expression également précise de la quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur lorsque  $\varepsilon_B > 0.8$

$$Q_{Rad-GB} = \sigma A_{GB} (\varepsilon_B + 1) \frac{\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_G^4}{2} \quad (\text{II.18})$$

## 2. Transfert de chaleur entre le gaz « G » et le solide (lit de matière « b ») ( $Q_{RgB} + Q_{CGb}$ )

### A. Par convection

L'équation qui représente cette quantité est de la forme [48] :

$$Q_{Conv-Gb} = h_{Gb} A_{Gb} (T_G - T_b) \quad (\text{II.19})$$

Avec  $A_{Gb}$  l'aire d'échange entre le gaz et le solide. Elle se calcule par des considérations géométriques et est généralement (Perron, 1989) [56] ( $A_{conv-Gb} = A_{rad-Gb}$ ) :

$$A_{conv-Gb} = 2r_B \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{II.20})$$

On considère également ici les travaux de Tscheng et Watkinson (1979) [57] basés sur des travaux expérimentaux, ainsi ils proposent :

$$h_{conv-Gb} = 0.46 \frac{k_G}{D_e} Re_D^{0.535} Re_\omega^{0.104} \eta^{-0.341} \quad (\text{II.21})$$

Où  $k_G$  a été calculée par l'expression [49] : (II.7)

Et  $De$ ,  $Re_D$ ,  $Re_\omega$  sont calculées par les expressions (II.8, II.9, II.10) respectivement  $\eta$  est Fraction solide :

$$\eta = \frac{\theta - \sin(\theta)}{2\pi} \quad (\text{II.22})$$

## B. Par Rayonnement

Les gaz à haute température transmettent leur chaleur à la surface du solide exposé, ce qui provoque une augmentation rapide de la température du matériau, surtout dans les zones soumises à de fortes températures.

Celle de Sass [58] et Lyons [59], nous avons des expressions simplifiées de  $h_{\text{Rad-Gb}}$  qui engendrent des erreurs non négligeables notamment :

$$h_{Gb} = \sigma \varepsilon_G \frac{(T_G^4 - T_b^4)}{(T_G - T_b)} \quad (\text{II.23})$$

$$h_{Gb} = 2\sigma\varepsilon_G\varepsilon_b(T_G^3 + T_b^3) \quad (\text{II.24})$$

Par ailleurs Ketslakh et Tsibin (1978) [60], ont proposé une expression plus précise à savoir :

$$h_{Gb} = \varepsilon \Psi \frac{(T_G^4 - T_b^4)}{(T_G - T_b)} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Avec : } \Psi = \varepsilon_G \varepsilon_C [1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)] \Omega \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Où : } \Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \frac{\theta}{2}} \quad (\text{II.27})$$

$$\text{Et : } \Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi[1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]]} \quad (\text{II.28})$$

Toutefois, Hottel et Sarofim (1967) proposent une expression également précise de la quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur lorsque  $\varepsilon_b > 0.8$  [55] :

$$Q_{\text{Rad-Gb}} = \sigma A_{Gb} (\varepsilon_b + 1) \frac{(\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_b^4)}{2} \quad (\text{II.29})$$

## 3. Transfert de chaleur entre réfractaires (paroi interne) « b » et le solide « B » ( $Q_{\text{Cond-Bb}} + Q_{\text{Rad-Bb}}$ )

### A. Par Conduction

L'équation générale est :

$$Q_{\text{Cond-bB}} = h_{bB} A_{bB} (T_b - T_B) \quad (\text{II.30})$$

Avec  $A_{\text{Cond-bB}}$  l'aire d'échange entre le gaz et les briques réfractaires, déterminée à partir de considérations géométriques et généralement évaluée selon (Perron, 1989). » [56] :

$$A_{\text{Cond-bB}} = \theta r_B \quad (\text{II.31})$$

Pour ce mode de transfert de chaleur, beaucoup de recherches se sont basées sur  $h_{\text{Cond-bB}}$  constant, comme Lyons et al. (1962) [59] qui l'ont estimé  $222.0 < h_{\text{Cond-bB}} < 250.0$ .

$h_{\text{Cond-bB}}$  a été évalué en utilisant la corrélation empirique de Tscheng et Watkinsion [57] comme suit :

$$h_{\text{Cond-bB}} = 11.6 \frac{k_B}{A_{\text{Cond-bB}}} \left( \frac{\omega R^2 \theta}{\alpha_B} \right)^{0.3} \quad (\text{II.32})$$

### B. Par Rayonnement

Les briques réfractaires transmettent une partie de leur chaleur au matériau sous forme de rayonnement thermique, ce qui participe au chauffage du solide, surtout dans les zones où les échanges directs entre les gaz chauds et le matériau restent faibles.

$$Q_{\text{Rad-bB}} = \sigma A_{\text{Rad-bB}} \varepsilon_B \varepsilon_b \Omega (T_B^4 - T_b^4) \quad (\text{II.33})$$

Avec  $\Omega$  qui est le facteur de forme pour les rayonnements qui sont calculés comme suit :

$$\Omega = \frac{L_{gcl}}{2(\pi - \beta)r} \quad (\text{II.34})$$

La surface de contact où se fait le transfert de chaleur est supposée identique :

$$A_{\text{Conv-bB}} = A_{\text{Rad-bB}} \quad (\text{II.31}).$$

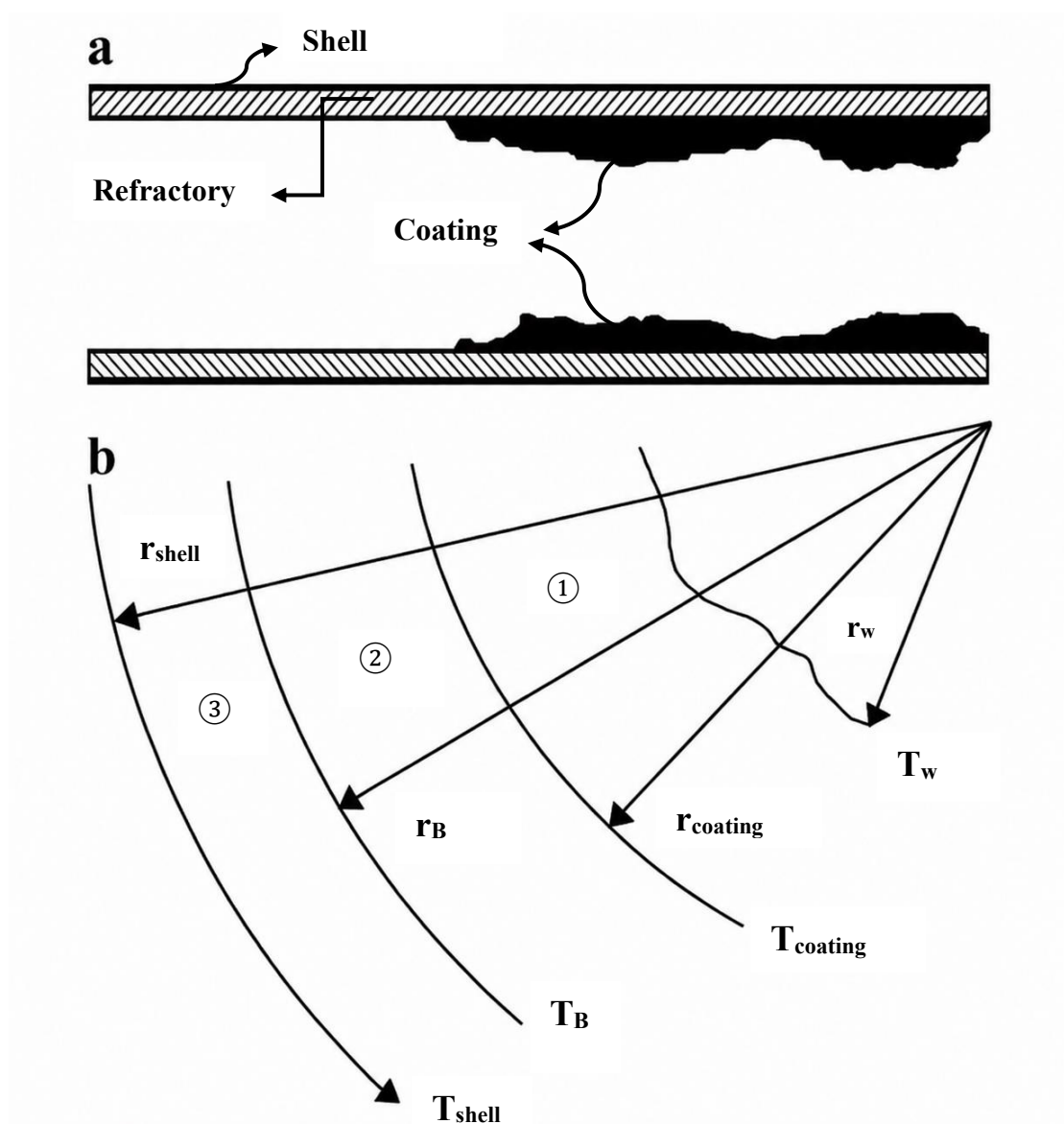


Figure II- 3. (a) Couches de paroi dans la zone de cuisson d'un four à ciment. (b) résistances des couches. [70]

La consommation d'énergie dans un four à ciment dépend de plusieurs facteurs internes, comme le chauffage des matières premières à haute température, les réactions chimiques (endothermiques) pour former le clinker, ainsi que la fusion des matériaux.

Cependant, une partie de cette énergie est perdue vers l'extérieur, ce qui représente environ 15 à 20 % de l'énergie totale. Il est donc important de réduire ces pertes sans affecter la qualité du produit.

La figure II.3 montre les différentes couches de la paroi du four rotatif dans la zone de cuisson. Ces couches sont :

- 1 → revêtement intérieur du four (croustage)
- 2 → réfractaire
- 3 → La virole

Il existe des échanges de chaleur entre le lit de matière et les parois du four à travers ces couches. Pour calculer les pertes thermiques, il est nécessaire de connaître la température de la surface externe de la virole. L'objectif est de déterminer les pertes de chaleur afin d'identifier les plus importantes, dans le but d'améliorer le rendement énergétique du four. [61].

En régime permanent dans le four les équations de l'équilibre thermique s'écrivent comme suite [62] :

$$Q_{Rad-GB} + Q_{Conv-GB} - Q_{Rad-Bb} - Q_{Cond-Bb} = Q_{COAT} \quad (II.35)$$

$$Q_{COAT} = Q_{Ref} \quad (II.36)$$

$$Q_{Ref} = Q_{VIROLE} \quad (II.37)$$

$$Q_{VIROLE} = Q_{CONV-VIROLE} + Q_{RAD-VIROLE} \quad (II.38)$$

Comme la virole secondaire est supposée être fabriquée à partir d'un matériau à faible émissivité, le transfert de chaleur par rayonnement entre la virole secondaire et la virole du four est considéré comme négligeable.[61]

$$Q_{RAD-VIROLE} = \sigma A_{VIROLE} \varepsilon_{VIROLE} (T_{VIROLE}^4 - T_{AIR}^4) \quad (II.39)$$

$Q_{CONV-VIROLE}$  représente le flux de chaleur transféré par convection entre les parois chaudes de la virole et l'air circulant dans l'espace interstitiel. Les flux thermiques par convection sont exprimés par :

$$Q_{Conv-VIROLE} = h_{Conv} A_{VIROLE} (T_{VIROLE} - T_{AIR}) \quad (II.40)$$

En fonction de la masse d'air traversant l'espace annulaire, le coefficient du flux de chaleur par convection a été calculé comme suit. [61]

$$h_{conv} = 0.021 R_e^{0.8} P_r^{0.33} \left( \frac{d_o}{d_i} \right)^{4/5} \quad (II.41)$$

$Q_{LOSS-Conv}$  et  $Q_{LOSS-Rad}$  sont les pertes de la couche externe dues respectivement à la convection et au rayonnement. Dans notre étude de cas, les viroles 4, 5 et 6 ont été considérées comme négligeables. Par conséquent, les pertes de chaleur par convection et par rayonnement dans le four rotatif ont été déterminées de la manière suivante [62] :

$$Q_{LOSS-Conv} = h_{Conv} A_{VIROLE} (T_{VIROLE} - T_0) \quad (II.42)$$

$$\text{Avec : } h_{conv} = \left( 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{1/5} \right]^{2/7}} \right)^2 \left( \frac{ka}{D} \right) \quad (\text{II.43})$$

$$Q_{LOSS-Rad} = \sigma A_{VIROLE} \varepsilon_{VIROLE} (T_{VIROLE}^4 - T_0^4) \quad (\text{II.44})$$

#### 4. Les pertes de chaleur du four vers l'environnement est résolue par

Cette perte a lieu lorsque la chaleur est transférée depuis la surface réfractaire interne chaude, en traversant les couches isolantes ainsi que la virole en acier, avant d'être finalement dissipée vers l'environnement par convection et rayonnement. Son importance dépend de la conductivité thermique ainsi que de l'épaisseur des matériaux réfractaires et isolants utilisés. [63]

$$Q_{B-VIROLE} = \frac{T_B - T_{virole}}{\sum_j R_{wall,j}^{cd}} \quad (\text{II.45})$$

$$R_{wall,j}^{cond} = \frac{\ln(d_{outer,j}/d_{inner,j})}{2\pi l k_j} \quad (\text{II.46})$$

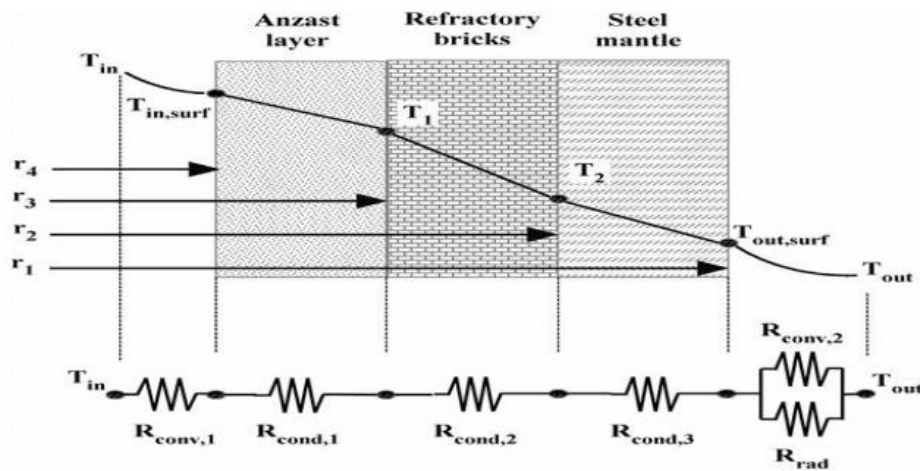


Figure II- 4. Le réseau de résistance thermique pour le flux de chaleur à travers le manteau du four rotatif. [64]

$$\text{Donc : } R_{cond,1} = \frac{1}{2\pi l k_1} \ln \left( \frac{r_3}{r_4} \right) \quad (\text{II.47})$$

$$R_{cond,2} = \frac{1}{2\pi l k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_3} \right) \quad (\text{II.48})$$

$$R_{cond,3} = \frac{1}{2\pi l k_3} \ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \quad (\text{II.49})$$

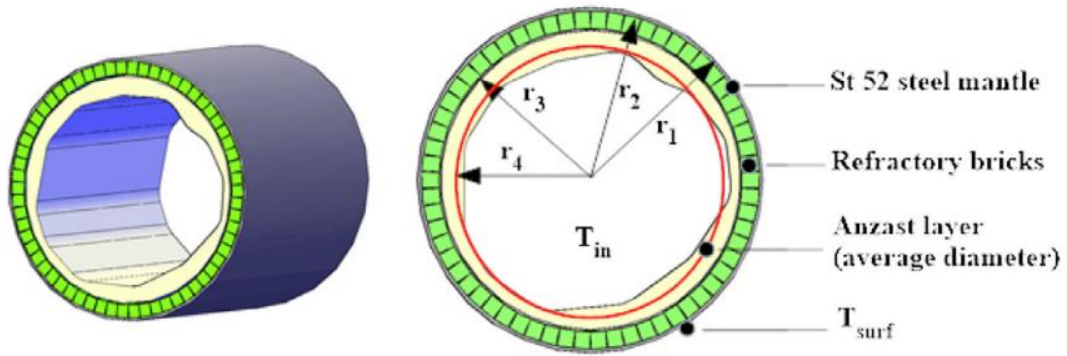


Figure II- 5. Présentation de la disposition réfractaire et de la couche anzast dans un four rotatif

#### II.4. Modélisation thermodynamique de four rotatif

Les parois réfractaires et la coque métallique du four sont constituées d'une structure solide rigide, Les molécules du matériau restent pratiquement fixes, elles ne se déplacent pas comme dans un liquide ou un gaz. Cependant, même immobiles, ces molécules possèdent une énergie interne liée à leurs vibrations, leurs rotations microscopiques. D'un autre côté, cette énergie dépend de la température, autrement dit si la température est élevée, les molécules sont énergétiques et l'inverse. Quand une différence de température existe dans le matériau, les molécules chaudes transmettent une partie d'énergie aux molécules froides, ce phénomène qu'on appelle la conduction thermique.

Une analyse thermodynamique du four rotatif a été réalisée afin d'obtenir un schéma de gestion écoénergétique, conformément aux premier et deuxième principe de la thermodynamique. La capacité thermique massique, les débits massiques d'entrée et de sortie de chaque composant, la température, la pression et la chaleur spécifique constante de chaque composant ont été déterminés pour le four rotatif. Pour un système ouvert qui fonctionne dans des conditions stables, les équations suivantes sont appliquées. La masse d'équilibre est donnée par [46] :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (II.50)$$

Le bilan énergétique général peut être exprimé comme suit :

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (II.51)$$

Le rendement est défini comme :

$$\eta = \frac{\sum \dot{E}_{out}}{\sum \dot{E}_{in}} \quad (II.52)$$

L'amélioration la plus significative de l'efficacité opérationnelle est obtenue en minimisant les pertes. Une efficacité accrue permet une meilleure compatibilité entre les sources d'énergie.

### 1. Étude du bilan énergétique

La production de ciment est un processus énergivore, consommation élevée de l'Energie. Théoriquement, la production d'une tonne de clinker nécessite 1,6 GJ de chaleur (varie entre 123 et 125 kgce/t clinker avec des performances améliorées atteignant 104 kgce/t pour les fours modernes et un potentiel inférieur à 100 kgce/t avec des technologies avancées) [65]. Cependant en pratique, la consommation énergétique spécifique est d'environ 2,95 GJ par tonne de ciment pour les fours modernes et bien équipés (dans certains pays cette consommation peut dépasser 5 GJ par tonne ce qui montre une faible efficacité énergétique). Par exemple, certaines cimenteries chinoises consomment en moyenne 5,4 GJ par tonne de clinker, ce qui est assez élevé [66].

L'audit énergétique est considéré comme une des méthodes les plus efficaces pour améliorer la gestion de l'énergie [67]. Il permet de connaître précisément la consommation énergétique et d'analyser l'utilisation de l'énergie dans chaque partie de l'installation, afin de détecter les pertes et proposer des solutions pour économiser l'énergie.

#### 1.1.Bilan de masse du système

La conservation de la masse exprimée en fonction du temps (débit massique entrant = débit massique sortant (II.50)) [68] :

$$\text{Où : } \sum \dot{m}_{raw\ material} + \dot{m}_{cooling\ air} + \dot{m}_{fuel} \quad (\text{II.53})$$

$$\sum \dot{m}_{pre-heater\ exhaust} + \dot{m}_{clinker} + \dot{m}_{dust-cooler} + \dot{m}_{hot\ air-cooler} + \dot{m}_{dust-pre-heater} \quad (\text{II.54})$$

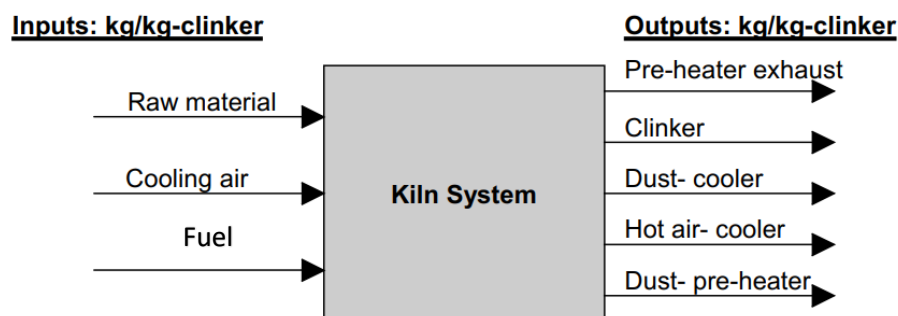


Figure II- 6.Bilan massique du système de four. [69]

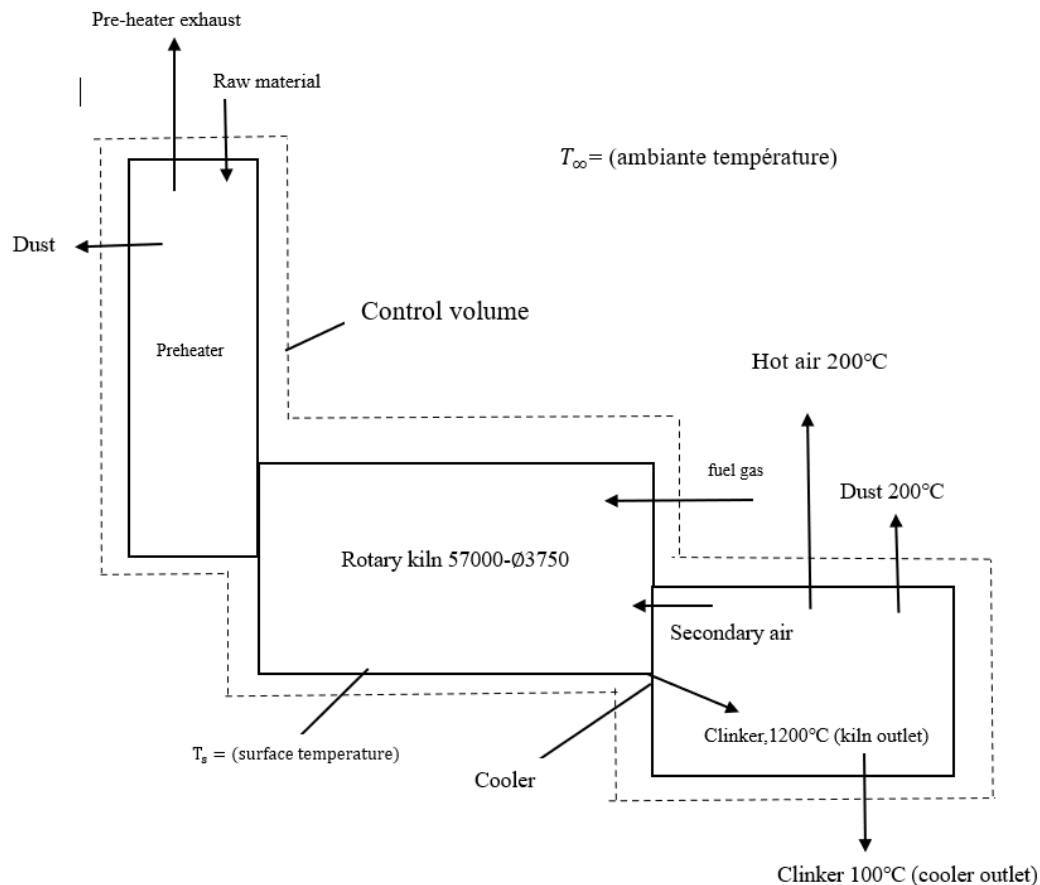


Figure II- 7.Schéma le volume de Contrôle, des différents flux et des composants du système de four. [69]

| Component                      | Raw matériel (%) | Clinker (%) |
|--------------------------------|------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 15.29            | 24.22       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.52             | 3.93        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.14             | 0,23        |
| CaO                            | 43.70            | 67,80       |
| MgO                            | 1.30             | 2,80        |
| SO <sub>3</sub>                | 0.30             | 0,55        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.29             | 0,09        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.08             | 0,38        |
| H <sub>2</sub> O               | 0.4              | —           |
| Ignition loss(LOI)             | 35.98            | —           |
| Total                          | 100              | 100         |

Tableau II- 1.Composants chimiques des matières premières et du clinker de la cimenterie HOLCIM Algerie.

## 2. Bilan énergétique

Le bilan énergétique (Energy balance) d'un système de four rotatif (dans notre cas, nous étudions uniquement le bilan énergétique du four rotatif) est une équation de conservation

de l'énergie qui permet d'analyser l'ensemble des flux de chaleur entrant et sortant du four (équation II.51).

Où  $\dot{E}_{in}$  et  $\dot{E}_{out}$  représentent l'énergie nette transférée au système et hors du système, respectivement.

En supposant l'absence de variation des énergies cinétique et potentielle lors de tout transfert de chaleur ou de travail, l'équation de l'énergie devient [68] :

$$\sum \dot{m}_{in} h_{in} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (II.55)$$

Et le rendement énergétique (premier principe) du système de four est [68] :

$$\eta_{energy} = \frac{\text{clinker formation clinker}}{\text{energy input}} = 1 - \frac{\text{energy output}}{\text{energy input}} \quad (II.56)$$

Pour analyser thermodynamiquement le système du four, les hypothèses suivantes sont posées :

- L'enthalpie de référence est considérée comme nulle à 0 °C pour les calculs
- Régime permanent.
- Les variations de température ambiante sont négligées.
- Les fuites d'air froid dans le système sont négligeables.
- La composition des matières premières et du combustible reste inchangée.
- La température moyenne de la surface du four reste inchangée.[69]

**A. Entrées énergétiques du système :** toute l'énergie thermique qui entre dans le système du four (Kj/kg clinker)

$$Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (II.57)$$

- 1- Chaleur de combustion du combustible : C'est l'énergie libérée par la combustion du fuel (Dans notre cas, le four rotatif est alimenté en gaz naturel comme combustible).[71]

$$Q_1 = m_g H_g \quad (II.58)$$

$$m_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_{cl}} \quad (II.59)$$

- 2- Chaleur sensible produite par le combustible de chauffage du charbon avant combustion [69] : Dans notre étude cas, four rotatif chauffé au gaz naturel, on utilise le gaz son chauffage (  $Q_2=0$ )
- 3- Chaleur produite à partir de matières premières (énergie interne liée à la température de matière cru pour produit 1kg de clinker) [69] :

$$Q_3 = m_{rm} \cdot C_{cru} \cdot T_{cru} \quad (II.60)$$

4- Chaleur des Matières organiques dans l'alimentation du four (Combustion des matières organiques dans le cru) [71] : Dans notre cas il pas des organiques dans le cru ( $Q_4=0$ )

5- L'énergie transportée par l'air de refroidissement à l'entrée (énergie de base de l'air ambiant a température 30°C) dans le système est donnée par la relation suivante :[69]

$$Q_5 = m_{wc} h_{wc} \quad (II.61)$$

$$h_{ca} = C_{wc} T_{wc} \quad (II.62)$$

Dans notre cas, le refroidissement du clinker est assuré par un système à eau (water cooling), entraînant la vaporisation partielle de l'eau injectée au contact du clinker chaud. Le terme  $Q_5$  représente l'énergie transportée par l'eau de refroidissement dans le système du four, correspondant au transfert de chaleur entre le clinker et le mélange eau–vapeur généré.[73]

### B. Sorties énergétiques du système

1- L'énergie chimique nécessaire pour former le clinker (Formation of clinker) : prendre % des oxydes du clinker (Tableau II.1), Multiplier par coefficients, puis additionner. [69]

$$Q_6 = 17.196(Al_2O_3) + 27.112(MgO) + 32(CaO) - 21.405(SiO_2) - 2.468(Fe_2O_3) \quad (II.62)$$

2- La Chaleur perdue par les gaz de sortie du système du four (sortie de préchauffage) :[69]

$$Q_7 = m_{eg} C_{p-eg} T_{eg} \quad (II.63)$$

3- Chaleur apportée au four par l'air chaud du refroidisseur (cooler) [69] :

$$Q_8 = m_{air} \cdot h_{air} \quad (II.64)$$

Dans notre cas, basé sur un système à injection d'eau ce flux est remplacé par un transfert thermique associé au mélange eau–vapeur généré lors de l'évaporation de l'eau au contact du clinker.

4- Perte de chaleur par la poussière : sont les pertes d'énergie transportées par les poussières chaudes qui quittent le système avec les gaz.

$$Q_9 = (m_{dust-preheater} + m_{dust-aircooler}) \cdot h_{dust-average} \quad (II.65)$$

5- Pertes décharge de clinker (sortie du refroidisseur) : sont les pertes de chaleur dues au clinker chaud qui quitte le système (même après le refroidisseur, le clinker n'est jamais totalement froid, il garde encore de la chaleur).

$$Q_{10} = m_{cl} h_{cl} \quad (II.66)$$

6- Pertes par Rayonnement de la surface du four : sont les pertes de chaleur depuis la surface externe (Virole) du four vers l'environnement.

$$Q_{11} = \frac{\sigma \varepsilon A_{kiln}(T_s^4 - T_\infty^4)}{(1000 \cdot \dot{m}_{cl})} \quad (II.67)$$

7- La convection de la surface externe du four (virole/shell) :

$$Q_{12} = h_{conv} A_{kiln} (T_s - T_\infty) \quad (II.68)$$

Où coefficient de convection donne par équation suivant :

$$h_{conv} = \frac{K_{air}}{D_{kiln}} Nu \quad (II.79)$$

$$\text{Nombre de Renauld : } Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (II.70)$$

$$\text{Nombre de Prandtl : } Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (II.71)$$

$$\text{Hilbert équation : } Nu = C Re^m Pr^{1/3} \quad (II.72)$$

**C** et **m** deux constantes sont déterminées à partir de la valeur du nombre de Reynolds [74]

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique du four rotatif en expliquant les principaux transferts de chaleur : la convection, le rayonnement et la conduction. Nous avons aussi établi le bilan énergétique du four en identifiant les énergies qui entrent et qui sortent du système. Ce travail nous permet de mieux comprendre le fonctionnement thermique du four rotatif. Dans le chapitre suivant, nous allons utiliser ces résultats pour réaliser un logiciel de simulation afin d'analyser le bilan thermique de manière pratique.



**CHAPITRE III : SIMULATION  
NUMÉRIQUE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE  
ET THERMIQUE AVEC FORTRAN**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la simulation numérique du bilan énergétique et thermique du four rotatif en utilisant le langage Fortran. Ce travail est basé sur le modèle mathématique présenté dans le chapitre précédent. Nous commençons par une présentation simple du langage Fortran. Ensuite, nous présentons le four rotatif étudié ainsi que les différentes données utilisées dans les calculs. Enfin, nous présentons le programme Fortran qui permet de calculer le bilan thermique et énergétique du four.

### III.2. Présentation générale du langage Fortran

#### 1. Historique

Le langage Fortran (traduction des formules mathématiques) a été créé en 1954 par John Backus dans la société IBM. Son objectif est de traduire les formules mathématiques en programmes informatiques. La première version est apparue en 1957. Ensuite, le langage a évolué avec le temps. La version Fortran 77 a apporté des améliorations importantes, comme le type caractère et de meilleures instructions d'entrée et de sortie. Après cela, Fortran 90 a marqué une grande évolution. Cette version a introduit la programmation structurée, la manipulation des tableaux et les tableaux dynamiques. Cela a facilité le calcul scientifique. Plus tard, d'autres versions comme Fortran 95, 2003 et 2008 ont amélioré le langage, surtout pour le calcul parallèle. Aujourd'hui, Fortran est toujours utilisé dans le domaine scientifique et technique. Il est très adapté pour les calculs numériques. C'est pour cela qu'il est utilisé dans ce travail pour calculer le bilan thermique et énergétique du four rotatif [74].

#### 2. Principes du langage Fortran

IBM (International Business Machines Corporation) a développé le langage de programmation Fortran dans les années 1950 pour répondre aux besoins du calcul numérique et scientifique. Le terme « traduction de formules » désigne la traduction d'équations mathématiques, d'où le nom Fortran.

Fortran a été conçu pour effectuer des calculs complexes rapidement et avec une grande précision numérique. Ses performances exceptionnelles en ont fait l'un des langages de programmation les plus utilisés en ingénierie, mécanique, thermique, aérospatiale, météorologie et simulation numérique.

Avantages de Fortran par rapport à un langage interprété (ex : MATLAB) :

- Compilée, le code s'exécutera très vite
- Pas besoin d'un environnement d'exécution intermédiaire
- Très puissant pour les calculs scientifiques et les grandes simulations
- Conçu pour les calculs numériques intensifs et le calcul parallèle
- Code exécutable plus stable et sécurisé.

Les lignes de code en Fortran doivent respecter plusieurs règles importantes afin d'assurer la bonne compilation et l'exécution du programme :

- Les commentaires commencent par C, \* ou par le symbole !
- Les instructions doivent débiter à partir de la colonne 7 ou plus.
- Les labels (étiquettes) sont placés entre les colonnes 2 et 5.
- Une ligne de code ne doit pas dépasser la colonne 72.

- Les éditeurs comme [X]Emacs peut faciliter l'alignement automatique du code et la gestion des labels.
- Pour continuer une instruction sur plusieurs lignes, on place un caractère dans la colonne 6 des lignes suivantes [74].

[illegible]

Figure III- 1.Exemples de contenu de lignes en Fortran.

### 3. Développement du langage FORTRAN

Fortran a beaucoup évolué depuis sa création afin de répondre aux besoins du calcul scientifique. Les premières versions étaient destinées aux calculs numériques simples, puis FORTRAN 77 a apporté plusieurs améliorations dans la structure du langage. Ensuite, FORTRAN 90 a modernisé la programmation grâce aux tableaux dynamiques et à la programmation modulaire. Les versions récentes comme FORTRAN 95, 2003 et 2008 ont ajouté des fonctionnalités plus avancées et de meilleures performances. Malgré l'apparition de nouveaux langages, FORTRAN reste encore utilisé dans les simulations et les calculs scientifiques complexes grâce à sa rapidité et sa précision.

Les fonctions concernées sont les suivantes :

- IF arithmétique,
- Indice DO non entier,
- Terminaison de l'instruction DO autrement que par une instruction CONTINUE ou ENDDO,
- Branchement sur END IF à partir de l'extérieur de son bloc,
- Terminaison DO partagée,
- Retour alternatif,
- PAUSE,
- ASSIGN et GO TO assigné, et
- Les spécificateurs FORMAT assignés.[75]

#### 4. Intérêt du langage Fortran

FORTRAN occupe une place importante dans le domaine scientifique grâce à ses performances élevées dans les calculs numériques. Il est particulièrement adapté à la résolution des équations mathématiques et à la simulation des phénomènes physiques.

Ses principaux avantages sont :

- Une grande rapidité d'exécution.
- Une bonne précision numérique.
- Une capacité à traiter des calculs complexes.
- Une excellente gestion des tableaux et des matrices.
- Une forte utilisation dans les simulations scientifiques et thermiques.

Dans les études thermiques et énergétiques, FORTRAN est utilisé pour :

- La modélisation thermique.
- La simulation du transfert de chaleur.
- La résolution des équations différentielles.
- L'analyse des bilans énergétiques.
- Les simulations numériques des fours rotatifs.[75]

## **5. Structure de fonctionnement de FORTRAN**

### **5.1.Écriture du programme**

À cette étape, l'utilisateur écrit son programme FORTRAN à l'aide d'un éditeur de texte. Il rédige des instructions mathématiques, des formules et des conditions logiques pour décrire le problème à résoudre.

Le fichier obtenu est généralement enregistré avec une extension comme. For (code en format fixe pour ancienne norme Fortran 77) où. f90(code libre pour norme Fortran 90)

### **5.2.Compilation (compilateur FORTRAN)**

Ici intervient le compilateur, qui est un outil essentiel du système FORTRAN. Son rôle est de :

- vérifier si le programme est correct (erreurs de syntaxe, structure)
- traduire le code source FORTRAN en langage machine
- produire un fichier exécutable compréhensible par l'ordinateur

### **5.3.Exécution (processeur/unité de calcul)**

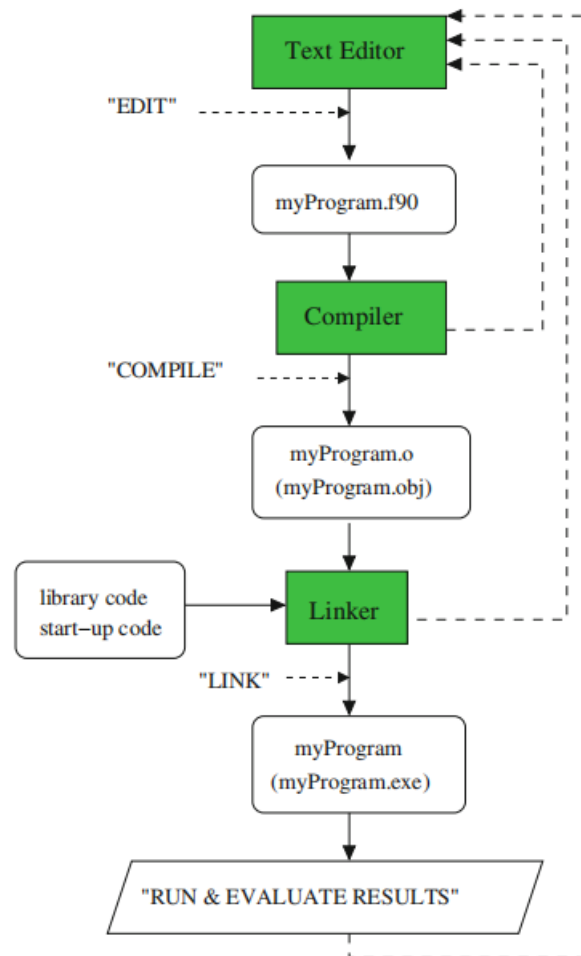
Une fois le programme compilé, il est lancé par le système d'exploitation. Le processeur exécute alors les instructions une par une :

- calculs numériques
- opérations logiques
- boucles et conditions

### **5.4.Résultats (sortie : écran / fichiers)**

Après exécution, les résultats sont affichés à l'écran (console), ou enregistrés dans des fichiers de sortie.[75]

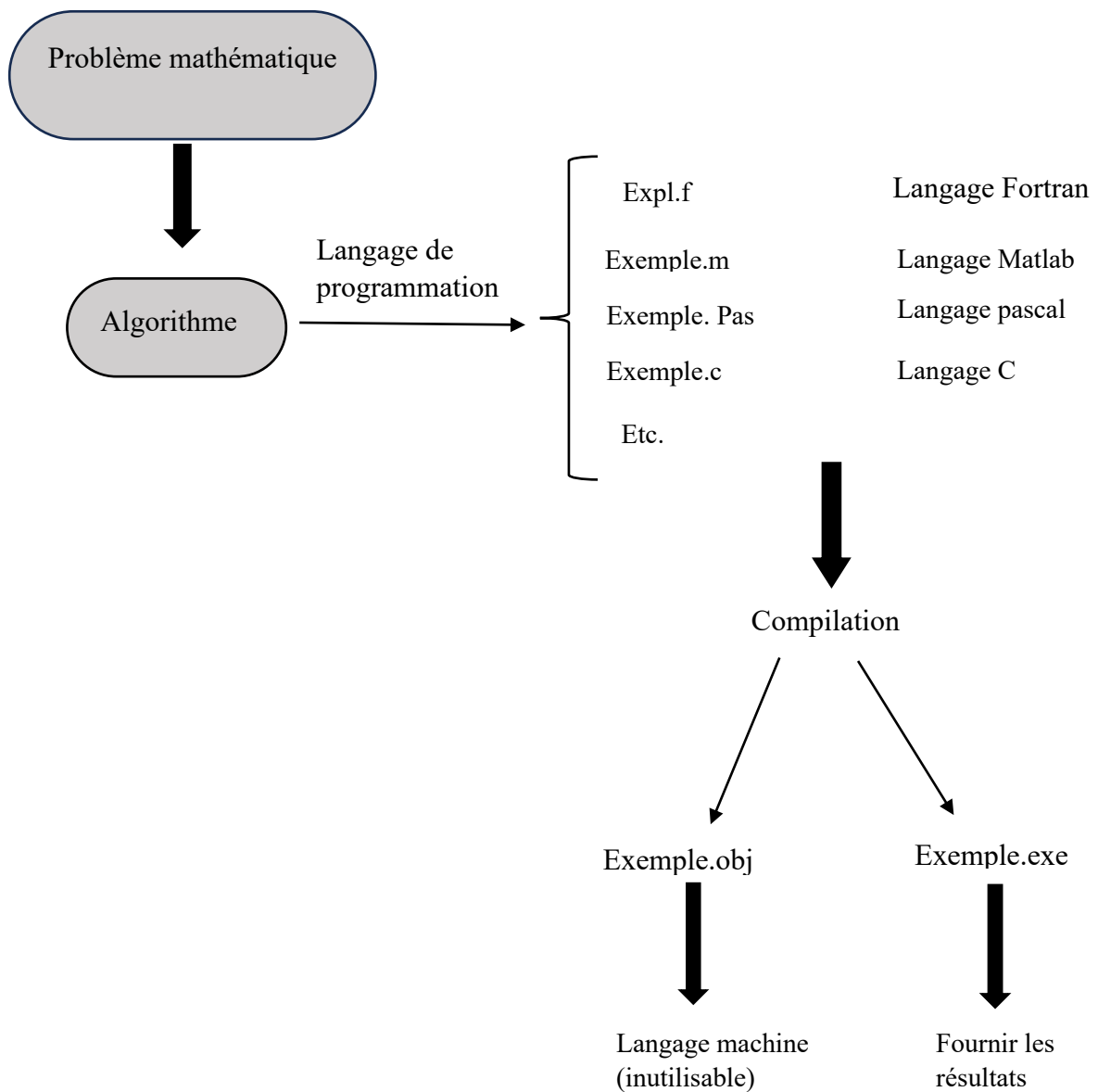
## **6. Flux de travail de programmation de base :**



FigureIII- 2.Schéma du processus de programmation en Fortran. Les fichiers sont représentés par des ronds blancs et les programmes externes par des cases vertes.[75]

## 7. Conception et implémentation d'un programme Fortran

La conception du programme comprend l'analyse des besoins et la structuration de l'algorithme, suivies de la programmation à l'aide d'instructions et de structures de contrôle propres à Fortran. Enfin, nous vérifions l'exactitude du programme et le testons afin d'assurer son bon fonctionnement.[74]



FigureIII- 3.Schéma représentatif des différentes étapes de la conception d'un programme Fortran. [1]

## 8. Structure d'un programme Fortran

Suite de modules élémentaires appelés blocs fonctionnels. On distingue trois types principaux : [76]

1. L'instruction PROGRAM est facultative, L'instruction END qui génère l'arrêt du programme est obligatoire. Les instructions de spécification sont des instructions de déclaration, des définitions de type, des blocs INTERFACE. L'instruction CONTAINS indique la présence d'une ou plusieurs procédures.

```

PROGRAM nom_du_programme
    [Instructions de spécification]
    [Instructions exécutables]
CONTAINS
    [Procédures internes]
END PROGRAM nom_du_programme

```

2. Les sous-programmes, définis par le mot-clé SUBROUTINE, définissent une action au moyen de toutes les instructions du langage, dont l'appel prend lui-même la forme et l'apparence d'une instruction du langage. La syntaxe générale d'un sous-programme est la suivante :

```

Subroutine  nom-subroutine (arguments)
.....
end subroutine

```

3. Les fonctions, définis par le mot-clé FUNCTION, calculent une valeur au moyen de toutes les instructions du langage, dont l'appel prend place au sein d'une expression. La syntaxe générale d'une fonction est la suivante :

```

Function  nom_fonction (arguments)
.....
end function

```

### III.3. Description du système étudié

Après la présentation du langage Fortran, utilisé pour calculer les équations thermiques et le bilan énergétique, nous présentons le système étudié, à savoir le four rotatif utilisé dans l'industrie cimentière qui est un cylindre métallique de longueur 57 m et de diamètre 3,75 m. Il est incliné d'un angle de 4%, et tourne à une vitesse de l'ordre de 1.7 jusqu'à 2.2 tr/min. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique, des préchauffeurs à cyclones sont largement utilisés pour élever la température de la matière première avant son entrée dans le four (à température 800 jusqu'à 900 °C).

Afin de mieux comprendre la structure du four rotatif, une modélisation 3D est présentée, mettant en évidence les différentes zones ainsi que la distribution des briques réfractaires. La figure III-4 ci-dessous montre la modélisation 3D du four étudiée ( $\varnothing$  3,75 m  $\times$  57 m) ainsi que la répartition des différentes zones de briques réfractaires le long de sa longueur. Chaque zone est représentée par une couleur distincte correspondant à un type de brique adapté aux conditions de fonctionnement rencontrées dans le four et la figure III-5, montre Les coupes transversales illustrent la disposition des briques dans chaque section, tandis que les détails de montage montrent leur agencement au niveau du revêtement réfractaire .la figure comprend également un tableau récapitulatif indiquant les caractéristiques géométriques des briques réfractaires utilisées (longueur, hauteur et

dimensions des faces), ainsi qu'un schéma détaillé illustrant les dimensions d'une brique type. Ces informations permettent de caractériser la configuration du revêtement réfractaire assurant la protection de la virole métallique et le bon fonctionnement thermique du four rotatif.

La figure III-6, présente le plan de disposition des viroles constituant la virole du four rotatif, ainsi que la répartition des joints de soudure sur toute la longueur du cylindre. Elle met en évidence le calepinage des tôles, les différentes zones de soudage (soudures longitudinales et circonférentielles), ainsi que les détails des assemblages entre les viroles. La figure III-7, présente le schéma synoptique global du système de conduite et de supervision du four rotatif étudié. Elle illustre l'architecture de contrôle de l'unité de production de clinker, incluant les principales zones du procédé : la tour de préchauffage, le four rotatif, le refroidisseur ainsi que les différents ventilateurs et circuits associés (air primaire, air secondaire et tertiaire). On y observe également les principaux paramètres opératoires surveillés en temps réel tels que les débits de gaz, les températures, les vitesses des ventilateurs, la consommation énergétique ainsi que les consignes (SP) et valeurs mesurées (PV). Les indicateurs de fonctionnement permettent d'identifier les limites d'exploitation (min/max) ainsi que les états d'alarme ou de fonctionnement normal du procédé.

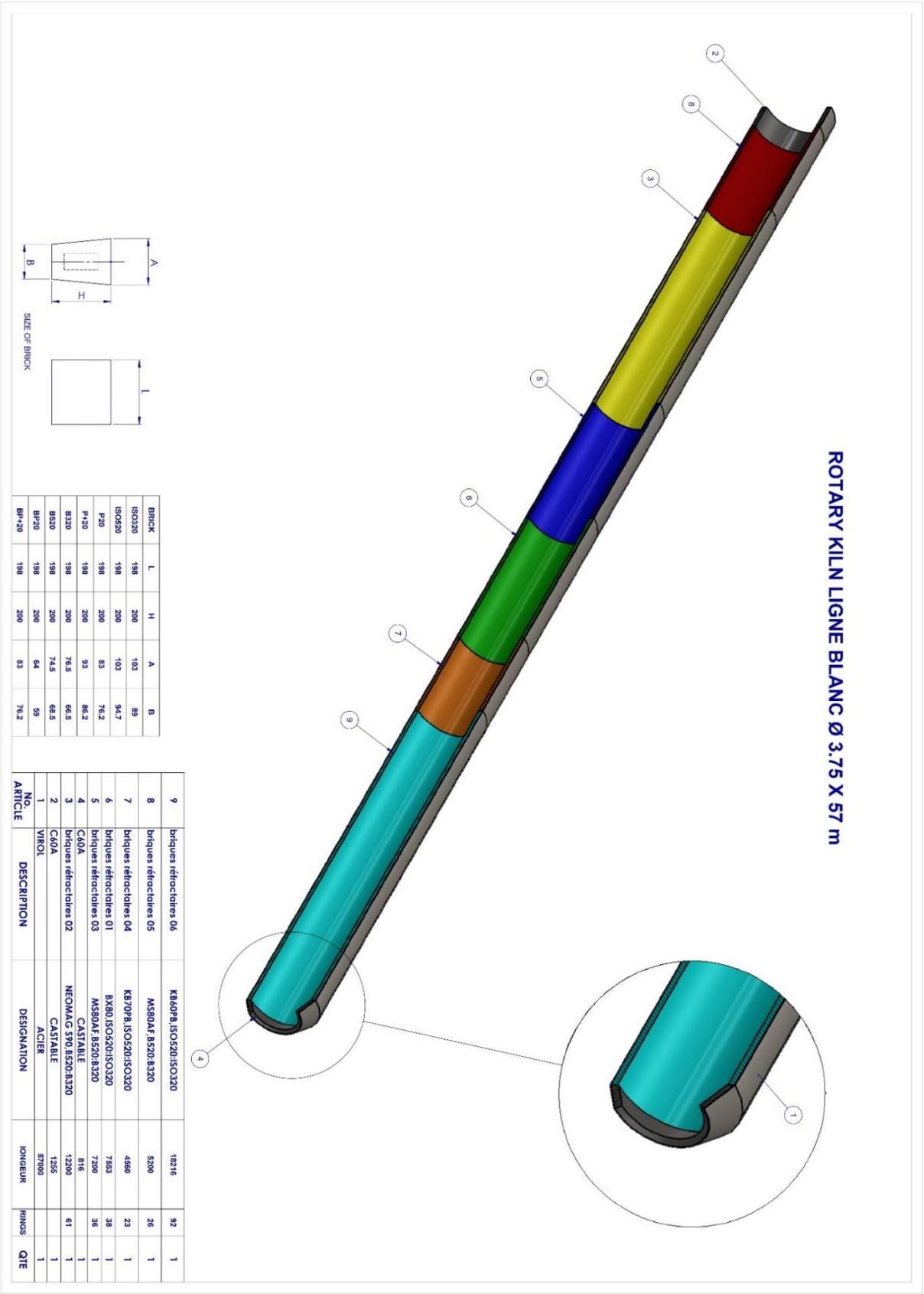


Figure III- 4.Modélisation 3D et caractéristiques géométriques des différentes zones de briques réfractaires du four rotatif.

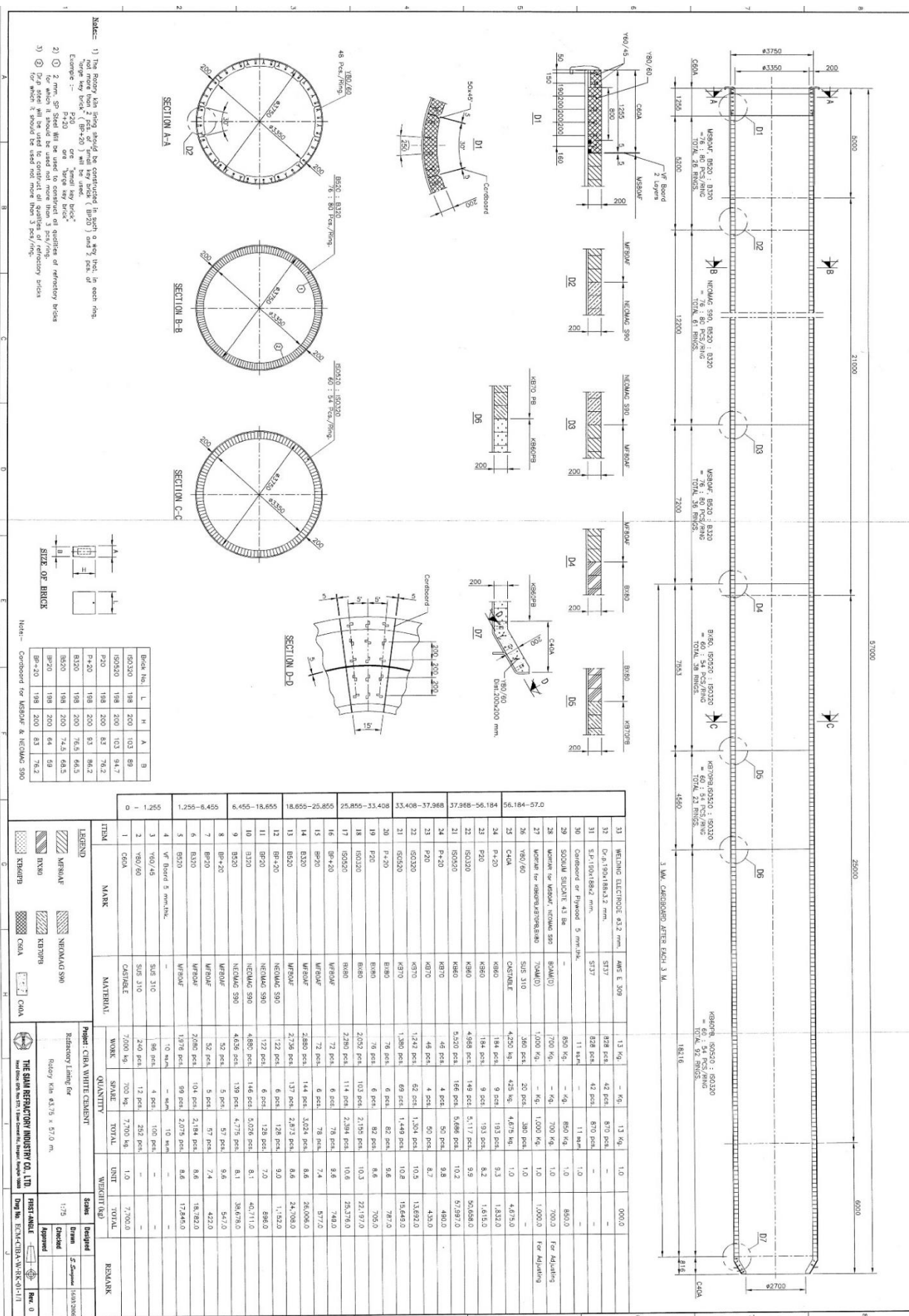


Figure III- 5.Dessin technique du four rotatif et répartition des zones de briquetage réfractaire

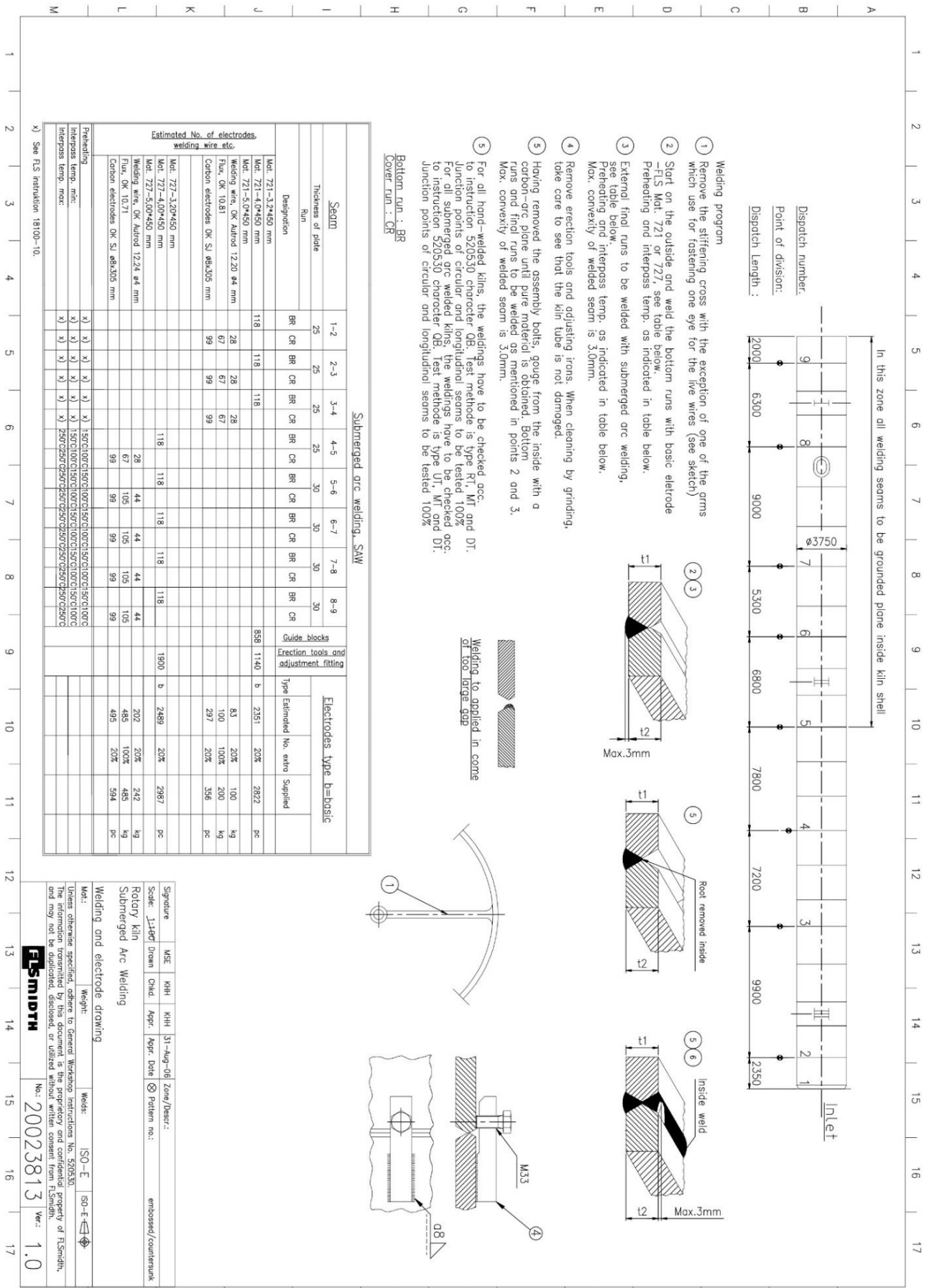


Figure III- 6. Plan de calepinage et de soudage de la virole du four rotatif

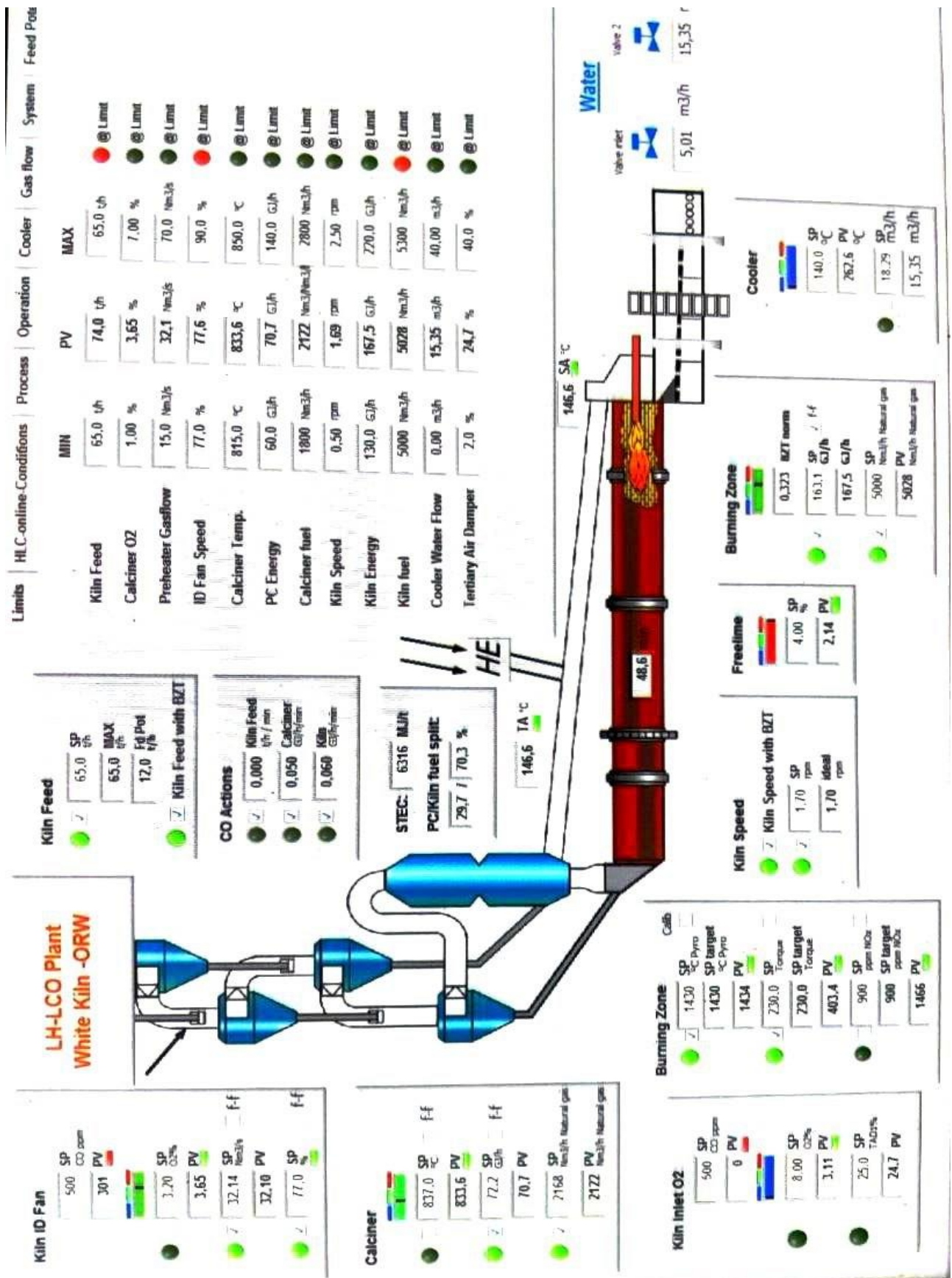


Figure III- 7.Schéma synoptique de supervision et de contrôle du four rotatif de ciment blanc de la cimenterie HOLCIM-Algerie.

## 1. Données du système étudié et paramètres de calcul

Dans cette partie, nous présentons les différentes données utilisées pour la modélisation du bilan thermique et énergétique du four rotatif. Ces données comprennent les caractéristiques géométriques, les conditions de fonctionnement, ainsi que les propriétés thermiques nécessaires au calcul. Elles sont introduites dans le programme Fortran pour simuler le comportement thermique du four.

Les données utilisées dans cette étude correspondent aux conditions de fonctionnement relevées le 11/04/2026 de 09 :00h à 10 :00h.

### 1.1. Données géométriques du four

Les principales caractéristiques géométriques du four rotatif étudié sont regroupées dans le tableau suivant.

| Paramètre                            | Symbole  | Valeur          |
|--------------------------------------|----------|-----------------|
| Diamètre                             | D        | Ø3.750 m        |
| Longueur                             | L        | 50 m            |
| Code de l'équipement                 |          | 431-kl 100      |
| Date de production                   |          | 2007            |
| Température ambiante                 | T        | 15 °C           |
| Inclinaison de four                  |          | 4%              |
| Angle de repos                       | $\alpha$ | 40°             |
| Plage de vitesse de rotation de four | N        | [1.7-2.2]tr/min |
| Taux de remplissage                  | Taux     | 7.6%            |
| Altitude                             |          | 140m            |

Tableau III- 1. Paramètres géométriques du four rotatif

### 1.2. Données opératoires (fonctionnement)

Afin d'étudier l'influence des paramètres d'exploitation sur le bilan énergétique global du four rotatif ainsi que sur les mécanismes locaux de transfert thermique dans la zone de cuisson, une analyse paramétrique est réalisée. Cette approche consiste à faire varier un ensemble de grandeurs physiques et opérationnelles afin d'évaluer leur impact sur les flux de chaleur et la répartition énergétique au sein du four.

Deux catégories de paramètres sont considérées :

- Paramètres liés au bilan énergétique global du four, tels que les débits de matière, de gaz bruleur, d'eau de refroidissement, Température des gaz sortie du four, de cru et de virole.
- Paramètres liés aux phénomènes thermiques locaux dans la zone de cuisson, influençant directement les échanges de chaleur, notamment la température des gaz chauds, de clinker et la température de la virole, le rayon de croûtage, ainsi que les vitesses axiale et angulaire de rotation.

Les valeurs de référence ainsi que les plages de variation de ces paramètres sont regroupées dans les tableaux suivants.

| Paramètre                                        | Symbole                    | Valeur                                 |
|--------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| Débit massique de gaz du bruleur                 | $\dot{m}_g$                | 1.03 – 1.19 kg/s (avec un pas de 0.02) |
| Débit massique de clinker                        | $\dot{m}_{cl}$             | +14 kg/s                               |
| Débit massique de métiers cru                    | $\dot{m}_{cru}$            | 17-33 kg/s (avec un pas de 2)          |
| Débit massique de l'eau de refroidisseur         | $\dot{m}_{water\ cooling}$ | 5.86-7.46 kg/s (avec un pas de 0.02)   |
| Débit l'ai de l'échangeur air/air                | $\dot{m}_{Secondaire}$     | 33000 Nm <sup>3</sup> /h               |
| Débit massique des gaz sortie de four            | $\dot{m}_{eg}$             | 25.9 Kg/s                              |
| Débit de l'Air primaire                          | $\dot{m}_{primaire}$       | 22000 Nm <sup>3</sup> /h               |
| Température de clinker (sortie du four)          | $T_{cl}$                   | 1250°C                                 |
| Température de clinker (sorite de refroidisseur) | $T_{cl}$                   | 80 - 100°C                             |
| Température des gaz sortie                       | $T_{eg}$                   | 310-390°C (avec un pas de 10)          |
| Température du gaz bruleur                       | $T_g$                      | 14°C                                   |
| Température de cru                               | $T_{cru}$                  | 50 -66 °C (avec un pas 2)              |

Tableau III- 2.Conditions opératoires du four rotatif

### 1.3.Propriétés thermo physiques

| Paramètre                             | Symbole             | Valeur                                          |
|---------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|
| Émissivité du virole (acier)          | $\epsilon_{Virole}$ | 0.78                                            |
| Émissivité du réfractaire             | $\epsilon_B$        | 0.8                                             |
| Émissivité des gaz                    | $\epsilon_G$        | 0.27                                            |
| La constante de Stefann-Boltzman      | $\sigma$            | $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ |
| L'émissivité du matières              | $\epsilon_b$        | 0.781                                           |
| Conductivité thermique du gaz         | $k_G$               | 0.035 W/m.K                                     |
| Conductivité thermique du virole      | $K_{Virole}$        | 27 W/mK                                         |
| Conductivité thermique du réfractaire | $K_B$               | 2.7 W/mK                                        |
| Conductivité thermique du l'air chaud | $K_{air}$           | 0.026 W/mK                                      |
| L'enthalpie du gaz bruleur            | $C_g$               | 47373.33 Kj/Kg                                  |
| La masse volumique de gaz             | $\rho_g$            | 0.75 kg/Nm <sup>3</sup>                         |
| La masse volumique de l'eau           | $\rho_{eau}$        | 1000 kg/m <sup>3</sup>                          |

|                                                                  |           |               |
|------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|
| Enthalpie de clinker                                             | $h_{cl}$  | 86 kJ/kg      |
| L'enthalpie des gaz sortie                                       | $C_{eg}$  | 1.071 kJ/kg   |
| Chaleur spécifique de cru                                        | $C_{cru}$ | 0.86 kJ/kg °C |
| Chaleur spécifique de l'eau de refroidisseur a température 200°C | $C_{eau}$ | 836 kJ/kg C   |

Tableau III- 3. Propriétés thermo-physiques utilisées dans le système

#### 1.4.Données thermiques

| Paramètre                                     | Symbole      | Valeur                            |
|-----------------------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Température des gaz chauds au zone de cuisson | $T_G$        | 2173 -2333 K (Avec un pas de 20)  |
| Température de virole (paroi externe)         | $T_{Virole}$ | 573-773 K (Avec un pas de 22.222) |
| Température ambiante                          | $T_{\infty}$ | 288.15 K                          |
| Température de paroi interne                  | $T_B$        | 2237 K                            |
| Température de matière                        | $T_b$        | 1553 - 1633 K (Avec un pas de 10) |
| Température de brique                         | $T_B$        | 1473 K                            |
|                                               |              |                                   |

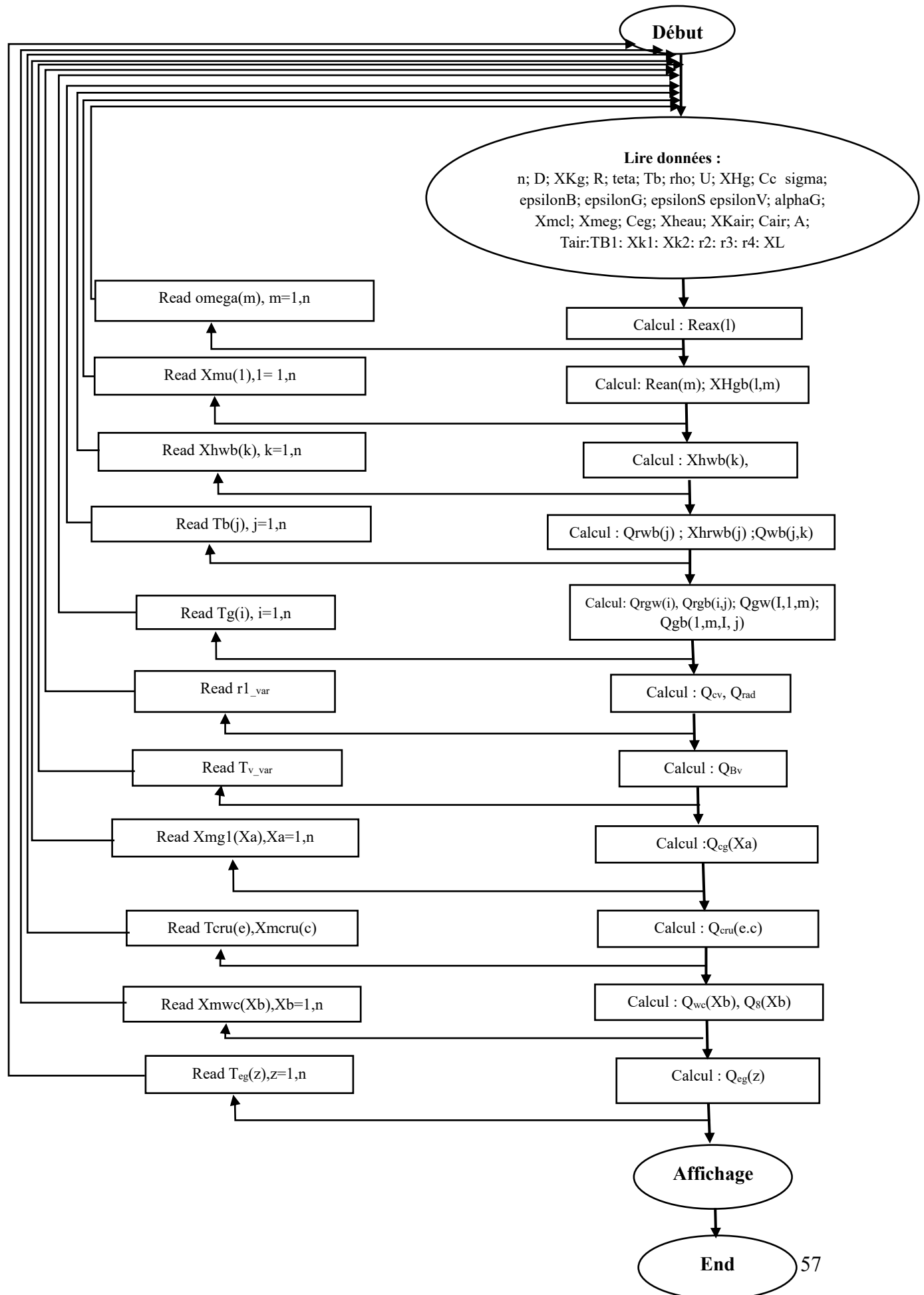
Tableau III- 4. Températures caractéristiques des différents milieux du four rotatif

#### 1.5.Paramètre de réfractaire et couches de four

| Paramètre                          | Symbole         | Valeur                |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Longeur de zone de cuisson         | $L$             | 15-20 m               |
| Epaisseur de Croutage              | $e_{croustage}$ | 0-200 mm              |
| Epaisseur de brique                | $e_B$           | 200 mm                |
| Epaisseur virole (zone de cuisson) | $e_{virole}$    | 30 mm                 |
| Rayon du croutage four             | $r_3$           | 1.675 m               |
| Rayon extérieur du four            | $r_1$           | 1.905 m (avec 0.05 m) |
| Rayon du brique                    | $r_2$           | 1.875 m               |
| Rayon de croutage                  | $r_4$           | 1.475 m               |

Tableau III- 5.Caractéristiques de réfractaire et couches de four

### III.4. Organigramme de la simulation numérique



### **III.5. Conclusion**

Ce chapitre a présenté la méthode utilisée pour le bilan énergétique du four rotatif d'une cimenterie, en utilisant un modèle numérique réalisé avec le langage FORTRAN. Le four rotatif a été décrit ainsi que son fonctionnement, en s'appuyant sur le cas industriel de HOLCIM Algérie. Les données de fonctionnement ont été introduites afin de représenter les conditions réelles de travail. Les schémas du four et l'organigramme du programme FORTRAN ont permis de mieux comprendre la démarche de calcul basée sur les équations du transfert de chaleur et du bilan énergétique. Ce chapitre constitue donc une étape importante pour la suite du travail, puisqu'il permet de préparer l'exploitation et l'analyse des résultats dans le chapitre suivant



**CHAPITRE IV : RESULTATS ET  
DISSCUSION**

### **IV.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir de l'étude du bilan énergétique du four rotatif. L'objectif est d'analyser l'influence de plusieurs paramètres de fonctionnement sur les échanges d'énergie dans le système. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques et diagrammes afin de montrer l'effet de la variation du débit de clinker, débit de gaz bruleur, débit de poussières, du débit des matières premières, de la température du cru, du débit de l'eau du refroidisseur, de la température des gaz en sortie du four et de la température de la virole. Ces paramètres permettent d'étudier leur impact sur l'énergie entrante et sortante du four. Nous présentons aussi les différents transferts de chaleur dans la zone de combustion, ainsi que la répartition de la puissance de combustion dans le four rotatif. Ce chapitre permet donc de mieux comprendre le comportement énergétique du four et d'interpréter les résultats obtenus.

### **IV.2. Résultats et discussion**

L'analyse des résultats a été réalisée à l'aide d'un programme développé sous Fortran, dans le cadre d'une étude d'audit énergétique du four rotatif. Le modèle utilisé est basé sur des données réelles issues de l'industrie cimentière. L'étude consiste à examiner l'influence de plusieurs paramètres de fonctionnement du four, notamment le débit de clinker ( $m_{cl}$ ), le débit des matières premières ( $m_{cru}$ ), la température du cru ( $T_{cru}$ ), le débit de l'eau du refroidisseur ( $m_{water\ cooling}$ ), la température des gaz en sortie du four ( $T_{eg}$ ), la température de la virole ( $T_v$ ) ainsi que le débit de poussière ( $m_{dust}$ ). Une analyse thermique est également réalisée en étudiant la variation de la température de la virole, la température des gaz du four et la température des matières. Cela permet de comprendre leur influence sur les différentes quantités de chaleur échangées dans la zone de cuisson (20 m) du four rotatif. Cette étude permet ainsi d'évaluer le comportement énergétique du four en fonction des conditions réelles de fonctionnement et d'identifier les principaux facteurs influençant les transferts de chaleur

### IV.3. Résultats du bilan énergétique

Le tableau suivant présente le bilan énergétique du four rotatif. Il montre les énergies entrantes et sortantes du système ainsi que leurs pourcentages de répartition.

| Description                                         | Résultats (kJ/kg de clinker) | Pourcentage (%) |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Energie entrant                                     |                              |                 |
| Energie de combustion du gaz                        | $Q_1 = 3756$                 | 96.53           |
| Chaleur sensible du charbon                         | $Q_2 = 0$                    | —               |
| Energie interne du cru                              | $Q_3 = 76$                   | 1.95            |
| Chaleur des matières organiques du cru              | $Q_4 = 0$                    | —               |
| L'énergie transportée par l'eau de refroidissement  | $Q_5 = 59$                   | 1.51            |
| Total                                               | 3891                         | 100             |
| Energie sortant                                     |                              |                 |
| L'énergie chimique pour former le clinker           | $Q_6 = 1795$                 | 46.13           |
| La chaleur perdue par les gaz de sortie             | $Q_7 = 693.47$               | 17.82           |
| Chaleur apportée au four par l'eau du refroidisseur | $Q_8 = 397$                  | 10.2            |
| Perte de chaleur par la poussière                   | $Q_9 = 23$                   | 0.59            |
| Pertes décharge de clinker                          | $Q_{10} = 86$                | 2.21            |
| Pertes par rayonnement de virole                    | $Q_{11} = 362$               | 9.3             |
| Pertes par convection de la virole                  | $Q_{12} = 106$               | 2.72            |
| Erreur de calcul                                    | 428                          | 10.9            |
| Total                                               | 3891                         | 100             |

Tableau IV- 1. Table de bilan énergétique de système étudiée

On remarque que l'énergie principale utilisée dans le système est l'énergie de combustion du gaz avec 96.53 %, qui représente la plus grande part des entrées. Les autres énergies entrantes sont très faibles. Du côté des sorties, la plus grande partie de l'énergie sert à la formation du clinker (46.13 %). Également une partie importante de l'énergie est perdue surtout avec les gaz de sortie (17.82 %) et à travers la virole (par rayonnement et convection).

On observe aussi des pertes non mesurées, ce qui montre que tout le système n'est pas totalement couvert par le calcul. En général, le four rotatif consomme beaucoup d'énergie

et une partie est perdue sous forme de chaleur, malgré une utilisation principale de l'énergie pour la formation du clinker.

L'écart observé dans le bilan énergétique, estimé à 428 kJ/kg de clinker (10 % de l'énergie totale), peut être attribué à plusieurs facteurs, notamment les incertitudes de mesure des débits, des températures, l'utilisation de chaleurs spécifiques constantes indépendantes de la température, les hypothèses simplificatrices adoptées dans le modèle et les pertes thermiques non quantifiées telles que les fuites d'air et les échanges radiatifs non uniformes. Ce niveau d'écart, évalué à 10,9 %, est considéré comme acceptable dans le cadre d'un audit énergétique réalisé en conditions industrielles.

#### IV.4. Étude paramétrique du bilan énergétique

Les figures suivantes présentent l'influence des principaux paramètres tels que le débit et la température sur les différentes énergies du système. Chaque courbe permet d'analyser le comportement thermique du four rotatif.

##### 1. Energie entrant :

##### 1.1. Influence de débit de gaz bruleur sur énergie de combustion (variation du débit de gaz)

La figure IV-1, représente une variation linéaire croissante de l'énergie de combustion kJ/kg-cl en fonction du débit de gaz (kg/s) (le débit de clinker  $\dot{m}_{cl}$ (kg/s) et PIC de gaz est constants). Physiquement, L'augmentation du débit de gaz entraîne une augmentation proportionnelle de la quantité d'énergie thermique introduite dans le système par unité de masse de clinker. Ainsi, plus le débit de combustible est élevé, plus l'apport énergétique au four est important.

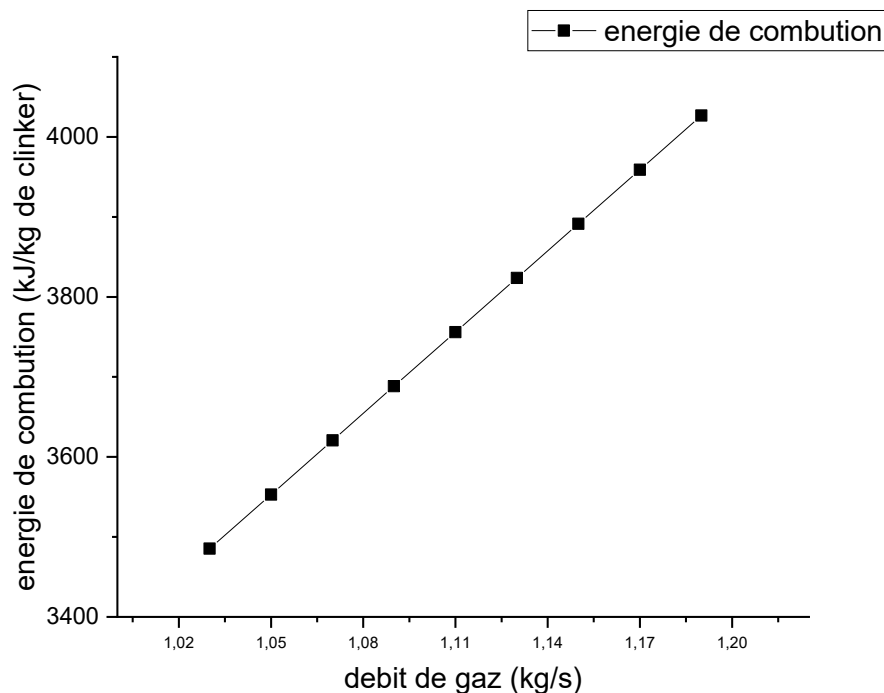


Figure IV- 1. Variation de l'énergie de combustion en fonction du débit de gaz

### 1.2. Influence de température de matières premier sur Energie interne du cru

La figure IV-2, montre une évolution linéaire croissante de l'énergie interne de cru  $Q_3$  (kJ/kg de clinker) en fonction de la température de matières premier  $T_{cru}$  (°C). Cette variation s'explique par la relation de proportionnalité directe entre l'énergie et la température de cru, tel que la chaleur spécifique de cru  $C_{cru}$  (KJ/Kg °C), le débit massique de cru  $\dot{m}_{rm}$  (kg/s) et de clinker (kg/s) étant constants dans ce cas d'étude. L'énergie interne du cru augmente avec la température car l'apport thermique est stocké sous forme d'énergie microscopique liée aux vibrations des particules. Cette augmentation suit une relation proportionnelle à la capacité calorifique du matériau.

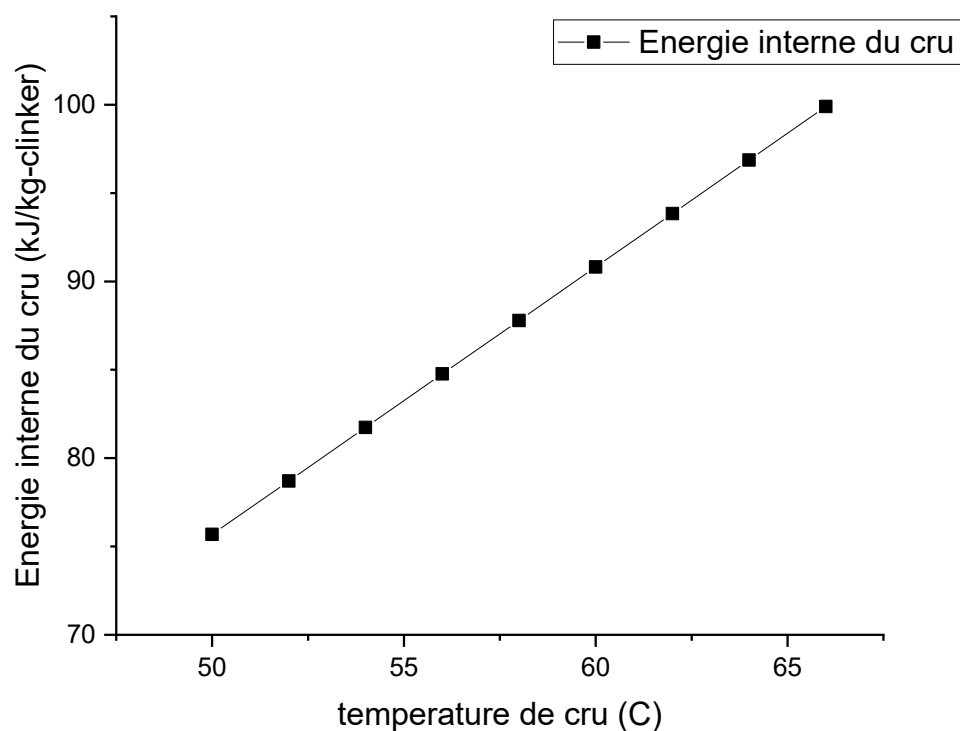


Figure IV- 2. Variation de l'Energie interne de cru en fonction de la température de cru  $T_{cru}$

### 1.3. Influence de débit de la matière premier sur Energie interne du cru

Dans ce cas, on a fixé la température du cru et on a fait varier le débit afin d'étudier son influence sur l'énergie interne.

La Figure IV-3, montre une augmentation linéaire de l'énergie interne du cru en fonction du débit massique. Cela s'explique par le fait que la température est constante donc chaque kilogramme de cru contient la même énergie mais lorsque le débit augmente la quantité totale de matière augmente, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie totale. Physiquement, Plus le débit de cru est élevé plus la quantité totale de matière chauffée est

importante ce qui augmente l'énergie totale contenue dans le flux même si chaque kilogramme de cru possède la même énergie.

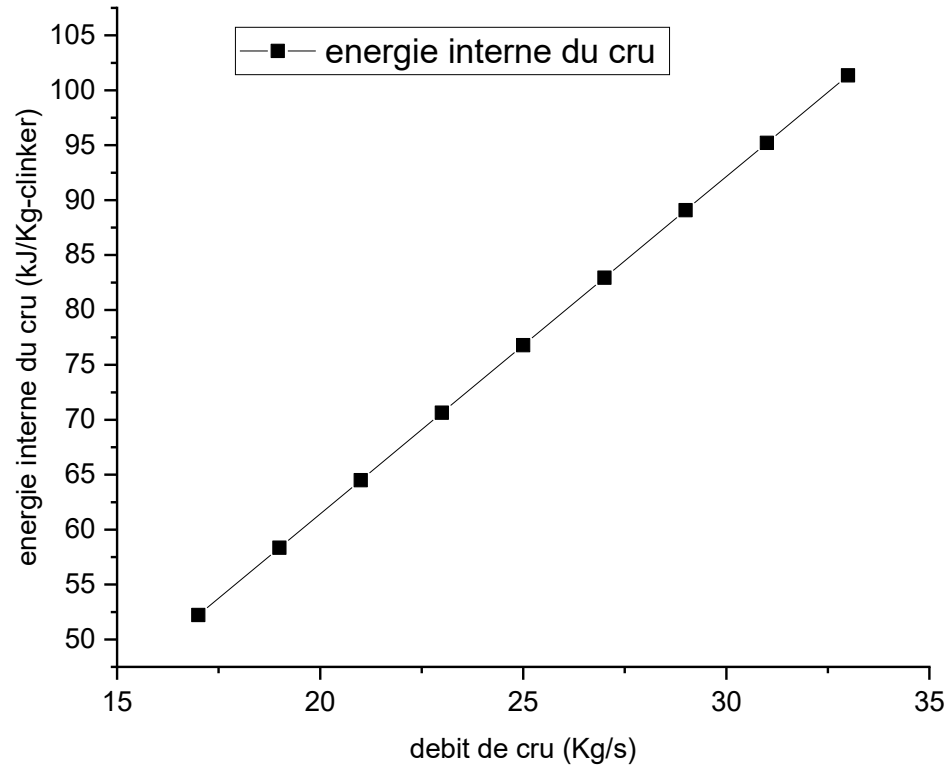


Figure IV- 3.Variation de l'énergie interne du cru en fonction de débit.

#### 1.4.Influence de débit de l'eau sur L'énergie transportée par l'eau de refroidissement

Premièrement, on vérifie l'influence du débit de l'eau sur l'énergie transportée par le refroidisseur en fixant la température (température ambiante de l'eau) et en faisant varier le débit.

La Figure IV-4, montre que l'énergie transportée par le refroidisseur ( $Q_5$  kJ/kg-clinker) augmente avec le débit d'eau. Cette évolution s'explique par le fait que, à température constante, l'augmentation du débit massique d'eau ( $\dot{m}_{\text{water cooling}}$ ) entraîne une augmentation de la quantité de chaleur transportée. Également, plus le débit d'eau est élevé, plus le système de refroidissement est capable d'extraire et de transporter l'énergie thermique.

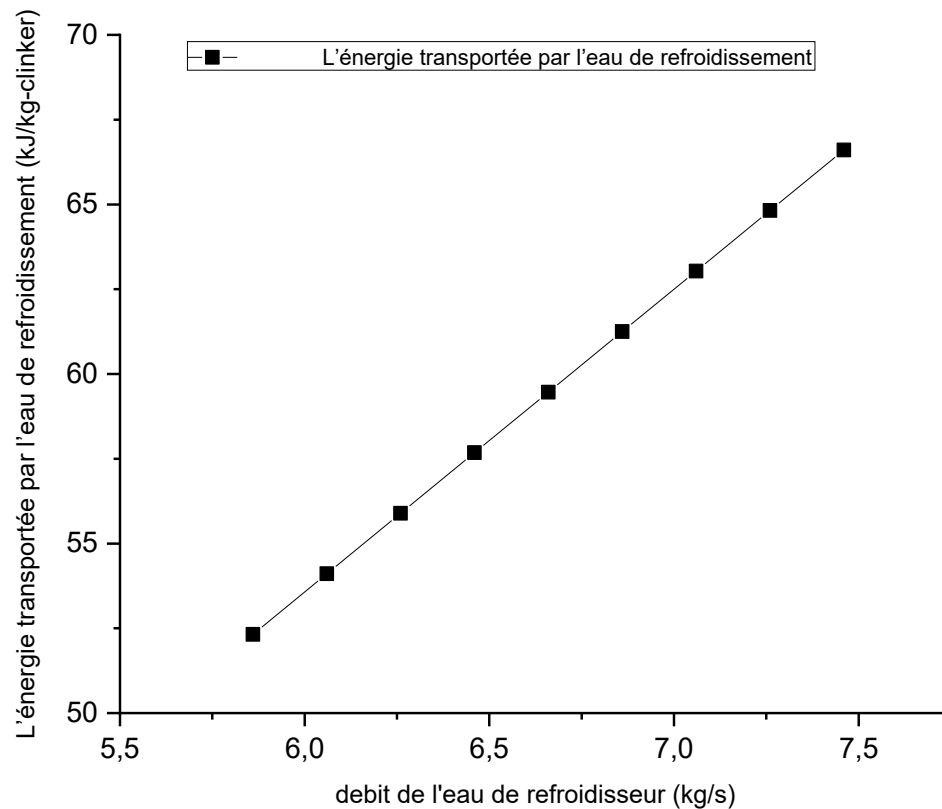


Figure IV- 4. Variation de l'énergie transportée par le refroidisseur en fonction du débit d'eau.

### 1.5. Diagramme de l'énergie entrante du système

Dans cette partie, on présente la répartition de l'énergie entrante du système sous forme de diagramme afin de visualiser les différentes contributions énergétiques.

La figure IV-5, est un diagramme en secteurs qui représente la répartition en pourcentage des énergies du système, On observe qu'une grande partie (en rouge) représente la majorité de l'énergie 96.56% de l'énergie totale et les autres parts (vert et bleu) sont très faibles. Cela montre que l'énergie du système est principalement dominée par une seule contribution, tandis que les autres énergies restent faibles. Donc la source principale d'énergie assure presque tout l'apport énergétique du système est énergie de combustion alors que les autres contributions sont négligeables.

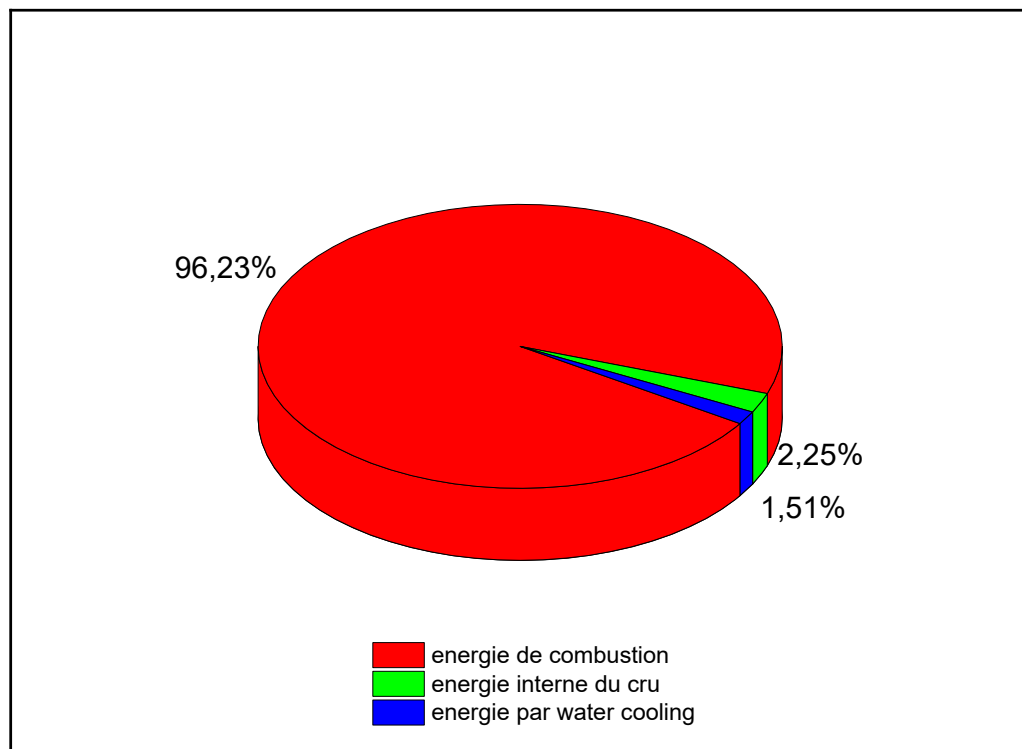


Figure IV- 5.Répartition énergétique des différents flux entrant du système

## 2. Energie sortant

### 2.1. L'énergie chimique nécessaire pour former le clinker

La figure IV-6, montre l'analyse des contributions énergétiques des oxydes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) du clinker. On observe que le **CaO** (2169.60) donne la plus grande partie de l'énergie pour former le clinker, donc il est très important. Les oxydes **MgO** (75.91) et **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** (67.58) donnent aussi de l'énergie mais leur effet est petit. Par contre, **SiO<sub>2</sub>** (518.43) diminue l'énergie totale, donc il a un effet négatif important. **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** (0.57) a un effet négatif mais très faible. En général on peut dire que le **CaO** contrôle l'énergie **Q6(kJ/Kg-clinker)** et le **SiO<sub>2</sub>** vient diminuer un peu cette énergie.

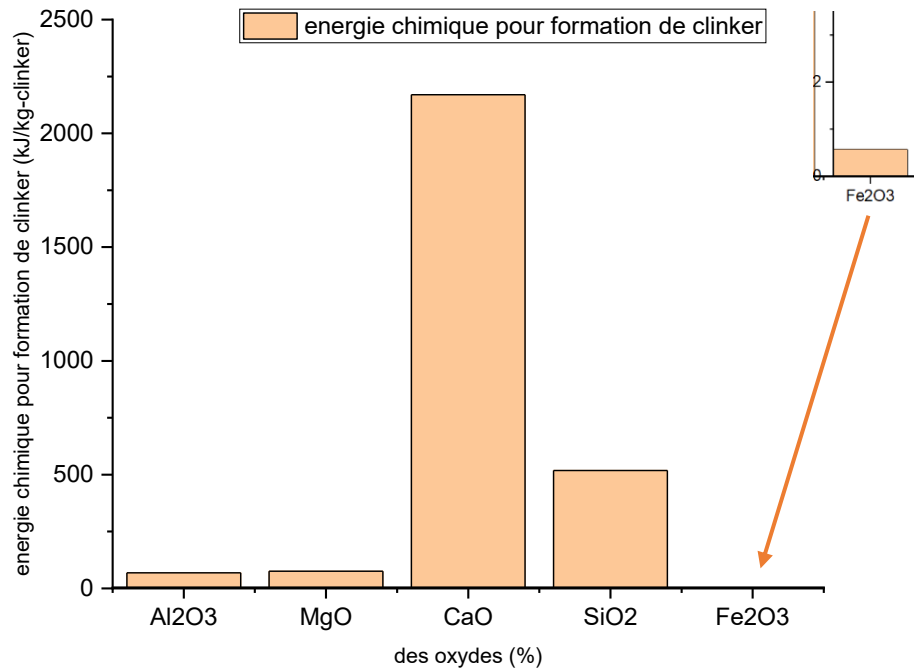


Figure IV- 6. Contribution des oxydes a` l'énergie de formation du clinker.

## 2.2. Influence de température des gaz sortie sur la chaleur perdue

Dans cette partie de calcul la chaleur perdue par les gaz de sortie de système du four. Le débit des gaz de sortie  $\dot{m}_{eg}$  et la chaleur spécifique  $C_{p-eg}$  sont supposant constant et la température des gaz est variée.

La figure IV-7, montre que  $Q_7$  augmente linéairement avec la température  $T_{eg}$  (relation linéaire). Physiquement, quand la température augment donc les gaz contiennent plus d'énergie thermique, ils emportent plus de chaleur hors du four (des pertes ou bien chaleur perdue). Pour améliorer le fonctionnement du four on peut augmenter la récupération de chaleur et réduire l'air de combustion, aussi on améliorer l'isolation du système.

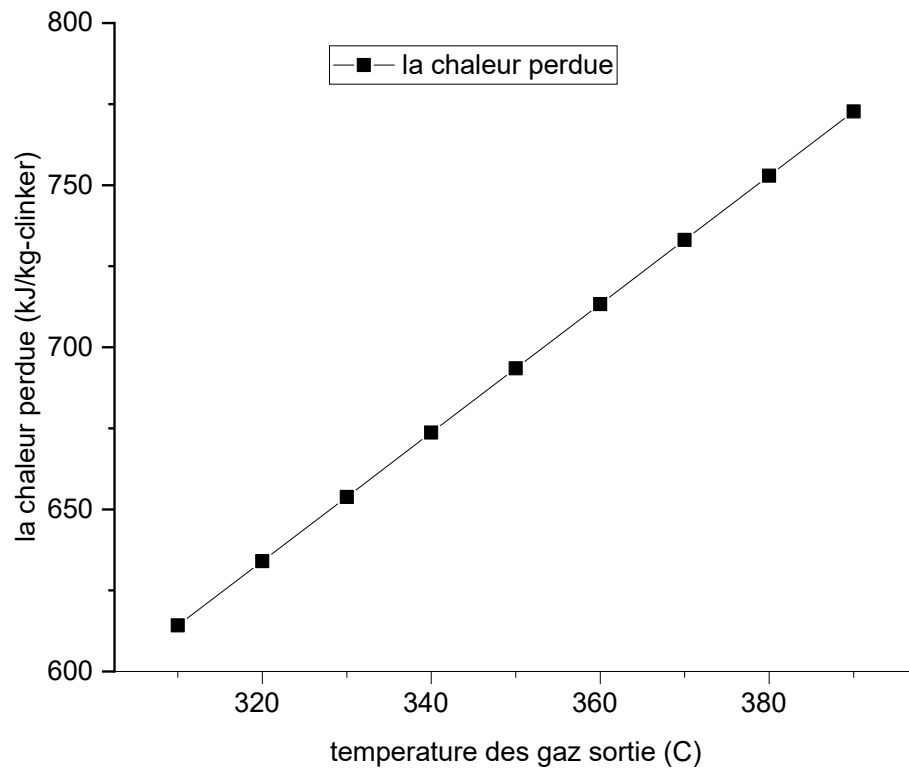


Figure IV- 7.Variation de la chaleur perdue des gaz sortie en fonction de la température  $T_{eg}$

### 2.3. Influence de débit de l'eau sur la chaleur apportée au four par l'air chaud du refroidisseur

La figure IV-8, montre une augmentation lainière de  $Q_8$ (kj/kg-clinker) avec la variation de débit de l'eau car une plus grande quantité d'eau permet d'absorber davantage d'énergie thermique. Toutefois, à des débits élevés cette augmentation peut se stabiliser en raison d'un temps de contact insuffisant entre l'eau et le clinker. Une optimisation du débit d'eau est nécessaire afin de maximiser la récupération de chaleur sans diminuer l'efficacité de l'échange thermique.

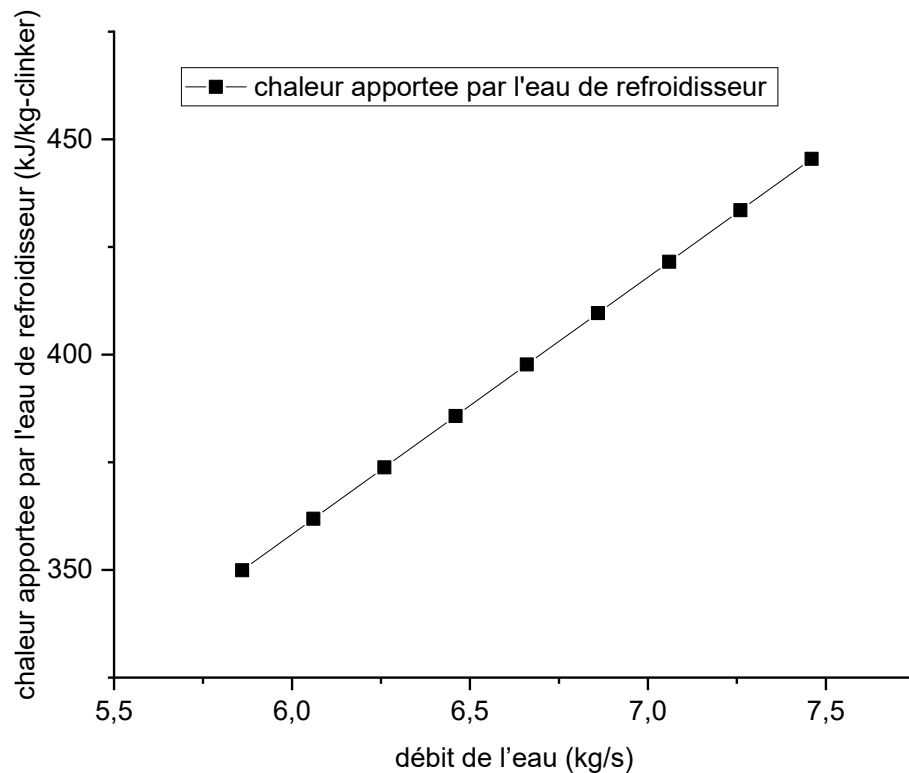


Figure IV- 8.Variation de la chaleur apportée par l'eau de refroidisseur en fonction de débit de l'eau

#### 2.4. Influence de débit poussière sur les Pertes de chaleur dues à la poussière

Dans cette étude, on suppose qu'environ 8 % du débit de clinker est entraîné sous forme de poussières. Afin d'étudier l'effet de ces poussières sur les pertes de chaleur, on considère plusieurs répartitions entre le préchauffeur et le refroidisseur.

Le débit total de poussières reste constant, mais sa distribution change selon les cas étudiés : 4% au préchauffeur et 4 % au refroidisseur, 7% au préchauffeur et 1 % au refroidisseur, 6 % au préchauffeur et 2 % au refroidisseur et 5 % au préchauffeur et 3 % au refroidisseur. Cette variation permet de comparer l'influence de chaque zone sur les pertes thermiques. En effet, les poussières issues du préchauffeur ont un impact plus important sur les pertes de chaleur, car elles sont à une température plus élevée que celles du refroidisseur.

La figure IV-9, montre l'évolution des pertes de chaleur dues aux poussières en fonction du débit de poussières du four. On observe que les pertes augmentent de manière presque linéaire lorsque le débit de poussières augmente. Cela signifie que plus la quantité de poussières transportées est élevée, plus les pertes thermiques sont importantes. Cette augmentation s'explique par le fait que les poussières emportent avec elles une partie de l'énergie thermique du système. Ainsi, une augmentation du débit de poussières entraîne directement une augmentation des pertes énergétiques.

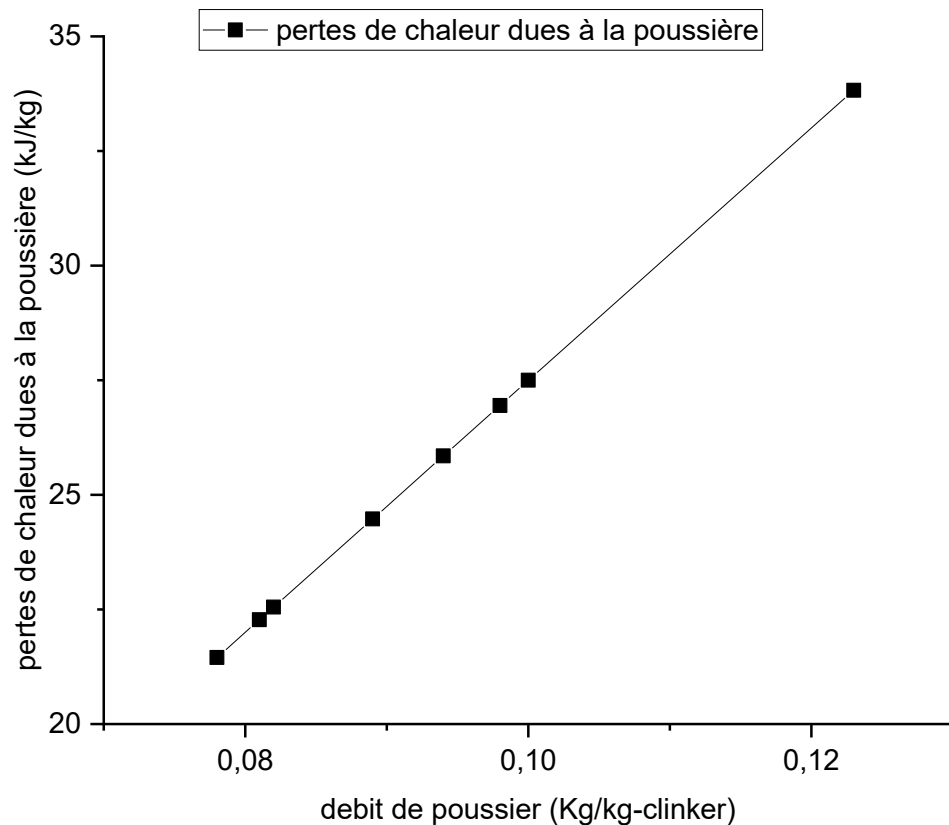


Figure IV- 9. Variation des pertes de chaleur dues aux poussières en fonction de débit de poussières.

### 2.5. Influence de la température de la virole sur les pertes par rayonnement de virole

La figure IV-10, montre une relation directe et fortement ascendante entre la température de surface de la virole et les pertes d'énergie par rayonnement. Lorsque la température de la virole augmente, passant d'environ 573K (300°C) à 750K (477°C), les pertes thermiques grimpent de manière exponentielle, bondissant de près de 92 kJ/kg de clinker à plus de 285kJ/kg de clinker. Cette croissance s'accélère à mesure que le four s'échauffe, ce qui se traduit graphiquement par une courbe de type parabolique présentant une concavité tournée vers le haut.

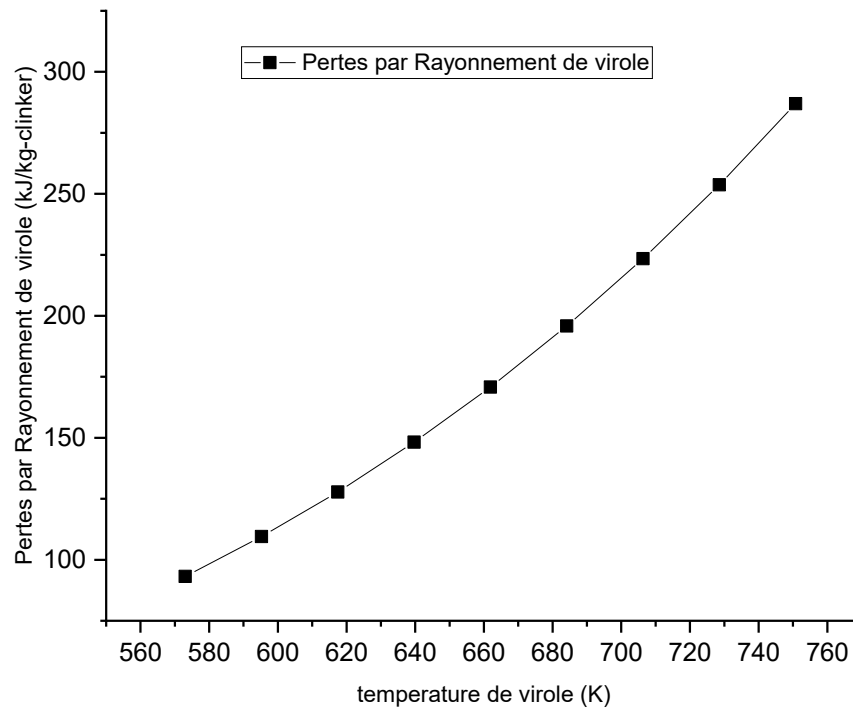


Figure IV- 10. Influence de la température de la virole sur les pertes par rayonnement (kJ/kg de clinker).

## 2.6. Influence de la température de la virole sur les pertes de chaleur par convection

Afin d'évaluer l'impact de la température de la virole sur les pertes par convection de la surface de la virole, une analyse paramétrique a été réalisée en faisant varier la température de surface de la virole.

La figure IV-11, montre une augmentation quasi linéaire des pertes de chaleur par convection avec l'élévation de la température de la virole. En effet, plus la température de surface du four est élevée, plus le gradient thermique entre la virole et l'air ambiant est important, ce qui intensifie les échanges convectifs. Cette tendance confirme que les pertes thermiques sont fortement dépendantes de la température externe du four. Par conséquent, une bonne isolation thermique de la virole apparaît essentielle pour limiter ces pertes et améliorer le rendement énergétique global du système.

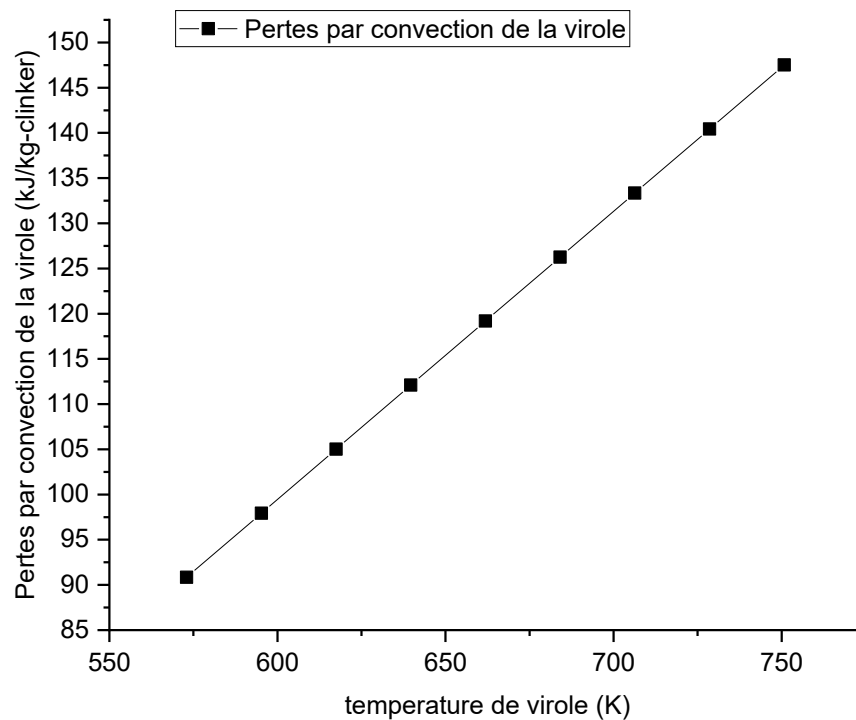


Figure IV- 11. Variation des pertes par convection de la surface de virole en fonction de température

## 2.7. Diagramme énergie sortant de système

Le diagramme circulaire met en évidence le bilan thermique d'un four rotatif de cimenterie, révélant que 46,19% de l'énergie totale introduite est efficacement convertie en énergie utile, c'est-à-dire directement absorbée par les réactions chimiques endothermiques nécessaires à la formation du clinker. À l'inverse, plus de la moitié de l'énergie thermique (53,81%) est dissipée sous forme de pertes. Parmi celles-ci, les pertes majeures proviennent des gaz de sortie, qui emportent 17,84% de la chaleur, et de l'eau du refroidisseur qui en représente 10,21%. Par ailleurs, l'enveloppe structurelle du four est responsable d'une déperdition notable à travers la virole, combinant 9,31% par rayonnement et 2,72% par convection (soit un total de 12,03%). Enfin, le reste du bilan est complété par des pertes non mesurées s'élevant à 10,91%, ainsi que par des fuites mineures liées à la décharge du clinker (2,21%) et aux poussières (0,59%). En somme, ce bilan montre un procédé industriel thermiquement stable, mais souligne un fort potentiel d'optimisation énergétique, notamment par la valorisation de la chaleur des gaz de fumée et par le renforcement de l'isolation de la virole.

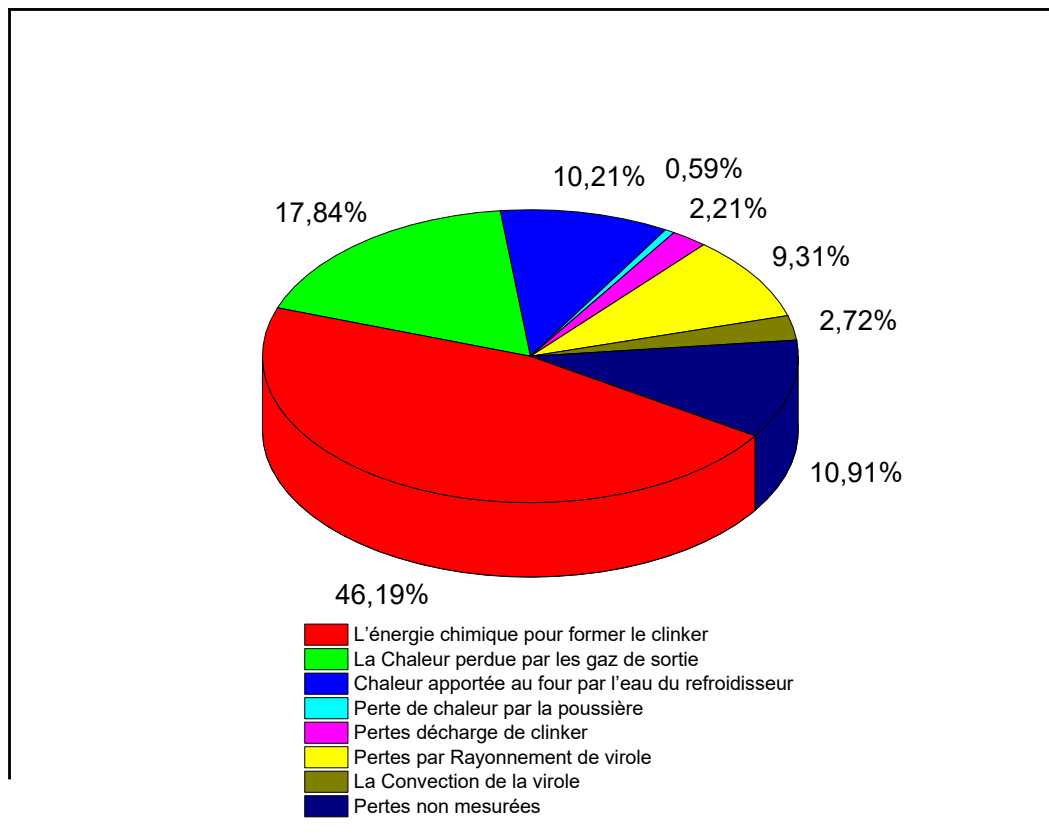


Figure IV- 12. Diagramme des pertes et énergies sortantes du four en pourcentage

#### IV.5. Étude de la distribution des flux thermiques issus de la combustion

Après l'établissement du bilan énergétique global du four rotatif, qui met en évidence les énergies entrantes, sortantes ainsi que les différentes pertes thermiques, une analyse plus détaillée est nécessaire afin de mieux comprendre le comportement interne du système. Dans cette optique, cette étude permet également de comprendre comment la chaleur de combustion est répartie dans la zone de cuisson. Elle met en évidence la distribution de cette énergie sous forme de chaleur transmise à la matière, de chaleur échangée avec les parois du four, ainsi que des pertes thermiques vers l'environnement, notamment à travers la surface de la virole.

### 1. Quantité de chaleur par convection entre gaz et brique

Les résultats du figureIV-13 montrent que le transfert de chaleur entre le gaz et la brique est largement dominé par le rayonnement, représentant environ 382241.5(w), soit 99 % du transfert total, tandis que la convection ne contribue que faiblement de valeur 420.539(w)1 %. Cela confirme que, dans les conditions de fonctionnement du four rotatif, les échanges radiatifs constituent le mécanisme principal de transfert thermique.

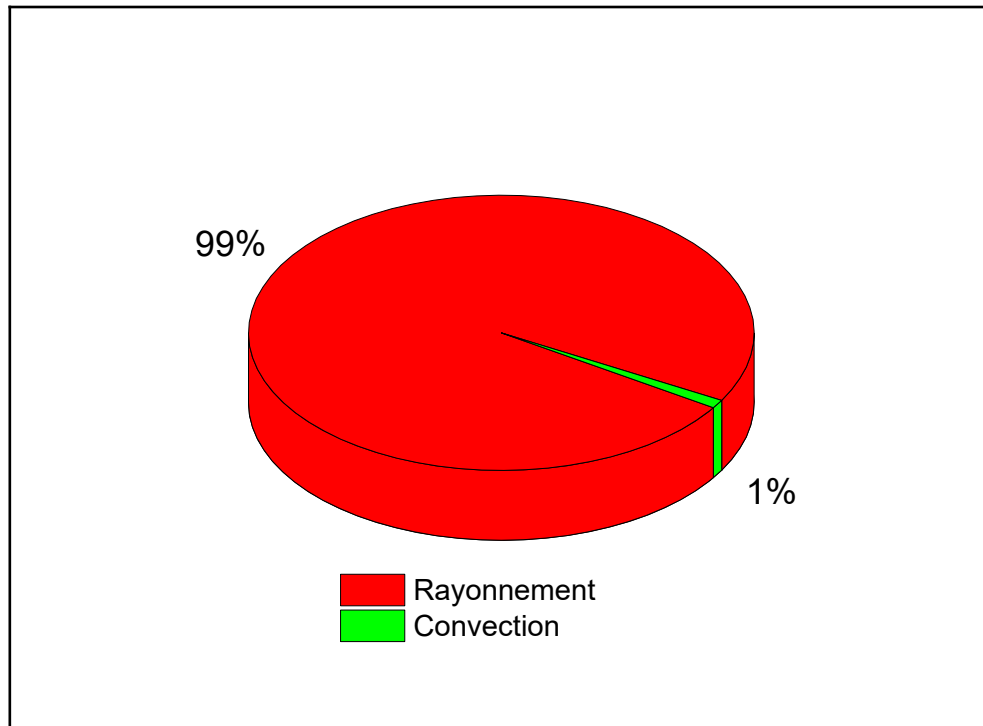


Figure IV- 13.Répartition de la quantité de chaleur échangée entre gaz et brique

### 2. Quantité de chaleur par convection entre gaz et solide

Les résultats du figureIV-14 montrent que le transfert de chaleur entre le gaz et le solide est largement dominé par le rayonnement, représentant environ 1938076(w), soit 99.99 % du transfert total, tandis que la convection ne contribue que faiblement de valeur 146.646(w)0.01%. Cela confirme que, dans les conditions de fonctionnement du four rotatif, les échanges radiatifs constituent le mécanisme principal de transfert thermique.

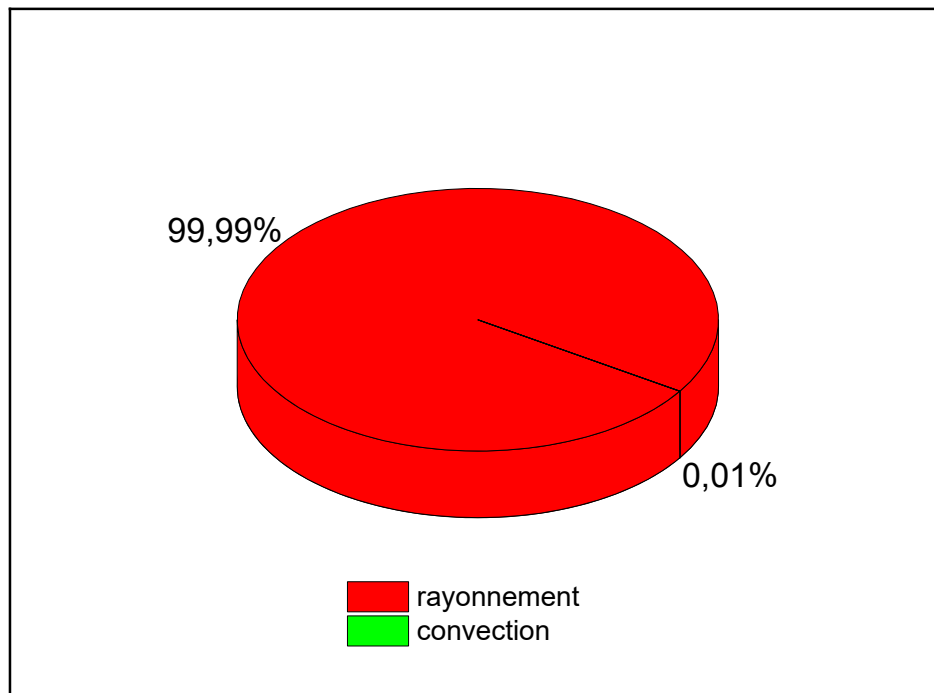


Figure IV- 14. Répartition de la quantité de chaleur échangée entre gaz et solide.

### 3. Quantité de chaleur par conduction entre brique et solide

Les résultats du figureIV-13 montrent que le transfert de chaleur entre la brique et le solide est largement dominé par le rayonnement, représentant environ 80949.16(w), soit 68.56 % du transfert total, tandis que la conduction intervient également de manière notable, avec une contribution de 37124.94(w), soit 31.44%. Cette répartition montre l'importance relative du rayonnement et de la conduction dans les échanges thermiques entre le solide et le brique

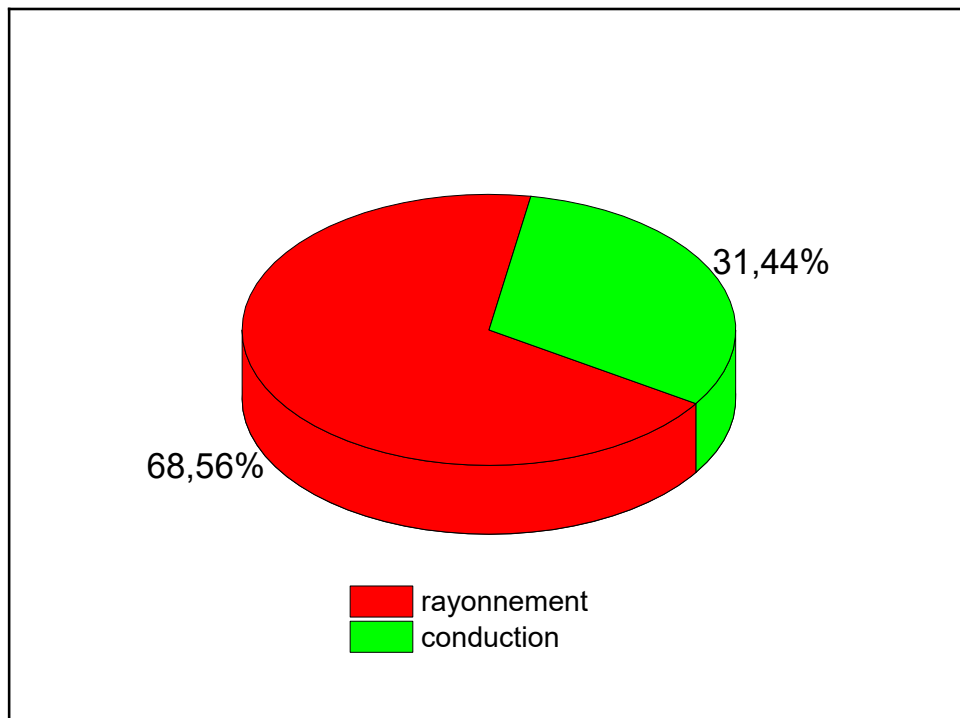


Figure IV- 15. Répartition de la quantité de chaleur échangée entre solide et brique.

#### 4. Les pertes de chaleur perdue vers l'environnement par rayonnement et convection

Le diagramme de répartition des pertes thermiques montre que les échanges de chaleur vers l'environnement sont largement dominés par le rayonnement, avec une contribution de 2503377.78(w), soit de 99.27 %, tandis que la conduction ne représente qu'environ 18500(w), soit de 0.73 %.

Cette forte domination du rayonnement s'explique par les conditions de fonctionnement du four rotatif, où la virole atteint des températures élevées. À ces niveaux de température, le transfert thermique par rayonnement devient le mécanisme principal de dissipation de chaleur vers l'environnement, conformément à la loi de Stefan-Boltzmann, qui montre que l'énergie rayonnée augmente fortement avec la température de surface. En revanche, la conduction reste très faible car le transfert de chaleur à travers les couches solides (virole et réfractaire) est limité par les résistances thermiques des matériaux. Ainsi, la contribution de ce mode de transfert devient négligeable par rapport au rayonnement. Cette répartition met en évidence que les pertes thermiques du four sont essentiellement radiatives. Cela signifie que toute réduction des pertes énergétiques doit principalement agir sur la diminution de la température de surface du four ou l'amélioration de son isolation thermique afin de réduire le rayonnement vers l'environnement.

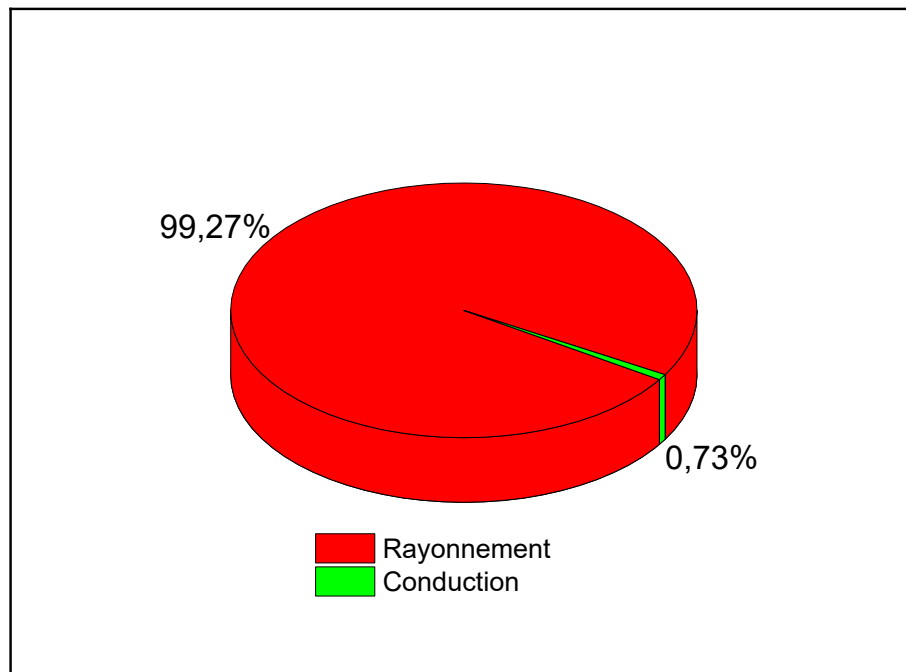


Figure IV- 16.Répartition les pertes de chaleur perdue vers l'environnement

#### IV.6. Conclusion et discussion

Ce chapitre a permis de présenter et d'analyser les résultats issus de l'audit énergétique et de la simulation du four rotatif de cimenterie. L'étude du bilan énergétique global montre que l'énergie est majoritairement apportée par la combustion du gaz naturel, représentant la source principale d'alimentation du système. L'analyse des sorties énergétiques met en évidence que la part la plus importante de l'énergie est utilisée pour la formation du clinker, tandis qu'une fraction significative est dissipée sous forme de pertes thermiques, notamment via les gaz de sortie, l'eau de refroidissement et la virole du four.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'influence des principaux paramètres opératoires sur le comportement énergétique du four

- Influence de débit de gaz bruleur ( $\dot{m}_g$ ) : L'énergie de combustion dans le four rotatif est directement dépendante du débit de gaz brûleur. En effet, l'augmentation du débit de gaz entraîne une augmentation proportionnelle de la quantité de combustible introduite dans le système, ce qui conduit à une élévation de l'énergie de combustion. Ainsi, plus le débit de gaz est élevé, plus l'apport énergétique dans le four est important. Cette augmentation de l'énergie de combustion ne se traduit pas uniquement par une amélioration du transfert thermique utile vers la formation du clinker. Une partie importante de cette énergie supplémentaire contribue également à augmenter les pertes thermiques du système, notamment à travers les gaz de sortie, les échanges par rayonnement au niveau de la virole, ainsi que les pertes par convection. En d'autres termes, une énergie de combustion plus élevée implique également un niveau plus élevé de flux thermiques dissipés. À l'inverse, la réduction

du débit de gaz permet de diminuer l'énergie de combustion injectée dans le four. Cette diminution entraîne directement une réduction des flux thermiques globaux et donc une diminution potentielle des pertes thermiques, à condition que les besoins énergétiques minimaux du procédé soient respectés pour assurer la bonne formation du clinker. Par conséquent, la minimisation des pertes énergétiques ne repose pas uniquement sur une réduction du débit de gaz, mais plutôt sur son optimisation. L'objectif est de fournir une quantité d'énergie suffisante pour assurer la cuisson du clinker, tout en évitant un excès d'énergie qui se transforme en pertes thermiques inutiles. Ainsi, un réglage optimal du débit de gaz permet d'améliorer l'efficacité énergétique globale du four rotatif.

- Influence de la température de matières premier  $T_{\text{cru}}$  : L'augmentation de la température du cru entraîne une augmentation directe de son énergie interne à l'entrée du four rotatif, puisque celle-ci est proportionnelle à la capacité calorifique et à la température du matériau. Ainsi, plus le cru est préchauffé, plus il contient d'énergie sensible avant son introduction dans le système. Cette énergie constitue une contribution importante au bilan énergétique entrant du four. Par conséquent, le contrôle de la température du cru permet d'influencer positivement le bilan énergétique global, en réduisant la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire dans la zone de cuisson et en améliorant l'efficacité thermique du procédé.
- Influence de débit de cru  $\dot{m}_{\text{rm}}$  : lorsque le débit de cru augmente, l'énergie interne totale du cru augmente proportionnellement, à condition que la chaleur spécifique et la température restent constantes. Cela s'explique par le fait qu'une plus grande quantité de matière entre dans le système, transportant davantage d'énergie thermique globale. En revanche, l'énergie spécifique (par kg de clinker) reste inchangée si les conditions thermiques ne varient pas. Par conséquent, le débit de cru influence principalement la quantité totale d'énergie entrante dans le four, ce qui joue un rôle important dans l'équilibre du bilan énergétique global du système.
- Influence de débit de l'eau de refroidisseur  $\dot{m}_{\text{wc}}$  : l'augmentation du débit d'eau de refroidissement entraîne une augmentation directe de l'énergie transportée par ce fluide, à condition que l'enthalpie spécifique reste constante. Cela signifie qu'un débit plus élevé permet d'extraire davantage de chaleur du système, améliorant ainsi la capacité de refroidissement du four. Cependant, cette augmentation peut atteindre une limite au-delà de laquelle l'efficacité d'échange thermique ne s'améliore plus significativement en raison des contraintes de contact thermique et de temps de séjour. Par conséquent, le débit d'eau de refroidissement constitue un paramètre important à optimiser afin de maximiser la récupération de chaleur tout en assurant un fonctionnement stable du système.
- Influence de température des gaz sortie du four  $T_{\text{eg}}$  : l'augmentation de la température des gaz à la sortie du four entraîne une augmentation directe et linéaire des pertes thermiques par les fumées, à débit massique et chaleur spécifique constants. En effet, des gaz plus chauds emportent davantage d'énergie hors du système, ce qui réduit le rendement énergétique global du four rotatif. Cette influence met en évidence l'importance de la récupération de chaleur au niveau de la tour et de la zone des gaz de sortie. Par conséquent, la réduction de la température des gaz, notamment par une

meilleure récupération énergétique ou une optimisation de la combustion, permet de diminuer significativement les pertes thermiques et d'améliorer l'efficacité énergétique du procédé.

- Influence de débit de poussière  $m_{\text{dust}}$  : l'augmentation du débit de poussières entraîne une augmentation directe des pertes thermiques du système, car une plus grande quantité de matière solide est entraînée hors du four en emportant son énergie sensible. Dans le cas étudié, ces poussières représentent environ 8 % du débit de clinker, réparties entre le préchauffeur et le refroidisseur. Plus cette fraction augmente, plus les pertes énergétiques deviennent significatives, puisque chaque particule de poussière transporte une partie de la chaleur du procédé. Cependant, les poussières issues du préchauffeur contribuent davantage aux pertes, car elles possèdent une température plus élevée que celles provenant du refroidisseur. Par conséquent, la réduction du taux de poussières et l'amélioration de leur récupération permettent de diminuer sensiblement les pertes thermiques et d'améliorer le rendement énergétique global du four rotatif.
- Influence de Température de virole  $T_v$  : une influence directe et importante sur les pertes thermiques de surface du four, qui sont constituées des échanges par convection et par rayonnement vers l'environnement. Lorsque la température de la virole augmente, les pertes par convection augmentent de manière quasi linéaire, car le gradient thermique entre la surface du four et l'air ambiant devient plus élevé, ce qui intensifie les échanges convectifs. En parallèle, les pertes par rayonnement augmentent de façon beaucoup plus rapide, de type non linéaire (quasi exponentielle), conformément à la loi de Stefan-Boltzmann, selon laquelle le flux radiatif est proportionnel à  $T_v^4$ . Ainsi, même une légère augmentation de la température de surface entraîne une forte augmentation des pertes radiatives. Par conséquent, l'élévation de la température de la virole conduit à une augmentation significative des pertes thermiques totales (convection + rayonnement), avec une dominance du rayonnement dans le bilan global. Cette observation met en évidence l'importance cruciale de l'isolation thermique du four et du contrôle de la température de surface afin de limiter les déperditions énergétiques et d'améliorer l'efficacité énergétique du système.

**Conclusion Générale**

Ce mémoire a porté sur l'étude analytique du bilan énergétique et thermique d'un four rotatif de cimenterie, appliqué à un cas industriel réel. Un modèle mathématique d'audit énergétique a été développé, combinant les équations des flux de chaleur et les bilans d'énergie du système, en tenant compte des mécanismes de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement) ainsi que des énergies entrantes et sortantes du four.

La résolution numérique du modèle a été réalisée à l'aide du langage Fortran, sur la base de données industrielles réelles. L'étude paramétrique a permis d'analyser l'influence des principaux paramètres opératoires, notamment les débits (gaz, cru, eau, poussières), les températures (cru, gaz de sortie, virole) et les conditions de fonctionnement sur les performances énergétiques du four.

Les résultats obtenus montrent que l'énergie de combustion du gaz constitue la principale source d'énergie du système, tandis que l'énergie utile est principalement destinée à la formation du clinker. Cependant, une part importante de l'énergie est perdue sous forme de gaz de sortie, de pertes radiatives et convectives au niveau de la virole, ainsi que par les poussières et le système de refroidissement. L'analyse des mécanismes de transfert thermique a également mis en évidence la prédominance du rayonnement dans les échanges thermiques, en particulier dans la zone de cuisson et au niveau des pertes vers l'environnement.

L'ensemble des résultats confirme que le modèle développé est cohérent avec le comportement physique du four rotatif et permet de représenter correctement la répartition énergétique du système. Enfin, cette étude met en évidence un potentiel important d'optimisation énergétique, notamment par la réduction des pertes thermiques, l'amélioration de la récupération de chaleur des gaz de sortie et l'optimisation des conditions opératoires afin d'augmenter l'efficacité globale du four rotatif.

### Reference bibliographique

- [1] Ghomri Fouad, « science des matériaux de construction », Cours sur le ciment, Université Aboubekar belkaid, faculté des sciences et sciences de l'ingénieur Département de Génie Civil, 2006.
- [2] Alexandre Govin, « Aspects physico-chimiques de l'interaction bois- ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois », HAL, 2004.
- [3] Lafarge Algérie, « Fabrication de ciment », <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment>.
- [4] Laurent Izoret, Félicien Thiou « La démarche ACV et les ciments bas carbone », Présentation au colloque, Syndicat Française de l'industrie de cimentière ,20 juin 2022.
- [5] B.-Jean Robert Mungyeko Bisulandu, Frederic Marias, « Modélisation de la chimie du clinker et de l'ingénierie du processus de fabrication du Ciment : Etat de l'art », International Journal of Innovation and Applied Studie, ISSN 2028-9324 Vol. 25 No. 2 Jan. 2019, pages 528-551.
- [6] Zouai Khadidja, « Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement », thèse du mémoire magister, Université de Chlef, faculté des sciences et sciences de l'ingénieur Département de Génie Civil ,1 juin 2011.
- [7] Cement Association of Canada, Canadian Cement Industry Sustainability Report ,2010.
- [8] Sébastien Didier-Laurent, « la préparation du cru », Lafarge Algérie, Octobre 2013.
- [9] Sébastien Didier-Laurent, « Le broyage du ciment, choix de briques », Lafarge Algérie, octobre 2013.
- [10] Mullingar. P, Jenkins. B, « industrial and process furnaces principals, design and operations », Livre, Edition Elsevier, USA2008.
- [11] J. Bojanovský, V. Máša, I. Hudák, P. Skryja & J. Hopjan, « Rotary Kiln, a Unit on the Border of the Process and Energy Industry—Current State and Perspectives », Sustainability, 14(21), 13903, 26 October 2022, <https://doi.org/10.3390/su142113903>
- [12] Susana Arad, Victor Arad and Bogdan Bobora, « Advanced Control Schemes for Cement FabricationProcesses », 2008, Livre, University of Petrosani, Carpatcement Holding, Romania, ISBN:978-953-7619-13-8.
- [13] J.J. Del Coz Diaz, F. Rodriguez Mazon, P.J. Garcia Nieto, F.J. Suarez Dominguez, « Design and finite element analysis of a wet cycle cement rotary kiln », Finite Elements in Analysis and Design 39 (2002) 17 – 42, [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00059-8).
- [14] K. I. Janati, A. Dirhar, S. Rakiz, L. Bousshine, « Déformabilité à chaud d'un four rotatif pour Cimenteries Expérimentation et simulation numérique », 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Lyon, France, 24–28 août 2015, hal-03446229.
- [15] R. Saidur , M.S. Hossain , M.R. Islam , H. Fayaz , H.A. Mohammed, « A review on kiln system modeling », Volume 15, Issue 5, June 2011, Pages 2487-2500,DIO : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.020>.

- [16] Maxime Piton, « Récupération de la chaleur fatale : application aux fours rotatifs », Génie des procédés. Ecole des Mines de Nantes, 2015, Français, (NNT : 2015EMNA0235), (tel-01250334).
- [17] S. El Fakkoussi, H. Moustabchir, A. Elkhalfi « Analyse analytique et numérique du système calage du bandage four cimenterie », Article de conférence, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, 13<sup>ème</sup> Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017.
- [18] Khalid I. Janati, Lahbib Bousshine, « Contribution à l'Etude du Comportement ThermoE-lastique de la virole des Fours Rotatifs des Cimenteries », Article de conférence, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, Université Hassan II Casablanca, Maroc. 23<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017.
- [19] Malek Alhajjaji, Brahim Boubeker, Mohamed Idiri, Safia Eljoumani, Abdellah Zamma, « Développement d'une nouvelle solution de maintenance préventive dans l'industrie du ciment », Faculté des sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc, Vol 1 N°1 Mars 2016, <https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/reinnova-v1i1.6472>
- [20] Maria Margarida Mateus, Teresa Neuparth, Duarte Morais Cecílio, « Modern Kiln Burner Technology in the Current Energy Climate: Pushing the Limits of Alternative Fuel Substitution », 2023, 6(2), 74, <https://doi.org/10.3390/fire6020074> .
- [21] Mohamed Nail, « caractérisation, contrôle dynamique et acoustique d'une flamme de diffusion en vue de l'optimisation de la transition de matière dans un four de cimenterie », thèse de mémoire magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Technologie département de Génie Mécanique, 28 novembre 2021.
- [22] P. Joulain, M.J. Cottreau, « Mesures de température de flammes », vol35, pages (309-323), 1996, DIO :10.1016/s0035-3159(99)80074-9
- [23] Akbari Koosha, Ghayebloo Abbas, Yousefi Mohammad Reza, « Identification of Coating Thickness in Cement Rotary Kiln », Iran. J. Chem. Chem. Eng, Vol. 41, No. 5, 2022, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, I.R. IRAN.
- [24] Kaustubh S. Mujumdar, Amit Arora, Vivek V. Ranade, « Modeling of Rotary Cement Kilns: Applications to Reduction in Energy Consumption », Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol 45, Issue 7, 2006, 2315-2330.
- [25] K. S. Mujumdar, V. V. Ranade, « simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional model », Chemical Engineering Research and Design, mars 2006, 84(A3) : 165–177, DOI : 10.1205/cherd.04193.
- [26] Tahsin Engin, Vedat Ari, « Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems-A case study », Department of Mechanical Engineering, University of Sakarya, Esentepe Campus, 54187 Sakarya, Turkey, 46 (2005) 551–562, DOI: 10.1016/j.enconman.2004.04.007
- [27] J. P. Gorog, T. N. Adams, and J. K. Brimacombe, « Heat Transfer from Flames in a Rotary Kiln », Volume 14, pages 411-424, 1983, <https://doi.org/10.1007/BF02654360>.
- [28] P.V. Barr, J.K. Brimacombe, and A.P. Watkinson « A Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln" Part I. Pilot Kiln Trials », Metall Trans, Volume 20, pages 391-402, JUNE 1989, <https://doi.org/10.1007/BF02696991>

- [29] P.V. Barr, J.K. Brimacombe, and A.P. Watkinson « A Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln" Part II. Development of the Cross-Section Model », Metall Trans volume 20, 403–419 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF02696992>
- [30] Xiao Xingguo, LI Jiaxin, Cao Tongyou, Xiao Zeqiang, « Mathematical Model for the Rotary Kiln Process and Its Application », J Mater Sci Technol, 1991, volume 7(1): 55-64.
- [31] A. A. Boateng and P. V. Barr, « A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed», Volume 39, Issue 10, July 1996, Pages 2131-2143, 2145-2147, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00272-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00272-3)
- [32] Shaleen Khurana, Rangan Banerjee , Uday Gaitonde, « Energy balance and cogeneration for a cement plant », Applied Thermal Engineering 22 (2002) 485–494, DOI:10.1016/S1359-4311(01)00128-4
- [33] Oscar Alberto Ortiz, N. D. Martínez, Carmen Alicia Mengual, Lucia M. Petkovic « Performance analysis of pilot rotary kiln for activated carbon manufacture, using a steady state mathematical model », July 2003, Latin American Applied Research - An international journal, volume 33(3):295-300.
- [34] S.-Q. Li, L.-B. Ma, W. Wan, Q. Yao, « A Mathematical Model of Heat Transfer in a Rotary Kiln Thermo-Reactor», 29 November 2005, pages 1480-1489, <https://doi.org/10.1002/ceat.200500241>.
- [35] Fabian Herz, Yogesh Sonavane, Eckehard Specht, « Analysis of local heat transfer in direct fired rotary kilns », March 1, 2011, pp. 175-182; 8 pages, <https://doi.org/10.1115/IHTC14-22086>
- [36] Phahath Thammavong, Marie Debaq, Stéphane Vitu, Marc Dupoizat, « Experimental Apparatus for Studying Heat Transfer in Externally Heated Rotary Kilns», Chem. Eng. Technol. 2011, 34, No. 5, 707–717, <https://doi.org/10.1002/ceat.201000391>
- [37] Xiaoyan Yang, Yougang Xiao, Xianming Lei, « Mathematical model for heat transfer simulation of rotary alumina kiln », Applied Mechanics and Materials Vols. 423-426 (2013) pp 881-884, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.881.
- [38] K. Moussi, D. Touil, M. Fedailaine et S. Belaadi , « Modèle d'échange d'énergie et de matière dans un four rotatif, incluant la combustion », 2015, Revue des Energies Renouvelables Vol. 18 N°143 – 152, <https://doi.org/10.54966/jreen.v18i1.492>.
- [39] b.-jean robert mungyeko-bisulandu, guy wanlongo-ndiwulu, charles pongo-pongo, « Analyses des paramètres affectant la consommation d'énergie dans un four rotatif cimentier et solutions possibles d'optimisation énergétique », May 2015 Congrès Français de Thermique, La Rochelle, France. (hal-02569730)
- [40] Daya Ram Nhuchhen, Prabir Basu, Bishnu Acharya, « Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier », Volume 102, November 2016, Pages 64-76, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.011>
- [41] Hamed Shahin, Saeid Hassanpour, Ahmad Saboonchi, « Thermal energy analysis of a lime production process Rotary kiln, preheater and cooler » , Volume 114, 15 April 2016, Pages 110-121, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.017>

- [42] Alex stephane bongo njeng, Stephane Vitu, Marc Clausse, Jean-louis dirion, Marie debacq, « Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns: experimental Logo determination and modeling », 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024>
- [43] Adrian Gunnarsson, Klas Andersson, Bradley R Adams, Christian Fredriksson « Full-scale 3D-modelling of the radiative heat transfer in rotary kilns with a present bed material », Volume 147, February 2020, 118924, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118924>
- [44] Jos'e J. Fierro , C'esar Nieto-Londono , Ana Escudero-Atehortua , Mauricio Giraldo , Hussam Jouhara , Luiz C. Wrobel , « Techno-economic assessment of a rotary kiln shell radiation waste heat recovery system », Volume 23, 1 June 2021, 100858, Doi : 10.1016/j.tsep.2021.10085
- [45] Baby-Jean Robert Mungyeko Bisulandu , Florian Huchet « Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications », 25 February 2023, 11963, Volume 221, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637
- [46] A. Ustaoglu, M. Alptekin, M. Emin Akay, « Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered ORC -organic Rankine cycle-», Applied Thermal Engineering (2016), DOI [10.1016/j.applthermaleng.2016.10.053](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.053)
- [47] Maxime Piton, « Récupération de la chaleur fatale : application aux fours rotatifs. Génie des procédés », Ecole des Mines de Nantes, 2015. Français. (NNT : 2015EMNA0235). (tel-01250334),
- [48] Yoboué Guillaume N'zi, « Élaboration d'une plate-forme de calculs numériques d'un modèle d'état à la base d'une approche phénoménologique, cas d'un four rotatif de clinker », 2014, thèse doctorat en génie mécanique, Université Laval.
- [49] K. S. Mujumdar<sup>2</sup> and V. V. Ranade<sup>1\*</sup>, « Simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional mode », Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84(A3) : 165–177, DOI : <https://doi.org/10.1205/cherd.04193>.
- [50] Viola, A., R. Baratti et A. Teodosi, « Analysis and simulation of the alumina Calcination process in a rotary kiln », Light Metals 1986., vol. 2, p. 179–189.
- [51] S. Tscheng et A. Watkinson, « Convective heat transfer in à rotary kiln » (1979). Canadian journal of Chemical Engineering, vol. 57, n° 4, p. 433-443, <https://doi.org/10.1002/cjce.5450570405>.
- [52] F. Kreith, W. Black, « basic heat transfer », Harper & Row, New York, USA, (1980).
- [53] Lyons, J., H. Min, P. Parisot et J. Paul, « Experimentation with a wet-process rotary cement kiln via the analog computer », 1962, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 1, n°1, p. 29–33.
- [54] Ketslakh, G. et I. Tsibin. 1978, « Heat transfer by radiation in rotary kilns», Refractories, vol. 19, no 1-2, p. 17 – 19, ISSN 00343102, DIO : <https://doi.org/10.1007/BF01281405>.
- [55] Hottel, H. et A. Sarofim. 1967, Radiative transfer, McGraw-Hill, New York, USA, DIO: <https://doi.org/10.1002/aic.690150504>.
- [56] J. Perron, « Modélisation mathématique d'un four de calcination du coke de pétrole », thèse de doctorat, 1989, Université de Montréal, Montréal, Canada.

- [57] Tscheng, S. et A. Watkinson. 1979, « Convective heat transfer in a rotary kiln », Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 57, no 4, p. 433 – 443, DIO : <https://doi.org/10.1002/cjce.5450570405>.
- [58] Sass, A. 1967, « Simulation of heat-transfer phenomena in a rotary kiln », Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 6, no 4, p. 532–535, DIO: <https://doi.org/10.1021/i260024a022>.
- [59] Lyons, J., H. Min, P. Parisot et J. Paul. 1962, « Experimentation with a wet-process rotary cement kiln via the analog computer », Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 1, no 1, p. 29–33, DIO : <https://doi.org/10.1021/i260001a005>.
- [60] Ketslakh, G. et I. Tsibin. 1978, «Heat transfer by radiation in rotary kilns», Refractories, vol. 19, no 1-2, p. 17 – 19, ISSN 00343102, DIO: <https://doi.org/10.1007/BF01281405>.
- [61] K.S. Mujumdar, V.V. Ranade, «Modeling of Rotary Cement Kilns: Applications to Reduction in Energy Consumption», 2006, Industrial Flow Modeling Group, National Chemical Laboratory, Pune 411008, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, No. 7, DIO: <https://doi.org/10.1021/ie050617v>.
- [62] Christopher Csernyei, Anthony G. Straatman, «Numerical modelling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling», November 2016 International Journal of Heat and Mass Transfer, 102:610-621, DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.058](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.058).
- [63] Theodore Hanein, Frederik P. Glasser, « One-dimensional steady-state thermal model for rotary kilns used in the manufacture of cement » Advances in Applied Ceramics, 2017 VOL.116, NO.4, 207-215, DIO: [10.1080/17436753.2017.1303261](https://doi.org/10.1080/17436753.2017.1303261).
- [64] A. Atmaca et Yumrotas, «Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry», 2014, Journal homepage, DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.038>.
- [65] L. Feng, R. Marc, W. Shumao, « Energy efficiency of China's cement industry », Volume 20, Issue 7, Juillet 1995, Pages 669-681, [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00002-X](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00002-X).
- [66] S. Khurana, R. Banerjee, U. Gaitonde, « Energy balance and cogeneration for cement plant », Applied Thermal Engineering, April 2002, vol 22 part 5, 485-494, DIO : [10.1016/S1359-4311\(01\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00128-4).
- [67] A. Pahuja, « Energy auditing and monitoring in the cement industry », Chapter de livre, Energy Conservation and Environmental Control in Cement Industry, vol. 2, Part 2, Published by Akademia Books International, ISBN : 81-85522-05-7, 1996. p. 670–94.
- [68] Vedat Ari, « Energetic and exergetic assessments of a cement rotary kiln system », Department of Mechanical Education, Technical Educational Faculty, Sakarya University, Esentepe Campus, 54187, Sakarya–Turkey, Vol. 6(6), pp.1428-1438, 18 March, 2011, DOI: 10.5897/SRE11.030.
- [69] Tahsin Engin, Vedat Ari, « Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems-A case study », Department of Mechanical Engineering, University of Sakarya, Esentepe Campus, 54187 Sakarya, Turkey, 46 (2005) 551–562, DOI: [10.1016/j.enconman.2004.04.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.007)

- [70] Sepehr Sadighi, Mansoor Shirvani, Arshad Ahmad, « Rotary Cement Kiln Coating Estimator: Integrated Modelling of Kiln with Shell Temperature Measurement », the canadian journal of chemical engineering, Volume 89, Fevrier 2011, <https://doi.org/10.1002/cjce.20365>
- [71] Kurt E. Peray, « Cement manufacturer's handbook », New York, NY: Chemical Publishing Co, 1979, ISBN 0-8206-0245-0.
- [72] Durga Madhab Padhy, Shaikh Mohammed Farman, Shruti Kumari, Mukesh Kumar Vishwakarma, Omji Anand, Nikhil Dubey, T Thirumurugan, « Over Pressurization of Rotary Kiln Shell Due to WHRB Tube Leakage », ASM International 2026, <https://doi.org/10.1007/s11668-026-02437-2>
- [73] Y. A. Cengel, « Heat transfer », A practical approach (2nd ed.), book, 2003, New York, NY: McGraw-Hill.
- [74] Habib Boutaleb, « Initiation au Langage de Programmation Fortran 90 », Notes de cours, Université Dr Tahar Moulay de Saïda, Faculté des Sciences, 2018–2019.
- [75] Dragos B. Chirila, Gerrit Lohmann, « Introduction to Modern Fortran for the Earth System Sciences », 2015, <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/i260001a005>.
- [76] Michaut, Claire, « Cours de Fortran 90/95 », Meudon Cedex : Observatoire de Paris, LUTH (Laboratoire Univers et Théories), Master Recherche (M2), Spécialité Astronomie et Astrophysique, Année 2005–2006.