



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

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

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département
MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique industrielle

Spécialité : Maintenance en électromécanique

Thème

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

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom Prénom

TOMUSANGE Rodney Stanley et TOUIL Lakhdar

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Lalaoui Mohamed El Amine	MCA	IMSI	Président
BOUHAFS Mohammed	MCA	IMSI	Encadreur
Achache El Habib	MCA	IMSI	Examineur

2024/2025

REMERCEMENTS

*En tout premier lieu, nous tenons à remercier **ALLAH** Le sublime, qui nous facilite notre parcours pour réaliser ce modeste travail de recherche.*

*À travers ce modeste travail, nous adressons nos sincères remerciements à M. **BOUHAFS Mohammed** pour ses précieux conseils. Ce fut un privilège de travailler à vos côtés et d'apprécier vos qualités humaines et professionnelles. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir nous ont profondément impressionnés. Nous exprimons ici notre sincère respect et notre admiration pour vos qualités scientifiques et humaines.*

Un remerciement chaleureux et un hommage vivant s'étendent aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre mémoire de fin d'étude, et de participer à sa soutenance.

Nous exprimons sincèrement un grand merci aux enseignants de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle, qui ont enrichi généreusement nos esprits par des connaissances et des acquis assez marquants et intéressants.

*Un grand merci à **Ouahrani Ghada** pour l'aide et les connaissances qu'elle nous a apportées lorsque nous avons eu des difficultés à comprendre tout ce qui concerne le langage Fortran.*

À la fin, nous aimons aussi adresser un remerciement honnête à nos chers collègues pour les bons moments et les souvenirs inoubliables que nous avons passés ensemble pendant les cinq ans de formation.

Dédicace

Dans ce chapitre de ma vie qui se referme, vous avez été les étoiles qui illuminé mon chemin à travers les hauts et le bas vous étiez là pour moi vous étiez la force qui à faciliter ma route vers le succès, ma source d'inspiration dans cette quête de connaissance, cette détermination pour chacun de vous. Je tiens à dédier ce mémoire à plusieurs personnes qui, chacune à leur manière, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

À nos mères bien-aimées **DJAHIEL Hafida** et **NANYANZI Maria**, Votre amour indéfectible, vos sacrifices et votre confiance inébranlable en nous ont été la pierre angulaire de notre parcours. À travers chaque défi et chaque succès, votre force et vos encouragements nous ont guidés. Cette thèse reflète autant votre dévouement que le nôtre, et nous vous sommes éternellement reconnaissants pour les valeurs, la résilience et la détermination que vous nous avez inculquées. Avec tout notre amour et notre gratitude, ceci est pour vous.

À nos pères **TOUIL Abderrahmane** et **TOMUSANGE Steven**, qui nous ont inculqué les valeurs du travail, de la persévérance et de l'humilité. Vos sacrifices et vos efforts nous ont permis de nous concentrer sur nos études et de mener à bien ce projet. Vous êtes notre plus grande source d'inspiration et de motivation.

À nos amis, pour leur amitié, leur humour et leur soutien moral. Vous nous avez rappelé l'importance de faire des pauses, de rire et de profiter des moments simples, même lorsque la charge de travail semblait écrasante. Merci d'avoir été là à nos côtés, pour célébrer les petites victoires et surmonter les grandes difficultés.

À nos professeurs et encadrant Monsieur **BOUHAFS Mohammed**, pour leur guidance et leur patience. Vos précieux conseils et votre expertise ont été essentiels dans la réalisation de ce mémoire. Vous avez su me diriger avec bienveillance et rigueur, me permettant ainsi de développer une pensée critique et structurée.

Enfin, nous dédions cet ouvrage à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont encouragés et ont cru en nous. Vos mots de soutien, vos gestes de gentillesse et votre confiance nous ont permis de conserver la motivation nécessaire pour mener à bien ce projet.

Merci à tous.

Touil & Tomusange

Résumé

Ce mémoire présente une analyse approfondie du bilan thermique et énergétique d'un four rotatif à ciment, à l'aide de modèles analytiques développés en Fortran. Les objectifs principaux sont de quantifier les flux de chaleur, d'identifier les inefficacités énergétiques, de réduire la consommation d'énergie par unité de matière traitée et de proposer des stratégies visant à améliorer la performance globale du four. L'étude met en évidence l'importance d'une analyse thermique détaillée combinée à une modélisation numérique pour détecter et corriger les inefficacités. Les recommandations issues de la modélisation montrent un potentiel significatif d'économies d'énergie. La mise en œuvre des solutions proposées devrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique ainsi que la performance opérationnelle du four.

Mots clés : Four rotatif, bilan thermique, les flux de chaleur, modèles analytiques, Fortran, consommation d'énergie.

Abstract

This thesis presents a comprehensive analysis of the thermal and energy balance of a cement rotary kiln, utilizing analytical models developed in Fortran. The primary objectives are to quantify heat flows, identify energy inefficiencies, reduce energy consumption per unit mass of processed material, and recommend strategies to enhance the kiln's overall performance. The study highlights the value of integrating detailed thermal analysis with computational modeling to uncover and address inefficiencies. Modeling-based recommendations demonstrate the potential for significant energy savings. Implementing the proposed measures is expected to improve both the energy efficiency and operational reliability of the kiln.

Key words: Rotary kiln, heat balance, heat flows, analytical models, Fortran, energy consumption.

SOMMAIRE

List des figures	viii
Liste des tableaux.....	x
Nomenclature	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : Généralité sur le ciment et four rotatifs.....	2
I. Généralité sur le ciment	3
1. Définition	3
2. Types de ciment :	3
3. Matières premières du ciment.....	4
4. Caractéristiques et classifications du ciment	4
5. La fabrication du ciment	5
5.1 Extraction des matières premières :	7
5.2 Préparation des matières premières :	7
5.3 Broyage du cru :.....	8
5.4 Préchauffage et pré-calcination :	8
5.5 Formation du clinker :	8
5.6 Broyage du clinker :.....	9
5.7 Stockage et conditionnement :	9
5.8 Salle de contrôle et contrôle qualité :	9
II. Les fours	11
1. Définition de four	11
2. Le four rotatif	11
3. Types des fours rotatifs :.....	12
4. Principe de fonctionnement des fours rotatifs	12
5. Les fonctions principales du four rotatif :	13
6. Conception	13
6.1 Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie.....	14
6.1.1 Les briques dans le four rotatif de ciment :	14
6.1.2 Le brûleur :	15
6.1.3 Croûtage :	17
6.2 Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie :	18
6.2.1 La virole :	18

6.2.2 Le Galet :	19
6.2.3 Station de bandage :	20
6.2.4 Système d'entraînement du four :	21
6.2.5 Système de butée :	21
6.2.6 Transmission pignon/couronne	22
7. Positionnement du four :	22
8. Conclusion.....	22
CHAPITRE 2 : Flux de chaleur et modèles mathématiques.....	23
1. Introduction	24
2. Importance du flux de Chaleur dans les Fours Rotatifs.....	24
3. Recherche bibliographique	24
4. Analyse thermodynamique du four rotatif :	27
5. Mécanismes de transfert de chaleur dans un four rotatif.....	27
5.1 Transfert de chaleur par conduction dans le four :.....	27
5.2 Transfert de chaleur par convection :	28
5.3 Transfert de chaleur par rayonnement :	28
6. Modèles mathématiques	28
6.1 Le flux de chaleur entre le gaz(G) et les briques réfractaires/paroi interne(W) [47] :	29
6.2 Le flux de chaleur entre le gaz(G) et le solide/lit(B) : [47]	30
6.4 La perte de chaleur du four vers l'environnement est résolue par ;.....	34
7. Conclusion.....	35
CHAPITRE 3 : Modélisation du flux de chaleur avec FORTRAN	36
1. Introduction	37
2. Présentation du logiciel	37
4. Importance de Fortran	38
5. Fonctionnement de Fortran.....	39
6. La conception d'un programme Fortran	40
7. Organisation d'un programme FORTRAN	40
8. Modélisation du flux de chaleur avec Fortran	41
8.1 Données dimensionnelle et analytiques du four rotatif	41
8.2 Organigramme du processus de fonctionnement de notre programme	46
9. Avantages de Fortran pour les analyses du flux de chaleur	47

10. Conclusion.....	47
CHAPITRE 4: Résultats et discussion	48
1. Introduction	49
2. Résultats et discussion.....	49
3. Etude de cas et résultat :	50
3.1 Effet de la température de gaz	50
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.	50
- Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgw} entre les gaz et les briques.	51
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.....	52
- Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide.....	53
3.2 Effet de la température du solide	54
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.....	54
- Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide.....	55
- Le flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les briques et le solide.	56
- Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rwb} entre les briques et le solide.....	57
3.3 Effet de la vitesse axiale	58
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.	58
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.....	59
3.4 Effet de la vitesse angulaire	60
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.	60
- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.....	61
3.5 Effet du coefficient de transfert thermique hbs.....	62
- Le flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les briques et le solide.	62
3.6 Effet de la température de la virole.....	63
- Le flux de chaleur $Q_{lossconv}$ perdu pour l'environnement.....	63
- Le flux de chaleur $Q_{lossrad}$ perdu pour l'environnement.....	64
- Le flux de chaleur Q_{w-sh} entre le croûtage et le virole par rapport à la température de virole T_{sh} au rayon de croûtage r_1 constant et T_{sh} variable	65
- Le flux de chaleur Q_{w-sh} entre le croûtage et la virole par rapport au rayon de croûtage r_1 à température de virole T_{sh} constant et r_1 variable	66
4. Comparaison des flux de chaleur dans un four rotatif.	67
4.1 Le flux de chaleur entre le gaz et les briques à $T_g = 2253K$	67
4.2 Le flux de chaleur entre le gaz et le solide à $T_g = 2293$	67
4.3 Le flux de chaleur entre le solide et les briques à $T_b = 1593K$	68

4.4 Le flux de chaleur Q_{loss} perdu pour l'environnement à $T_{\text{sh}} = 684.111\text{K}$	68
4.5 Comparaison des flux de chaleur globale dans la virole a $T_g = 2253\text{ K}$	69
5. Conclusion :	70
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	73

List des figures

Figure I. 1 : le schéma de fabrication du ciment.....	5
Figure I. 2 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment.[7]	6
Figure I. 3 : Procédé de fabrication du ciment.	7
Figure I. 4 : Exemples de mise en tas.	8
Figure I. 5 : cheminement dans le four.[6].....	9
Figure I. 6 : salle de contrôle	10
Figure I. 7 : Un four rotatif de la cimenterie	12
Figure I. 8 : Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie.....	14
Figure I. 9 : Briquetage dans le four rotatif de cimenterie.....	14
Figure I. 10 : Les différentes zones de briquetage du four rotatif.[8].....	15
Figure I. 11 : Brûleur à prémélange.	16
Figure I. 12 : vue de face bruleur.....	16
Figure I. 13 : Bruleur du four rotatif de ciment.	17
Figure I. 14 : Zone de cuisson dans four rotatif.....	17
Figure I. 15 : Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie.	18
Figure I. 16 : virole du four rotatif.....	19
Figure I. 17 : Épaisseurs de viroles.....	19
Figure I. 18 : Station des galets.	20
Figure I. 19 : bandage creux oméga.	20
Figure I. 20 : Système d'entraînement du four.	21
Figure I. 21 : Galet pousseur (la buté).	22
Figure II. 1 : Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale [47].....	28
Figure II. 2 : Le flux de chaleur dans la section transversale du four. [51]	33
Figure II. 3 : Le réseau de résistance thermique pour le flux de chaleur à travers le manteau du four rotatif. [40].....	34
Figure III. 1 : Exemples de contenu de lignes en Fortran 'frtr 2'	38
Figure III. 3 : Schéma du processus de programmation en Fortran. Les fichiers sont représentés par des ronds blancs et les programmes externes par des cases vertes [53].....	39
Figure III. 4 : Schéma représentatif des différentes étapes de la conception d'un programme Fortran [52].....	40
Figure III. 5 : Schéma des principales spécifications de l'équipement d'un four rotatif.	42
Figure III. 6 : Schéma dimensionnelle du four rotatif a GIGA Zahana nouvelle ligne ..	43
Figure IV. 1 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la température de gaz.....	50
Figure IV. 2 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgw} entre les gaz et les briques par rapport la température de gaz.....	51
Figure IV. 3 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de gaz.....	52

Figure IV. 4 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de gaz.....	53
Figure IV. 5 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de solide.....	54
Figure IV. 6 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de solide.....	55
Figure IV. 7 : Variation du flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre le solide et les briques par rapport la température de solide.....	56
Figure IV. 8 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rwb} entre le solide et les briques par rapport la température de solide.....	57
Figure IV. 9 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la vitesse axiale.....	58
Figure IV. 10 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la vitesse axiale.....	59
Figure IV. 11 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la vitesse angulaire.....	60
Figure IV. 12 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la vitesse angulaire.....	61
Figure IV. 13 : Variation du flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les gaz et les briques par rapport le coefficient de transfert de chaleur.....	62
Figure IV. 14 : Variation du flux de chaleur par convection $Q_{lossconv}$ perdu pour l'environnement par rapport la température de la virole.....	63
Figure IV. 15 : Variation du flux de chaleur par rayonnement $Q_{lossrad}$ perdu pour l'environnement par rapport la température de la virole.....	64
Figure IV. 16 : Variation du flux de chaleur par Q_{w-sh} par rapport la température de la virole au rayon de croûtage r_l constant.....	65
Figure IV. 17 : Variation du flux de chaleur par Q_{w-sh} par rapport r_l à température de virole T_{sh} constant.....	66
Figure IV. 18 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le gaz et les briques..	67
Figure IV. 19 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le gaz et le solide.....	67
Figure IV. 20 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le solide et les briques.....	68
Figure IV. 21 : Comparaison numérique du flux de chaleur perdue vers l'environnement.....	68
Figure IV. 22 : Comparaison numérique du flux de chaleur globale dans la virole.....	69

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Utilisation et caractéristiques des ciments fabriqués par la cimenterie de Zahana [3].	5
Tableau III. 1 : Tableau des données dimensionnelle pris auprès de la cimenterie GIGA Zahana.	41
Tableau III. 2 : Différentes températures données.	44
Tableau III. 3 : les différents rayons.	45
Tableau IV. 1: Analyse comparative des flux de chaleur dans un four rotatif	69

Nomenclature

Lettres latines

A	Surface	m^2
L	Longueur	m
Q	Le flux de chaleur	W
V	Vitesse	$m.s^{-1}$
T	Température	K
K_G	Conductivité thermique de gaz	W/mK
k_B	Conductivité thermique du solide	W/mK
k_a	Conductivité thermique de l'air	W/mK
C_p	Capacité thermique massique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
F	Fe2O3/Kg CaO	Kg
S	SiO2/Kg CaO	Kg
r_i	Rayon intérieur du four	m
r_o	Rayon extérieur du four	m
D	Diamètre du four	m
D_e	Diamètre hydraulique du four	m
R_r	Resistance maximal	MPa
R_e	Resistance élastique	Mpa
L_{gcl}	Longueur de la corde du lit	m
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W/m^2 K$
t	Temps	s
v_g	Vitesse de gaz	rad/s
h_o	Fraction of radiation 0.0757	
C	Calcium oxide CaO	
P	Pression	Pa
$\dot{m}$	Débit massique du four	Kg/s
$\dot{E}$	Énergie	J/s

Symboles grecs

ω	Vitesse de rotation	rad/s
σ	Constante de Stefan Boltzmann	
Γ	Angle du lit de matériau	rad
Φ	Flux de chaleur	W
Ω	Le facteur de forme du rayonnement	
η	Fraction solide	
τ	Constante de temps	
ε	Emissivité	
α	Absorptivité du gaz	
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
β	Angle de remplissage du four	rad
φ	Densité de flux thermique	$W.m^2$

ν_g	Viscosité cinématique du gaz	m^2/s
μ_g	Viscosité dynamique du gaz	m^2/s
α_B	Diffusivité thermique solide	m^2/s

Indices

R	Rayonnement
Conv	Convention
Cond	Conduction
G	Gaz
B	Lit/matérielle/solide
W	Les briques réfractaires/paroi interne
REF	Réfractaire
Ch	Croûtage
Sh	Virole (Shell)
F	Fluide
O	Ambiant

Nombres adimensionnels

Re_D	Nombre de Reynolds axial
Re_ω	Nombre de Reynolds angulaire
Gr	Nombre de Grashof
Pr	Nombre de Prandtl
Nu	Nombre de Nusselt
Ra_D	Nombre de Rayleigh

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie des ciments, en Algérie, a connu ces dernières années une amélioration progressive vue le nombre de lignes de production de ciment qui a augmenté. Les fours rotatifs sont employés couramment dans des industries chimiques, l'industrie de ciment l'industrie métallurgique, procédés de séchage, le traitement des déchets et le processus d'incinération.

Le four rotatif constitue l'équipement central d'une cimenterie, chargé d'assurer la cuisson à haute température des matières premières afin de produire le clinker, composant essentiel du ciment. Il se compose d'un tube en acier, garnie de la brique réfractaire. Le tube est légèrement incliné (de 1 à 4 degrés) et tourne notamment sur son axe entre 0,5 à 4,5 tours par minute (tableau III.1). La virole du four s'appuie par l'intermédiaire de bandages crantés sur les galets, qui en s'alignant automatiquement et parfaitement sur les bandages, assurent une portée optimale.

Le four rotatif joue un rôle crucial dans la production de ciment. Considéré comme le cœur de toute cimenterie, il représente l'élément le plus sollicité thermiquement et subit d'importants échanges thermiques. L'analyse du bilan thermique et énergétique d'un four rotatif permet d'identifier les mécanismes clés de transfert de chaleur, d'évaluer les sources de pertes, et de proposer des stratégies d'amélioration de l'efficacité globale du procédé. La maîtrise des phénomènes de convection et de rayonnement, ainsi que l'analyse de l'influence des paramètres opérationnels (tels que les températures, la vitesse de rotation, la vitesse de progression et la géométrie du four), sont essentielles pour optimiser la consommation énergétique tout en garantissant la qualité du produit final.

Dans ce contexte, le présent mémoire s'attache à développer une approche analytique rigoureuse du bilan thermique d'un four rotatif de cimenterie. Il repose sur une modélisation physique des échanges thermiques au sein du four, couplée à une modèle analytique réalisée en langage Fortran. Ce travail vise à fournir une compréhension approfondie du comportement thermique du four et à identifier les leviers d'optimisation les plus efficaces. L'étude envisagée dans le présent mémoire est structurée en 4 chapitres. Dans le 1^{er} chapitre, nous avons décrit les étapes de la fabrication du ciment puis on a présenté le four rotatif avec l'ensemble des éléments qui le constitue ainsi que, leurs rôles et leurs spécificités. Le 2^{ème} chapitre est répartie en deux parties. La première est consacrée à la recherche bibliographique de notre sujet. La deuxième concerne le calcul et l'analyse des différents échanges de chaleur dans le four rotatif.

Le troisième chapitre met Le troisième chapitre présente différents schémas dimensionnels du four rotatif de GIGA Zahana, les données spécifiques du four et la problématique. Enfin, dans le quatrième chapitre, les résultats obtenus seront présentés. Analyse de l'évolution de la température du four, de la vitesse axiale et angulaire, ainsi qu'une étude des modes de transfert de chaleur prédominants dans le four rotatif. Nous concluons par une conclusion générale, des perspectives et les références de notre recherche.

***CHAPITRE 1 : Généralité sur le ciment
et four rotatifs***

I. Généralité sur le ciment

1. Définition

Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, c'est un liant hydraulique durcissant dans l'eau, qui après hydratation présente un degré de solubilité très faible. Ce ciment, se présentant sous forme d'une très fine poudre, possède la propriété d'agglomérer des matériaux solides inertes après mélange à l'eau en leur assurant une cohésion et adhésion très fortes. Il est fabriqué à partir de la cuisson, le mélange et le broyage de différentes matières premières. Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80%, de sable, de schiste et minerais de fer. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.[1]

2. Types de ciment :

Le ciment est classé en différentes catégories en fonction de sa composition et de ses utilisations spécifiques.

- Ciment Portland (OPC) : est le type de ciment le plus courant dans l'usage général, car c'est un ingrédient de base du béton. Le clinker est broyé en une poudre fine, puis du gypse est ajouté (jusqu'à 5%) pour former du ciment Portland.
- Ciment mélangé : certains composés naturels ou fabriqués, tels que la pouzzolane, le laitier et le grès, sont mélangés avec du clinker de ciment Portland et broyés finement. Le ciment mélangé minimise le risque de développement de fissures de contraction, en raison de la chaleur d'hydratation inférieure de ces ciments. Ce ciment est utilisé dans les grands ouvrages en béton, tels que les barrages et les piliers.
- Ciment au laitier de haut fourneau Portland (PBFSC) : Le laitier de haut fourneau granulé est mélangé avec de la chaux ou du clinker OPC et broyé pour former du ciment de laitier. Le ciment de laitier de haut fourneau de Portland est le ciment le plus utilisé.
- Ciment Portland pouzzolane (PPC) : Pouzzolane est une matière argileuse (naturelle ou synthétique) qui, broyée avec de la chaux / clinker et mélangée à de l'eau, produit des composés de la base de ciment. Des cendres volantes ou de la pouzzolane sont mélangées avec du clinker de ciment Portland et broyées avec 5 à 6 % de gypse pour former du PPC.
- Ciment blanc : Le ciment blanc possède toutes les propriétés physiques du ciment de Portland ordinaire (OPC, également appelé ciment gris) et peut être substitué à l'OPC. Cependant, son utilisation est limitée aux carreaux et revêtements de sol, car il est plus cher. Le ciment blanc est produit selon un processus de fabrication fixe, avec de plus petites quantités de fer et de manganèse.
- Béton prêt à l'emploi (RMC) : Le béton prêt à l'emploi se compose de ciment, d'agrégats (sable et cailloux), d'eau et d'autres ingrédients, qui sont pesés et dosés dans une usine située au centre, directement sur le site de construction, sans autre traitement. [2]

3. Matières premières du ciment

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement de calcaire et d'argile ou de toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), et de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

Les matières d'ajout sont principalement :

- Le Gypse : son rôle est de régulariser le temps de prise du ciment.
- Le Calcaire : Ajout qui diminue la résistance du ciment et qui peut être remplacé par la Pouzzolane qui a les mêmes caractéristiques. C'est le composant principal du Clinker.
- Le Schiste : le gisement de schiste se situe à Djénine Meskiné, à proximité de la route nationale N° 13.
- Les matières de correction : Les matières de correction sont en général : les minerais de fer, elles sont ajoutées à la matière crue, leur coût est élevé car elles sont fournies par des fournisseurs étrangers.
- La Pouzzolane : une matière volcanique, et spécialement utilisée pour la fabrication de tous les types du ciment commercialisé par GICA sauf pour le (N42,5 SR5). [1]

4. Caractéristiques et classifications du ciment

La cimenterie de Zahana met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur trois types de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés [3] (voir tableau I.1).

	Composition du ciment	Caractéristiques physico-chimiques	Principales utilisations
CEMII/A-L 42.5N	Clinker 80-94 % Ajout 6-20% Constituants secondaires 0-5 %	- La teneur en chlorures $\text{Cl}^- \leq 0.1 \%$ - La teneur en sulfates $\text{SO}_3 \leq 3.5 \%$ Stabilité $\leq 10 \text{ mm}$ Temps de début de prise $\geq 1 \text{ heure (60min)}$	- Réalisation de toutes structures en bétons courants, armés ou non armés, bétons étuvés - Réalisation de travaux de maçonnerie, de dallage, confection d'enduit - Préfabrication avec ou sans traitement thermique - Réalisation de travaux routiers notamment traitement de graves, réalisation de chaussées, de pistes, ... - Bétons prêts à l'emploi - Travaux de bétonnage en grande masse, barrages...

CEMI 42.5 N-LH/SR5	<ul style="list-style-type: none"> - Clinker 95-100 % - Constituants secondaires 0-5 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Perte au feu $\leq 5 \%$ - $\text{MgO} \leq 5 \%$ - $\text{SO}_3 \leq 3 \%$ - Chlorures $\leq 0.1 \%$ - Stabilité $\leq 10 \text{ mm}$ - Temps de début de prise $\geq 1 \text{ heure}$ 	Travaux pour des milieux fortement agressifs (terrains gypseux, eaux à haute teneur en sulfates, eaux industrielles, eaux séléniteuses...)
CEMII/A-L 32.5N	<ul style="list-style-type: none"> Clinker 65-79 % Ajout 21-35% Constituants secondaires 0-5 % 	<ul style="list-style-type: none"> - La teneur en chlorures $\text{Cl} \leq 0.1 \%$ - La teneur en sulfates $\text{SO}_3 \leq 3.5 \%$ Stabilité $\leq 10 \text{ mm}$ Temps de début de prise $\geq 1 \text{ heure (60min)}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de toutes structures en bétons courants, armés ou non armés, bétons étuvés - Réalisation de travaux de maçonnerie, de dallage, confection d'enduit - Préfabrication avec ou sans

Tableau I. 1 : Utilisation et caractéristiques des ciments fabriqués par la cimenterie de Zahana [3].

5. La fabrication du ciment

Il existe quatre procédés pour fabriquer le ciment résume dans la figure I.1 :

- Fabrication par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication par voie Semi-sèche.
- Fabrication par voie semi humide.
- Fabrication par voie humide (la plus ancienne).[4]

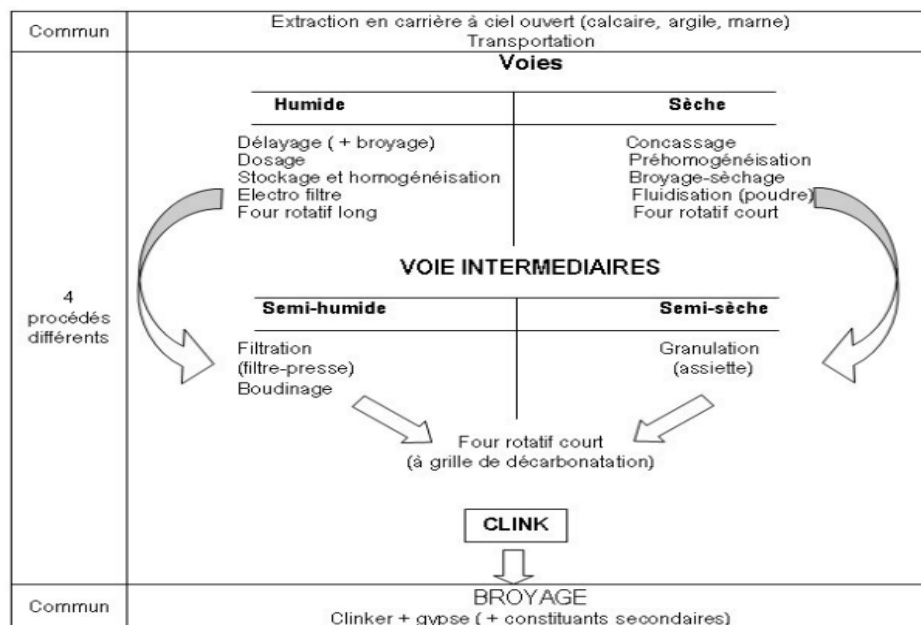


Figure I. 1 : le schéma de fabrication du ciment [4]

La production de ciment, illustrée schématiquement dans la figure (I.3), comprend les étapes fondamentales :

- Préparation de la matière première.
- Production du clinker.

- Préparation du ciment.

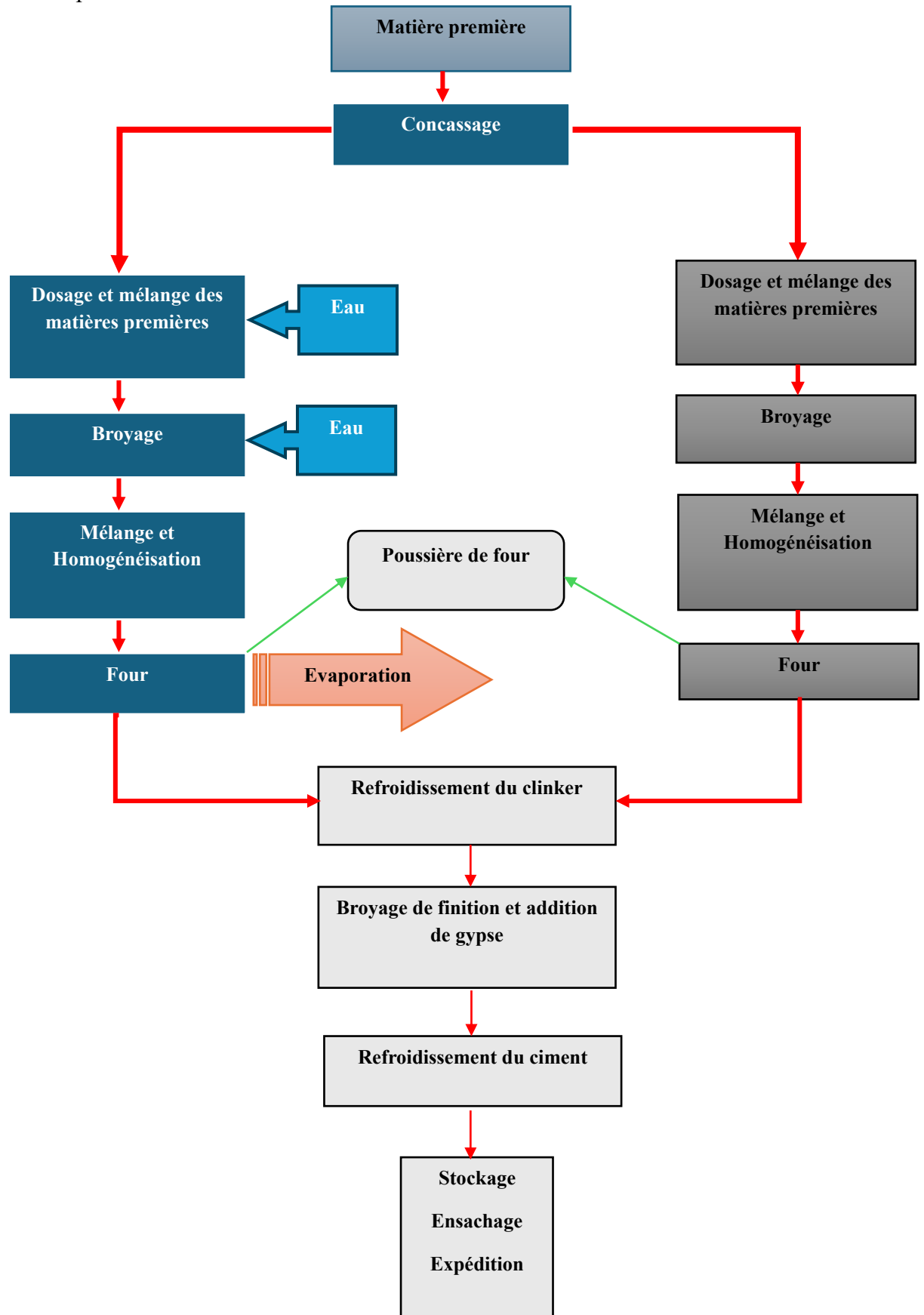


Figure I. 2 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment.[7]

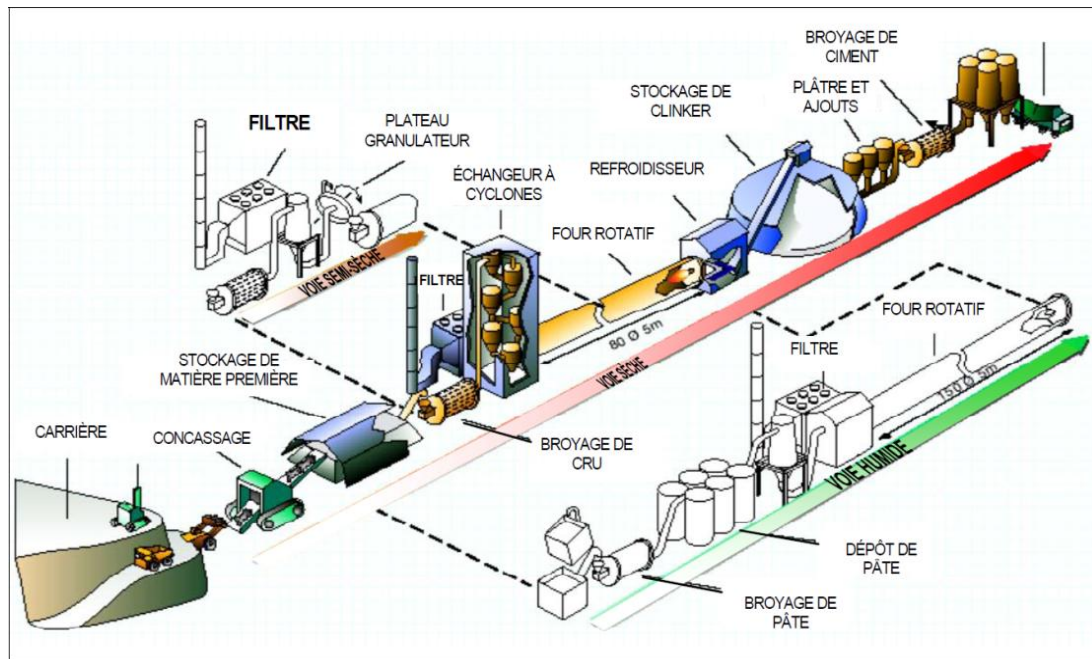


Figure 1. 3 : Procédé de fabrication du ciment.

Les étapes de la fabrication du ciment :

La fabrication du ciment est un processus complexe qui comprend plusieurs étapes clés, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la cuisson dans le four rotatif, chacune jouant un rôle essentiel dans la qualité finale du produit

5.1 Extraction des matières premières :

Le calcaire, la marne, le sable et le minerai de fer sont les principales matières premières utilisées. Elles sont extraites de carrières ou de mines à l'aide d'explosifs ou d'équipements d'extraction mécaniques tels que des pelles et des chargeuses.[3]

5.2 Préparation des matières premières :

a. Concassage et broyage : Les matières premières extraites sont généralement de grande taille, donc elles sont d'abord concassées à l'aide de concasseurs à mâchoires ou à percussion. Ensuite, elles sont broyées dans des broyeurs à boulets ou des broyeurs verticaux pour obtenir une taille de particules plus fine.

b. Mélange du cru : on appelle cette étape la pré homogénéisation, une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières, Le calcaire et l'argile ou la marne, Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage ou manuel, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. [3]

La méthode de hall de pré homogénéisation comprend deux phases principales à savoir :

- La mise en tas.
- La reprise.

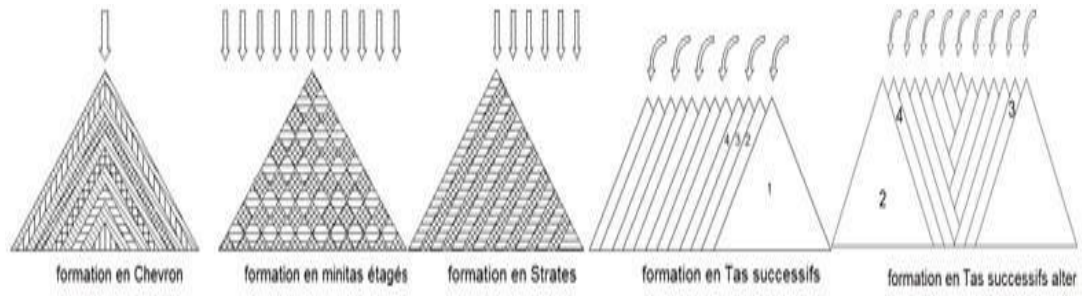


Figure I. 4 : Exemples de mise en tas.

5.3 Broyage du cru :

Le broyage de cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine.[3]

5.4 Préchauffage et pré-calcination :

a. Préchauffage : Le cru est préchauffé dans un préchauffeur à cyclones. Dans ce dispositif, le cru est chauffé en utilisant la chaleur des gaz d'échappement du four à ciment. Le préchauffage permet de réduire la consommation d'énergie nécessaire dans les étapes suivantes.

b. Pré-calcination : Le cru préchauffé est ensuite introduit dans un four rotatif, également appelé four à calcination. À l'intérieur du four, le mélange subit une pré-calcination à une température d'environ 850 à 900 degrés Celsius. Cela aide à la décarbonatation du calcaire, où le dioxyde de carbone (CO_2) est libéré, et prépare le matériau pour la formation de clinker.[4]

5.5 Formation du clinker :

a. Cuisson : La matière première pré calcinée est transportée vers le four à ciment principal où elle est soumise à une température élevée d'environ 1450 °C. À ces températures, des réactions chimiques se produisent, transformant le mélange en clinker. Les principales réactions comprennent la formation de silicates de calcium, d'aluminates de calcium et de ferrites de calcium.

b. Refroidissement : Le clinker se présente sous forme de boules de taille allant de 0 à 100 mm. La température de la matière atteint 1450 °C en sortie de four. Il faut alors la refroidir pour lui donner ses caractéristiques hydrauliques en fixant sa structure cristalline et faciliter son stockage dans des conditions plus sûres. Le refroidisseur est composé d'un ensemble de grilles à travers lesquelles l'air soufflé permet de baisser la température de matière en dessous de 100 °C. Le refroidisseur dans une cimenterie est une composante essentielle du processus de production du ciment. Il joue un rôle crucial dans la transformation du clinker, le produit intermédiaire résultant du processus de cuisson dans le four rotatif, en ciment.[5]

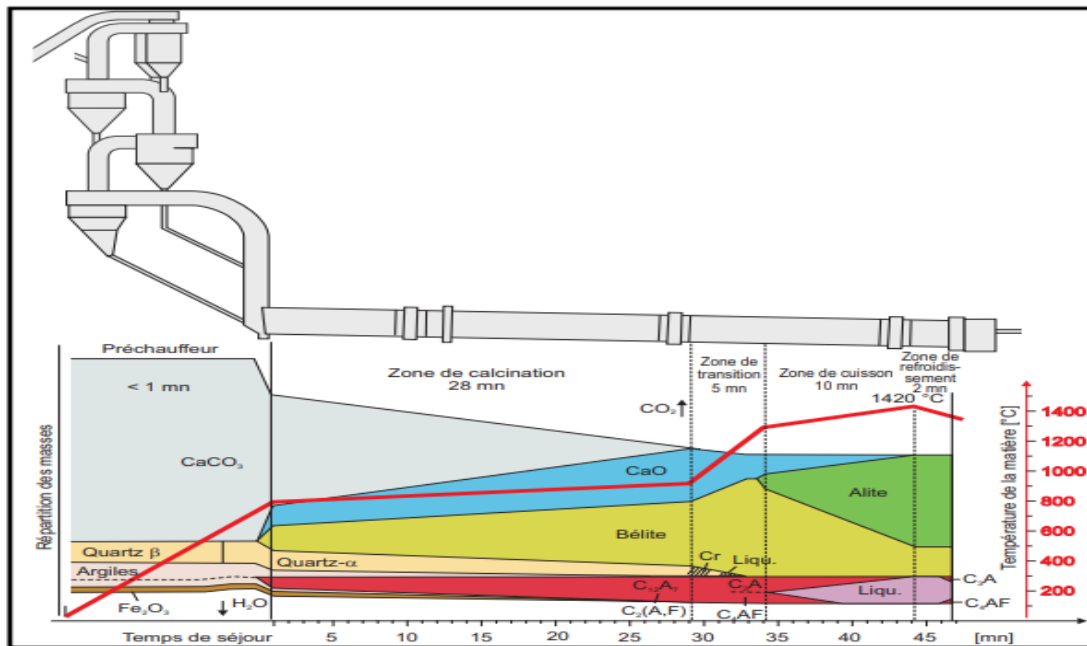


Figure I. 5 : cheminement dans le four.[6]

5.6 Broyage du clinker :

- Broyage initial :** Le clinker refroidi est ensuite broyé finement dans des broyeurs à boulets ou des broyeurs verticaux. Ces broyeurs réduisent la taille des particules du clinker pour obtenir une poudre fine, appelée « ciment ».
- Ajout d'additifs :** Pendant le broyage, des additifs tels que du gypse (sulfate de calcium) sont ajoutés pour réguler le temps de prise du ciment. Ces additifs améliorent également certaines propriétés du ciment, telles que sa résistance et sa maniabilité.[7]

5.7 Stockage et conditionnement :

- Maturation :** Le ciment obtenu est stocké dans des silos pendant une période de maturation. Cette étape améliore certaines propriétés du ciment, notamment sa résistance et sa stabilité.
- Conditionnement :** Le ciment est ensuite conditionné en sacs de différentes tailles ou stocké en vrac dans des silos avant d'être expédié aux utilisateurs finaux, tels que les entreprises de construction et les producteurs de béton.[8]

5.8 Salle de contrôle et contrôle qualité :

La salle de contrôle constitue le centre névralgique de la cimenterie, où les opérateurs surveillent et régulent en continu les différentes étapes du processus de fabrication à l'aide de systèmes informatisés. Grâce à une interface de supervision centralisée, les paramètres critiques tels que la température du four, la pression, le débit des matériaux et la consommation énergétique sont contrôlés en temps réel, permettant des ajustements rapides et précis.

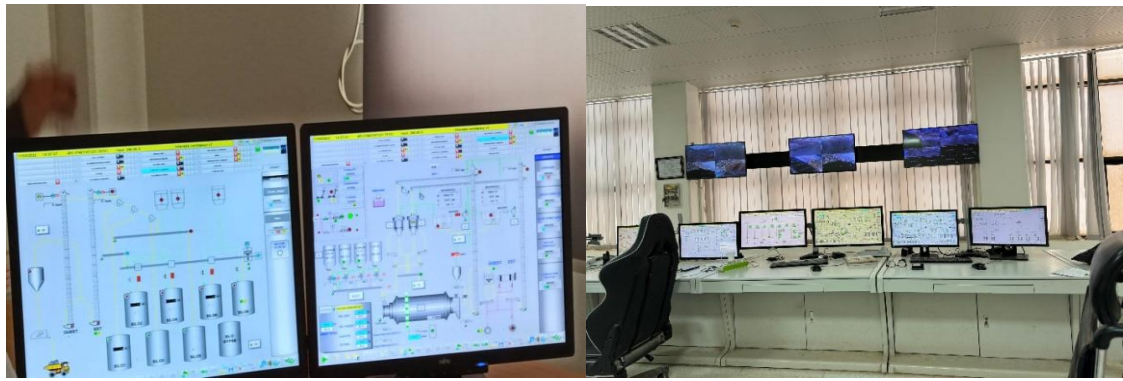


Figure I. 6 : salle de contrôle

5.9 Salle de contrôle qualité

La salle de contrôle qualité joue un rôle essentiel dans le maintien des performances et de la conformité du processus de fabrication du ciment. C'est dans cette zone que les techniciens et ingénieurs qualité surveillent rigoureusement les caractéristiques physico-chimiques des matériaux à chaque étape de la production. Des échantillons de matières premières, de mélange cru, de clinker et de ciment fini sont régulièrement prélevés et analysés à l'aide d'équipements de laboratoire modernes (spectromètres, diffractomètres et analyseurs thermiques). Ces contrôles permettent de détecter rapidement tout écart ou non-conformité et de recommander les ajustements nécessaires. Grâce à cette surveillance continue, la salle de contrôle qualité garantit la constance du produit final tout en respectant les exigences réglementaires et environnementales.

II. Les fours

1. Définition de four

Un four est un outil de production destiné à élaborer ou transformer des matériaux grâce aux transferts thermiques entre une source de chaleur et la matière à traiter, il peut être soit :

- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;
- un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate.

Le présent article traite les fours dans leurs généralités, on s'efforce d'y dégager des caractéristiques communes à l'ensemble des fours. Il introduit une série d'articles portant chacun sur les fours spécifiques à une industrie notamment :

- les fours de l'industrie sidérurgique.
- les fours de traitement thermique des métaux.
- les fours de raffinage et de l'industrie chimique.
- les fours rotatifs de cimenterie.
- les fours de l'industrie verrière.
- les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

2. Le four rotatif

Un four rotatif est un réacteur cylindrique incliné et en rotation continue à travers lequel une charge (sable, ilménite, minéraux ou ciment) se déplace lentement vers une flamme. La charge est soulevée et renversée par rotation pour ensuite être déchargée et refroidie. Ce type de four a été utilisé lorsqu'un traitement thermique de haute intensité (jusqu'à 2000 °C) est nécessaire pour atteindre les propriétés physiques requises par le procédé en aval du four. Un brûleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau. Ils peuvent être utilisés pour trois raisons distinctes : le chauffage, la réaction et le séchage de matériaux solides. Souvent, ils réalisent une combinaison de ces objectifs. Dans la conception des fours, quatre aspects importants doivent être considérés du point de vue de la technologie des procédés : le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides granulaires à travers le four, le transfert de masse gaz-solide et les réactions chimiques.



Figure I. 7 : Un four rotatif de la cimenterie

3. Types des fours rotatifs :

- Fours humides : sont généralement alimentés par des matières en suspension. Les fours humides ont une longueur de 150 à 180 m (environ 500 à 600 pieds). L'extrémité de l'alimentation est généralement équipée par chaînes qui servent comme un « volant moteur » qui récupère la chaleur des gaz d'échappement pour une utilisation dans le préchauffage de l'alimentation afin de faciliter le séchage.
- Longs fours sèche : sont plus courts que les fours humides avec des longueurs du 90 à 120 m (environ 300–400 pi). Pour les longs fours secs, comme pour les fours humides, le séchage, le préchauffage et la calcination se produisent tous dans le même récipient. Cependant, ils fonctionnent bien lorsque les particules d'aliments sont volumineuses.
- Courts fours sèches : sont généralement accompagnés d'un préchauffeur dans lequel l'aliment est séché, préchauffé ou même partiellement calciné avant d'entrer dans le réacteur principal (four). En conséquence, la charge thermique sur le four est proprement réduite.
- Les fours à combustion indirecte : sont généralement conçus pour des applications dans lesquelles le contact direct entre le matériau et le gaz de la source de chaleur n'est pas souhaitable.

4. Principe de fonctionnement des fours rotatifs

Le fonctionnement d'un four rotatif génère de nombreux défis. Vous avez un très grand et très lourd cylindre en acier de 72m contenant une quantité importante de matériaux qui tourne au moyen d'un système d'entraînement souvent composé de deux moteurs. Cela signifie que le démarrage du four exige un couple élevé qui peut représenter deux fois et demi le couple de pleine charge. Vous devez en même temps synchroniser la vitesse et le couple des moteurs afin de ne pas endommager le mécanisme d'entraînement du four.

La transformation d'un mélange brut en clinker a ses propres exigences. Les conditions du mélange brut peuvent varier, tout comme le flux de matériaux dans le four. Cela signifie que vous avez besoin d'un contrôle précis sur le débit des matériaux, afin que la flamme du brûleur ait suffisamment de temps pour chauffer le mélange brut à une température suffisante pour créer un clinker de bonne qualité. Cela exige un contrôle précis de la vitesse du moteur. Via la boîte d'entrée la matière alimentée entre au four sous l'effet de l'inclinaison et la rotation de four, la matière alimentée traverse le four en contre-courant au gaz chaud jusqu'à la sortie du four

A la sortie de la tour la farine arrive dans le four où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation : la clinkérisation qui commence de 1200°C à 1450°C, l'alimentation en farine est située à l'extrémité opposée du brûleur. En théorie, cette réaction s'arrête lorsqu'il n'y a plus de chaux disponible. Mais en réalité il reste toujours de la chaux non combinée (chaux libre). La matière sortant du four est le clinker, elle se présente sous formes des grains gris foncé, arrondi sa surface irrégulière et dont le diamètre peut aller jusqu'à 3cm.

Dans le cas des ciments gris, le clinker est refroidi, dans la plupart des cimenteries actuelles, par un refroidisseur à grilles :

- Le clinker va progresser à l'intérieur du refroidisseur grâce aux à-coups répétés des grilles sur lesquelles il repose,
- Au travers des grilles, de puissants ventilateurs vont souffler sous le clinker afin de le refroidir,
- À l'entrée ou à la sortie du refroidisseur, selon le modèle utilisé, un concasseur à un ou plusieurs rouleaux va le broyer de manière grossière.

Dans le cas du ciment blanc, plus fragile que le gris car il doit rester immaculé, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur à grilles. Il s'agit d'un cylindre légèrement incliné qui tourne sur lui-même et à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée à l'aide de multiples buses. Bien que sa composition chimique soit légèrement différente, c'est grâce au refroidisseur rotatif que le ciment peut rester blanc : en effet, son rôle est de refroidir très rapidement le clinker à sa sortie du four, avant qu'il ne soit oxydé au contact de l'air. De plus, la taille des refroidisseurs à grilles utilisés sur les lignes de ciment blanc est considérablement réduite [9].

5. Les fonctions principales du four rotatif :

- Obtenir décarbonation finale de la farine chaude.
- Cuisson de la matière.
- Assurer la bonne combustion du gaz.
- Permettre le transfert thermique (gaz/solide).
- Transport de la matière. [10]

6. Conception

Le four est la partie la plus importante dans le procédé de production du ciment. Il se compose d'éléments intérieurs et extérieurs ;

6.1 Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie

Les fours rotatifs comportent plusieurs éléments internes essentiels au bon déroulement du processus thermique et à l'efficacité énergétique de l'installation. Parmi ces composants, on retrouve principalement :

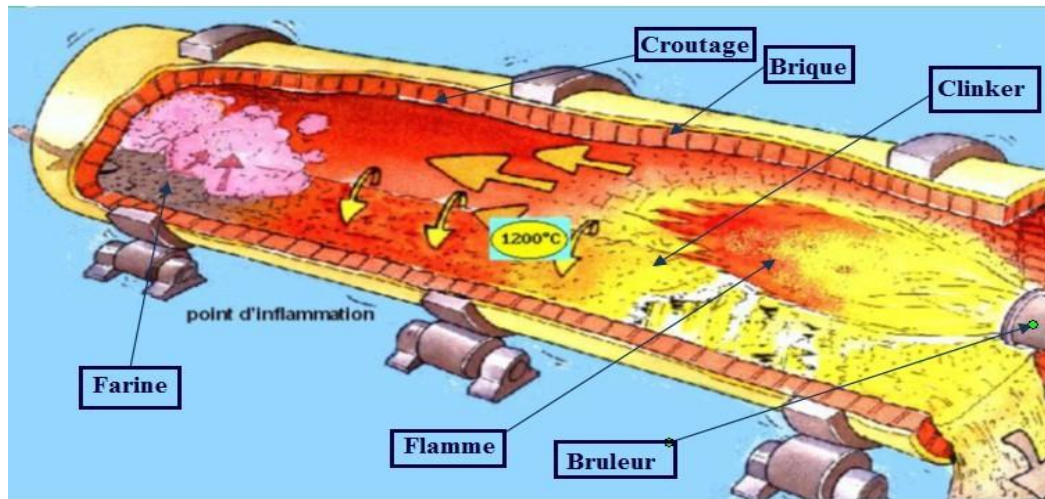


Figure I. 8 : Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie

6.1.1 Les briques dans le four rotatif de ciment :

Le four doit être entouré exclusivement de briques réfractaires. Les réfractaires sont des matériaux céramiques conçus pour résister à des températures élevées. La hauteur des briques réfractaires, qui dépend du diamètre du four, varie généralement de 220 mm à plus.[11]



Figure I. 9 : Briquetage dans le four rotatif de cimenterie.

Le briquetage remplit plusieurs rôles importants :

- Isolation thermique et protection de la virole : Les réfractaires isolent et protègent la virole du four contre les températures élevées à l'intérieur. Sans réfractaires, l'acier au carbone de la virole serait endommagé par la chaleur.
- Protection contre l'abrasion : Le clinker de ciment est très abrasif. Les réfractaires servent à protéger la virole contre l'abrasion causée par les matériaux en mouvement à l'intérieur du four.
- Réduction des pertes de chaleur : Une partie de la chaleur produite par le système du four est perdue par rayonnement à travers la virole en acier. Les réfractaires,

grâce à leur faible conductivité thermique, contribuent à minimiser ces pertes de chaleur. [8]

Les différentes zones de briquetage du four rotatif sont multiples, voici une brève description :

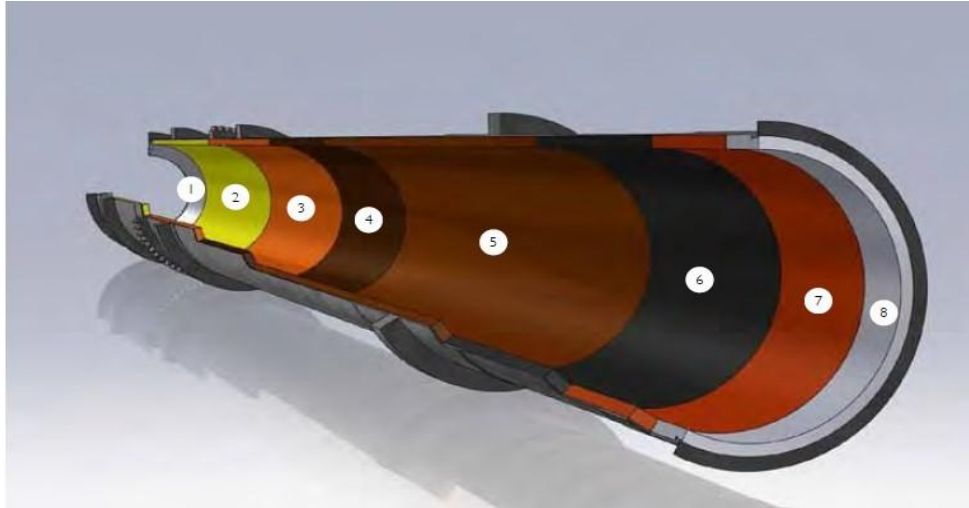


Figure I. 10 : Les différentes zones de briquetage du four rotatif.[8]

- I. Zone d'entrée (Zone 1) : Cette zone est revêtue de briques de qualité lisse pour faciliter l'entrée des matériaux.
- II. Zone d'entrée (Zone 2) : Les briques de cette zone sont plus résistantes, conçues pour supporter des températures entre 850 et 900 °C.
- III. Zone de sécurité (Zone 3) : Les briques de cette zone sont capables de résister à des températures élevées, comprises entre 1200 et 1300 °C.
- IV. Zone de transition supérieure (Zone 4) : Le revêtement du four devient plus fragile dans cette zone, particulièrement lorsque la phase liquide commence à apparaître dans le matériau brut. Les températures varient de 1300 à 1400 °C.
- V. Zone de cuisson (Zone 5) : Cette zone permet la formation du clinker, mais les briques deviennent plus fragiles en raison de la fatigue thermomécanique. Les températures atteignent de 1300 à 1600 °C.
- VI. Zone de transition inférieure (Zone 6) : Les briques dans cette zone résistent à des températures comprises entre 1300 et 1400 °C.
- VII. Zone de refroidissement et de sortie (Zone 7-8) : Les réfractaires dans cette zone sont souples et conçus pour résister à des températures entre 1000 et 1200 °C.

6.1.2 Le brûleur :

La conception d'un brûleur de four est fonction :

- Du combustible et de la façon dont se fait le mélange combustible-comburant ;
- De l'espace disponible dans l'enceinte où se déroule la combustion ;
- De la forme que l'on souhaite donner à la flamme.

On distingue deux types de brûleur pour un mélange combustible-comburant :

- **Les brûleurs à prémélange** : dans ce type de brûleur le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four. Ces brûleurs

sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange [12].

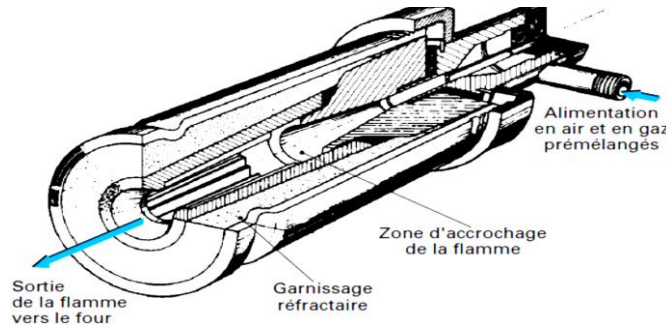


Figure I. 11 : Brûleur à prémélange.

- **Les brûleurs à flamme de diffusion :** Ces brûleurs concernent les combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. Ils permettent, en agissant sur les vitesses et les écoulements, d'obtenir des formes de flamme très variées [12].

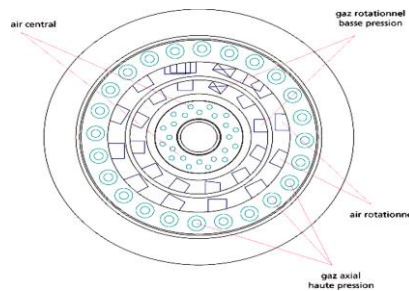


Figure I. 12 : vue de face brûleur.

Le brûleur dans le four rotatif fonctionne comme un injecteur, l'air secondaire est aspiré du refroidisseur dans le four de telle façon que la flamme dégagée se concentre autour de la ligne centrale du four [13].

D'un point de vue processus le brûleur qui est utilisé pour le chauffage la zone de cuisson d'un four rotatif doit remplir les conditions suivantes :

- Le brûleur doit être capable de réaliser la combustion de gaz naturel, de charbon, de gasoil ou n'importe quel mélange de ce dernier, il doit assurer encore une combustion complète, à excès d'air bas et à formation minimum d'oxyde de carbone (CO) et d'oxyde de nitrogène (NO_x).
- Il doit produire une flamme courte, étroite et fortement radiante, ces critères représentent les conditions adéquates pour un bon transfert thermique de la flamme aux matériaux en écoulement de la zone de cuisson (clinkérisation) du four. [10-12].
- Il doit engendrer une flamme qui doit favoriser la formation, dans la zone de cuisson du four, d'une couche dense et stable sur le réfractaire (phénomène de croûtage).
- Il doit utiliser un peu d'air primaire sans pour autant compromettre la stabilité de fonctionnement normal ou surcharge du four.



Figure I. 13 : Bruleur du four rotatif de ciment.

6.1.3 Croûtage :

La protection de l'épaisseur des briques dans la zone de combustion d'un four à ciment rotatif pendant son fonctionnement est importante pour la productivité du four. Le croûtage est une masse de clinker ou de particules de poussière qui adhère à la face chaude des briques posées dans le four, après leur passage d'un état liquide ou semi-liquide à un état solide. [14]

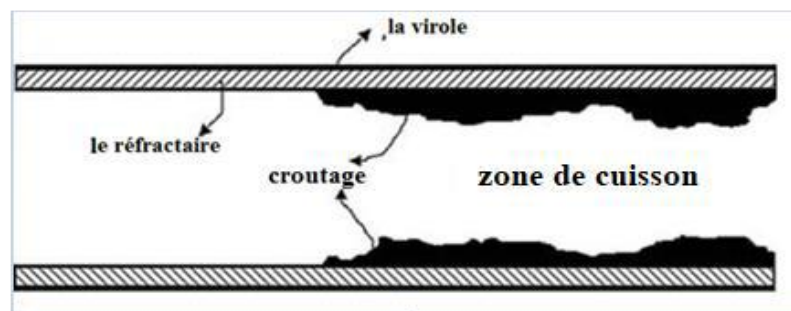


Figure I. 14 : Zone de cuisson dans four rotatif.

Les particules de clinker solidifiées adhèrent d'abord à la surface de brique et continuent de s'accumuler tant que la température de surface du revêtement est inférieure à la température de solidification des particules. La formation du croustage cesse lorsque la surface atteint cette température de solidification. Il est communément admis que la performance des briques dans la zone de combustion et les zones de transition du four rotatif est significativement affectée par la formation de croustage et sa capacité à adhérer aux briques. L'adhérence du croustage est un paramètre clé pour augmenter le rendement du four. La stabilité du croustage est nécessaire pour minimiser la charge thermique (exposition directe à une température de 2000C°), la corrosion et le choc thermique sur la virole.

Le croustage doit être bien adhérent pour résister aux conditions fluctuantes du four, qui feraient tomber le croustage et exposeraient ensuite la surface libre des briques à des températures extrêmement élevées et à un environnement corrosif agressif. [15]

6.2 Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie :

Les éléments extérieurs du four rotatif regroupent l'ensemble des composants mécaniques et structurels qui assurent le support, la rotation et le bon fonctionnement de l'équipement tout au long du processus de cuisson.

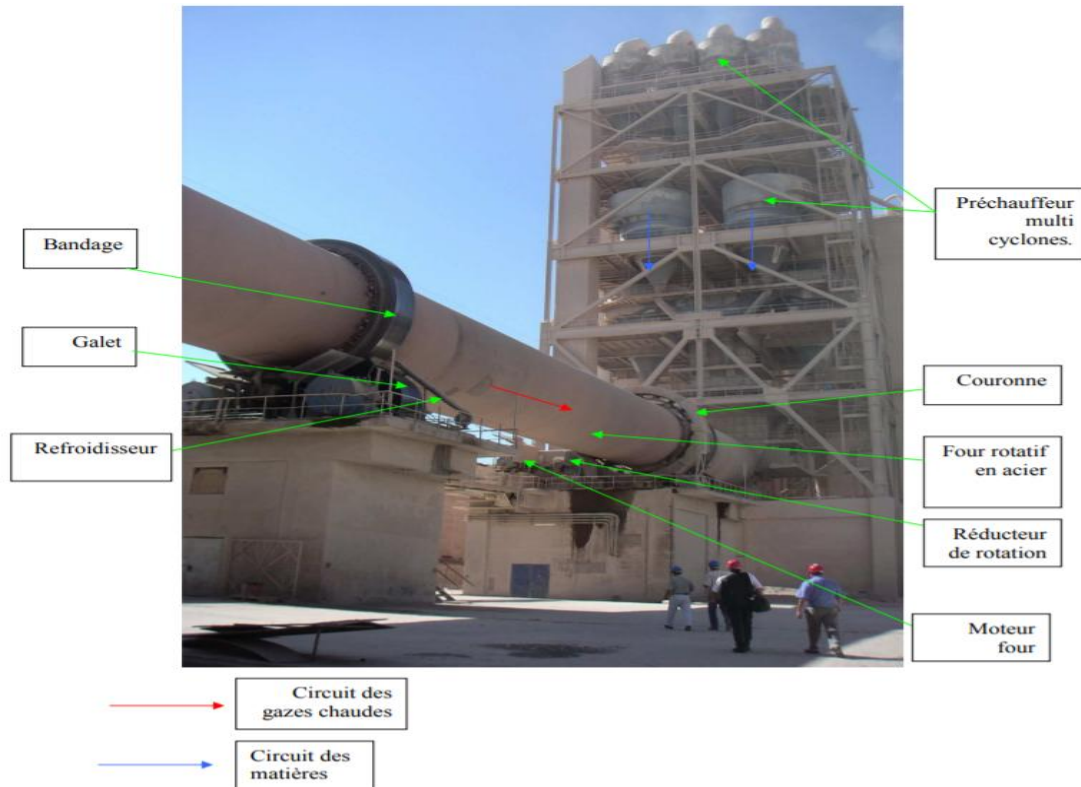


Figure I. 15 : Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie.

6.2.1 La virole :

Le tube du four rotatif se compose de plusieurs viroles reliées par soudage, suivant la taille et les possibilités de transport en atelier ou sur site, et il est garni d'un revêtement réfractaire.

La virole est un ensemble de tôles dont le rayon de courbure coïncide avec le rayon du four, les tôles sont soudées deux à deux tout en évitant une continuité de soudure dans la direction axiale.

La virole se compose de plusieurs tronçons de dimensions variées, ces tronçons sont assemblés par soudage et sont revêtues par des briques réfractaires. Chaque tronçon possède une épaisseur déterminée pour résister aux contraintes appliquées. La température de service à l'intérieur du four croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrer, donc il est nécessaire de contrôler en permanence la température à l'extérieur de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. De plus, il faut procéder à un contrôle visuel une fois par jour. La valeur de référence de la température maximale de la virole est de 350 °C. [9]



Figure I. 16 : virole du four rotatif

L'assemblage des viroles bout à bout s'effectue en quinconce de manière à ne pas avoir un alignement des soudures longitudinales. On distingue trois catégories de viroles en fonction de leur position sur l'axe du four :

- Les viroles courantes dont l'épaisseur varie de 22 à 36 mm ;
- Les viroles intermédiaires de 40 à 60 mm ;
- Les viroles porteuses ou sous bandage de 70 à 110 mm

La déformation de la virole due à l'ovalisation est perceptible jusqu'à une distance de $1.5 D_s$ de part et d'autre du bandage. Or, la jonction entre virole courante et viroles intermédiaires se situe à moins de $1.5 D_s$ du bandage où se combinent contraintes axiales et contraintes tangentielles, donc on porte un soin particulier aux contrôles des soudures dans cette zone.

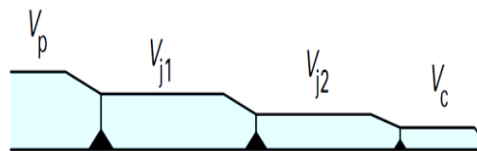


Figure I. 17 : Épaisseurs de viroles.

Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

- Contrainte pour une virole courante : $\leq 2 \text{ daN/mm}^2$;
- Contrainte pour une virole intermédiaire ou porteuse : $\leq 1.5 \text{ daN/mm}^2$;
- Variation de contrainte au changement d'épaisseur des viroles : $\leq 0.8 \text{ daN/mm}^2$;
- Flèche: 10^{-4} de la portée.

Le choix des différentes épaisseurs de viroles (forcément discontinues) doit être tel qu'il permette une variation des contraintes avec un minimum de discontinuité. [16]

6.2.2 Le Galet :

Le galet du four rotatif supporte tout le poids et les charges axiales du corps rotatif et équilibrer le mouvement axial et contrer la pente du four et assurer une utilisation uniforme de la surface de contact entre le bandage et le galet du four. La qualité du galet détermine si l'ensemble de l'équipement du four rotatif fonctionne sans problème. En raison de son poids élevé et de sa section épaisse, la qualité du moulage et la précision de

l'usinage doivent être élevées. Habituellement, les matériaux utilisés sont l'acier moulé et la fonte ductile. [17]



Figure I. 18 : Station des galets.

Il existe quatre types de galet : rigides, rotules rigides, auto-alignâtes et auto-alignâtes rotule. Pour les fours avec deux supports, il est recommandé d'utiliser une station de roulement à billes et douilles à alignement automatique. En cas de déformation accidentelle du four (vilebrequin), la surface de contact entre le bandage et le galet ne sera pas perdue, évitant ainsi des contraintes excessives, qui peuvent provoquer des fissures et la formation de petites cavités (piqûres). [16].

6.2.3 Station de bandage :

Les bandages, comme les galets sont actuellement de section rectangulaire pleine, les bandages creux en oméga disparaissant progressivement. La qualité du matériau employé est généralement identique à celle des galets.

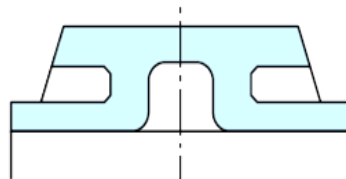


Figure I. 19 : bandage creux oméga.

Le diamètre intérieur des bandages est légèrement supérieur au diamètre extérieur de la virole avec ses platines pour permettre une dilatation différente, car la température de la virole est toujours plus élevée que celle du bandage. On utilise deux techniques différentes pour le positionnement radial du bandage, selon qu'il est du type flottant ou cranté [16].

Le choix entre bandage flottant et bandage cranté résulte d'un compromis entre :

- Le risque de frettage (étranglement) ;
- La réduction de l'ovalisation.

Le positionnement axial du bandage est assuré soit par deux cerces continues de part et d'autre du bandage s'appuyant sur des taquets d'arrêt soudés sur la virole, soit par des

blocs guides latéraux positionnés alternativement de part et d'autre du bandage et soudés sur la virole [16].

Le rôle principal du bandage est de protéger la virole du four de l'usure, de minimiser les frottements entre le four et ses paliers, tout en préservant la forme cylindrique de la virole afin d'éviter la fissuration et la détérioration des briques réfractaires. Le bandage réduit également le flux thermique transmis de la virole aux rouleaux de support.

6.2.4 Système d'entraînement du four :

Le système d'entraînement assure la rotation du four.

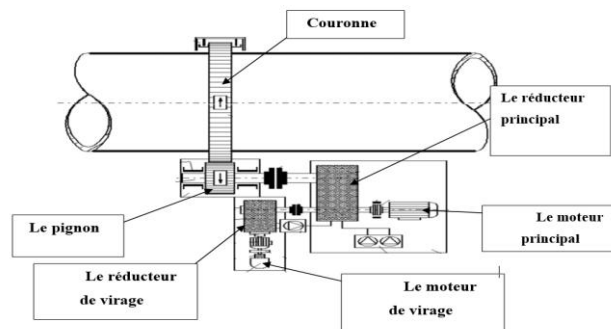


Figure I. 20 : Système d'entraînement du four.

Le moteur du four rotatif tourne 1000 t/m entraîne la rotation du réducteur à 13 t/m, ce dernier est engrené à la couronne qui fait tourner le four à 1,4 tours /minute, donc on peut distinguer trois étages de vitesse, le premier est à grande vitesse, le deuxième est à moyenne vitesse qui est le réducteur, et le troisième c'est le petit vitesse (1.4 tr/min) de four rotatif.

La couronne d'entraînement est l'élément le plus sensible du four est une pièce très coûteuse. Le pignon du réducteur est engrené à la couronne du four tous les engrenages sont plongés dans l'huile de refroidissement. Le four se déplace horizontalement en appuyant sur trois galets. Le groupe de poussé composé 80 % de système hydraulique de la butée : pompe d'huile, vérins, et un disque horizontal situé sous le four rotatif, il monte environ 15 centimètres dans 24 heures, et il descend dans 8 heures, cela pour l'usure uniforme de bandage, et aussi pour répondre à la dilatation du four à cause de la grande chaleur qui est à l'intérieur de ce dernier. La puissance consommée par le moteur pour faire tourner le four est 380 kW. [19]

6.2.5 Système de butée :

Le four présente une pente de 3 % à 4 %. Cette pente favorise le glissement du four vers la sortie de la matière. C'est là que se trouve le dispositif de retenue hydraulique appelé « arrêt du four ». Cet arrêt est conçu pour absorber une part importante de la charge axiale du four, jusqu'à 90 %. Le reste de la charge axiale est absorbé par les stations de rouleaux du four ; lorsque les rouleaux sont correctement réglés, ils peuvent supporter 10 % à 50 % de la charge axiale du four. [19]

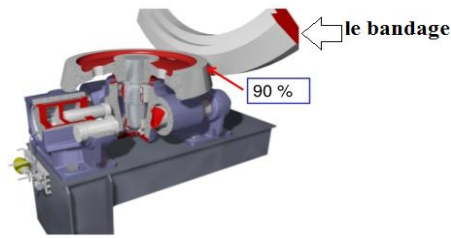


Figure I. 21 : Galet pousseur (la buté).

6.2.6 Transmission pignon/couronne

La transmission pignon/couronne a pour fonction de transmettre le couple généré par l'entraînement du four à la virole afin de permettre une rotation continue. Pour transmettre le couple requis, l'ensemble pignon/couronne est conçu en entraînement simple ou double. Il est équipé d'un système de lubrification et protégé des influences extérieures par un carter. [18] La transmission pignon/couronne se compose des éléments suivants :

- Couronne dentée
- Pignons rigides
- Paliers de pignon

7. Positionnement du four :

La position axiale du four sur les galets de support est contrôlée par un dispositif de poussée. Le constructeur définit dans le manuel d'instruction du dispositif de poussée les limites d'alarme pour les réglages axiaux de four.

- L'alarme maximale I est un signal instruisant l'opérateur à effectuer une inspection du dispositif de poussée et/ou de la position des galets de support.
- L'alarme maximale II arrête automatiquement la commande de four pour empêcher un endommagement de la garniture de la chambre à fumée, la garniture de la hotte et le galet de poussée.

Il peut être nécessaire de vérifier la direction de poussée des galets de support. Dans une situation critique, il peut être nécessaire d'appliquer de l'huile directement sur les galets de support, s'ils ont tendance à pousser le four vers le haut, mais il est très important d'assurer que l'huile est enlevée dès que possible après le réalignement des galets de support. La lubrification entre les galets de support et le bandage doit être une lubrification par graphite sec. [20]

8. Conclusion

Le four rotatif joue un rôle central dans le processus de fabrication du ciment en assurant la cuisson du mélange cru pour produire le clinker. À travers ce premier chapitre, nous avons mis en évidence les différentes étapes de production du ciment, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au broyage final. Nous avons également souligné l'importance du four rotatif, dont le fonctionnement repose sur des réactions physico-chimiques nécessitant des températures élevées et une gestion thermique rigoureuse.

***CHAPITRE 2* : Flux de chaleur et
modèles mathématiques**

1. Introduction

Le flux de chaleur dans un four rotatif est un phénomène complexe qui implique plusieurs mécanismes physiques, tels que la conduction, la convection et le rayonnement. Ces fournaies, couramment utilisées dans l'industrie (notamment pour la fabrication de ciment, de calcaire, de chaux, etc.), sont conçues pour traiter des matériaux solides ou semi-solides en les chauffant à des températures élevées, tout en permettant une rotation continue du four pour garantir une distribution uniforme de la chaleur. Les modes de ce transfert sont classés en trois catégories, correspondant à trois zones, l'extérieur, l'intérieur et à travers le four mur.

En raison de la différence de température entre la surface intérieure de four rotatif et la température de l'air ambiant, il se produira un transfert de chaleur du four vers l'atmosphère. Ces transferts de chaleur ont été étudiés dans nombreux travaux.

2. Importance du flux de Chaleur dans les Fours Rotatifs

Le flux de chaleur dans les fours rotatifs influence directement la qualité du clinker produit, l'efficacité énergétique du four, et les émissions de polluants. Une compréhension précise et une modélisation adéquate du flux de chaleur sont donc essentielles pour optimiser le fonctionnement du four, réduire les coûts énergétiques et minimiser l'impact environnemental.

3. Recherche bibliographique

Une étude d'Engin et Ari [21] porte sur les analyses d'audit énergétique d'un système de four rotatif sec en service dans une cimenterie en Turquie. Il a été constaté qu'environ 40 % de l'énergie totale consommée était perdue par les gaz chauds (19,15 %), la cheminée du refroidisseur (5,61 %) et la virole du four (15,11 %) (convection et rayonnement). L'article présente et analyse également des pistes de récupération de chaleur. Les résultats montrent qu'environ 15,6 % de l'énergie totale consommée pourrait être récupérée.

M. Mirhosseini et al [22] ont étudié l'effet d'un absorbeur, placé autour de four rotatif, sur les propriétés de transfert thermique. L'absorbeur est spécifiquement conçu pour la récupération de chaleur comme piste d'étude future.

H. Shahin et al [23] ont effectué une analyse de l'énergie thermique d'un four rotatif de la cimenterie. Ils ont trouvé qu'un allongement de la durée de 10 minutes du temps de séjour des matériaux à l'intérieur du four rotatif peut réduire la consommation de combustible.

Qian Yin et al [24] ont calculé les coefficients de transfert de chaleur de plusieurs échangeurs de la chaleur. Ensuite, plusieurs paramètres de système ont été analysés pour déduire la relation mathématique entre ces paramètres et les exigences du système de récupération de chaleur.

Acharya et al [25] ont étudié le transfert de chaleur par convection naturelle sur un cylindre horizontal de dimensions variées, solide et creux, suspendus dans l'air et placés au sol.

G. Kumar et al [26] ont traité, à l'aide des différents modèles de CFD, les effets de variation des paramètres d'entrée sur le profil de température de four rotatif. Les résultats trouvés sont en concordance avec celles du comportement thermique.

Maozohao Xie et all [27] un modèle à deux fluides et plusieurs approches de transfert thermique appliqués à une coupe transversale bidimensionnelle d'un four rotatif, les résultats trouvés ont été comparés avec les données expérimentales disponibles, ils ont trouvé que les principaux facteurs qui affectent sur la distribution de la température de fluide sont la température initiale du gaz et la vitesse de rotation du four.

Gongfali et all [28] un modèle numérique tridimensionnel du four rotatif est configuré à l'aide de méthode des éléments finis. Ils ont observé que la température de la paroi extérieure du four rotatif a une relation linéaire approximative avec l'épaisseur de croûtage du four.

Sak et all [29] ont étudié l'effet de l'intensité de la turbulence sur le taux de convection sur un cylindre chauffé, le nombre de Re était de 27700 pour le flux transversal de l'air et un diamètre du cylindre compris entre 0,50 et 1,47. Ils ont présenté les résultats de leur étude ainsi que, la longueur de la turbulence.

Sanitjai et all [30] ont présenté des corrélations empiriques distinctes de nombre de Nusselt pour la région de couche limite laminaire, recollement de la région de couche de cisaillement, et aussi la région d'écoulement de vortex périodique. Pour le Nusselt moyen, une corrélation empirique a été suggérée, et comparé aux corrélations précédentes en considérant tous les régimes.

Nakamura et all [31] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur à partir d'un cylindre pour des valeurs de Re compris entre 3000 et 15000. En outre, ils ont étudié également la variation de nombre de Nusselt pour des nombres de Reynold compris entre 70 et 30000.

Scholten et all [32] Une étude expérimentale a analysé les fluctuations du transfert thermique sur un cylindre en écoulement transversal. Les résultats montrent que ces fluctuations sont liées au décollement tourbillonnaire. Des mesures simultanées de flux thermique et de vitesse ont été réalisées. L'influence de la turbulence amont est abordée dans la seconde partie de l'étude.

Zdravkovich et all [33] ont trouvé qu'une étude les aspects pratiques de l'écoulement autour des cylindres circulaires, en s'appuyant sur des expériences, des simulations numériques et des applications industrielles. L'ouvrage analyse l'influence de paramètres tels que le rapport d'aspect, la hauteur finie, les variations de diamètre, le cône, la rotation, l'aspiration et les configurations spécifiques comme les tours de refroidissement.

Zhukauskas et all [34] ont réalisé une étude expérimentale sur le transfert de chaleur par convection à travers un cylindre, ils ont présenté des corrélations pour une large gamme de nombres de Prandtl et Reynolds.

Sarma et all [35] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur d'un écoulement transversal sur un cylindre, avec une condition limite d'écoulement thermique constante pour différents nombres de Reynolds (Re) compris entre 500 et 4700. De plus, ils ont étudié l'effet de l'intensité de la turbulence du l'écoulement libre sur le transfert de chaleur.

Jain et all [36] ont étudié le transfert de chaleur convectif écoulement laminaire force autour d'un cylindre. Les variations locales du nombre de Nusselt autour du cylindre en fonction du temps ont été présentées pour deux nombre du Reynolds égaux à 100 et 200.

Ils ont constaté que leurs résultats numériques n'étaient pas tout à fait conformes avec d'autres résultats expérimentaux.

Schmidt et al [37] ont fait l'un des premiers travaux qui rapporte le transfert de chaleur sur un cylindre. Depuis lors, nombreux résultats expérimentaux qui étudient le transfert de chaleur et les caractéristiques hydrodynamiques des cylindres ont été présentés.

Mohamed A.E. Aldeib et al [38] ont réalisé une modélisation mathématique pour simuler le transfert de chaleur dans un four rotatif à ciment visant à prédire les températures aux parois intérieures et extérieures du four rotatif afin de prévenir de nombreux problèmes industriels liés à son fonctionnement, tels que la perte de revêtement, la formation de tâches rouges et de prédire les conditions optimales pour un fonctionnement sûr.

Shihab Ali Khalifa et al [39] ont mené une étude visant à optimiser les quantités d'air et de combustible dans le four, en tenant compte des paramètres de conception de la cimenterie. L'analyse du bilan thermique a permis de déterminer les sources de déperdition de chaleur du four. Plusieurs méthodes possibles de récupération de chaleur sont présentées et discutées : production d'électricité, récupération de chaleur à la surface du four et préchauffage des matières premières avant le processus de clinkérisation.

4. Analyse thermodynamique du four rotatif :

Dans les parois réfractaires ou la coque d'un four rotatif, les molécules forment une structure réticulaire rigide. Bien que les molécules ne migrent pas à l'intérieur de ce réseau, elles possèdent une énergie interne sous diverses formes, telles que l'énergie vibratoire et l'énergie cinétique rotationnelle, elles-mêmes proportionnelles à la température locale. Si le matériau n'est pas à température uniforme, c'est-à-dire en cas de différence de température, l'énergie est transférée par interaction moléculaire : les molécules les plus énergétiques de la zone de température la plus élevée se transfèrent aux molécules les moins énergétiques de la zone de température la plus basse. La vitesse de ce transfert d'énergie dépend à la fois du gradient de température dans la direction du transfert et des modes d'interaction moléculaire présents dans le matériau (conductivité thermique).

L'analyse thermodynamique d'un four rotatif est réalisée pour déterminer l'énergie effective en utilisant les premier et deuxième principe de la thermodynamique. La capacité thermique massique, la température de sortie, les valeurs de pression et la chaleur massique constante des matériaux entrants et sortant sont déterminées pendant le fonctionnement du four rotatif. Pour un système ouvert fonctionnant en régime permanent, les équations suivantes sont appliquées. La masse à l'équilibre est donnée par [40] :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (\text{II.1})$$

Le bilan énergétique peut être exprimé comme suit [40] :

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (\text{II.2})$$

Tandis que le bilan énergétique général est décrit comme [40] :

$$\dot{Q}_{net,in} - \dot{W}_{net,out} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (\text{II.3})$$

5. Mécanismes de transfert de chaleur dans un four rotatif

Bien que la division des modes du flux de chaleur simplifie excessivement l'analyse thermique de four rotatif, elle est adéquate à condition de se rendre compte que les trois modes de transfert de chaleur possèdent des caractéristiques communes. Chaque mode soit représenté par différents types d'équations, mais ils se réduisent tous à la forme commune définie par le flux de chaleur :

$$\text{Flux thermique} = \text{Force motrice} * \text{Résistance} = \text{Conductance} - \text{Force motrice}$$

5.1 Transfert de chaleur par conduction dans le four :

Dans les matériaux solides tels que les parois réfractaires ou la virole d'un four rotatif, les molécules possèdent une énergie interne rigide, qui forme une structure réticulaire. Les molécules ne migrent pas au sein du réseau ; elles possèdent une énergie interne sous diverses formes, telles que l'énergie vibratoire et l'énergie cinétique rotationnelle, proportionnelles à la température locale.

Le taux de transfert d'énergie dépend du gradient de température et des modes d'interaction moléculaire présents dans le matériau concerné (conductivité thermique). La loi de Fourier sur la conduction thermique est donc définie comme suit :

$$\Phi_{1-2} = K_p \left(\frac{T_1 - T_2}{L_{1-2}} \right) \quad (\text{II.4})$$

5.2 Transfert de chaleur par convection :

Comme mentionné précédemment, le transfert de chaleur par convection se produit entre un solide et un fluide adjacent en mouvement. Le taux de transfert de chaleur entre une surface à température T_p et un fluide à température T_f peut être calculé à partir de la loi de Newton sur le refroidissement, dont l'énoncé mathématique est le suivant :

$$\Phi = hA(T_p - T_f) \quad (\text{II.5})$$

5.3 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est lié à des ondes caractéristiques ; ces échanges dépendent fortement de la température et de la direction d'émission.

Le rayonnement est un mode d'échange de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique. La détermination des flux de chaleur échangés par rayonnement nécessite la connaissance des propriétés radiatives, et plus particulièrement de l'émissivité, des solides, de la paroi du tambour et des gaz, ainsi que du modèle de rayonnement.

$$\phi = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (\text{II.6})$$

6. Modèles mathématiques

Nous présentons les principales approches utilisées dans la plupart des études sur les fours rotatifs à clinker. La première approche repose sur un modèle unidimensionnel illustrant les réactions solide-solide se produisant dans un four à ciment et s'appuie sur une approximation quasi-stationnaire. Ce modèle étudie l'influence des principaux paramètres de fonctionnement et de conception sur la consommation énergétique du four. La dernière approche se distingue par la proposition et l'évaluation d'une solution pratique d'utilisation d'un caisson secondaire pour réduire la consommation énergétique des fours rotatifs à ciment.

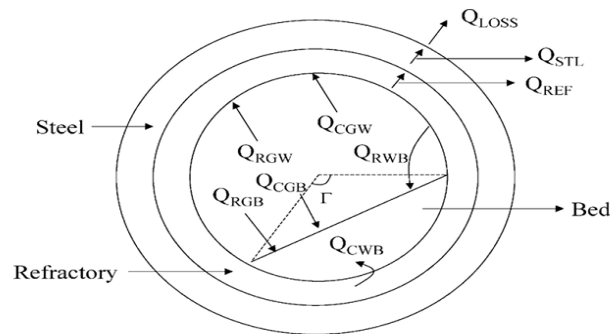


Figure II. 1 : Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale [47]

6.1 Le flux de chaleur entre le gaz(G) et les briques réfractaires/paroi interne(W) [47] :

❖ Par convection ;

Le flux de chaleur se produit lorsque des gaz chauds circulent sur la surface des briques réfractaires dans le four rotatif, transférant de l'énergie par le mouvement du fluide et contribuant au chauffage uniforme des parois du four. L'équation est donnée par ;

$$Q_{CGW} = h_{CGW} A_{CGW} (T_G - T_W) \quad (\text{II.7})$$

Avec A_{CGW} ; l'aire d'échange entre le gaz et les briques réfractaires, elle se calcule par des considérations géométriques et est généralement égale à

$$A_{CGW} = r_B (2\pi - \Gamma) \quad (\text{II.8})$$

Qui est l'aire d'échange entre le mur intérieur et le solide rapportée par viola et al [55].

h_{CGW} a été calculé par l'expression de Tscheng et Watkinson [42] qui à travers une étude expérimentale, ont proposé la relation suivante :

$$h_{CGW} = 1.54 \frac{k_G}{D_e} Re_D^{0.575} Re_\omega^{-0.292} \quad (\text{II.9})$$

Où k_G a été calculée par l'expression (Mujumdar [47]) :

$$k_G = -7.49 \times 10^{-3} + 1.709 \times 10^{-4} T_G - 2.377 \times 10^{-7} T_G^2 + 2.202 \times 10^{-10} T_G^3 - 9.463 \times 10^{-14} T_G^4 + 1.581 \times 10^{-17} T_G^5 \quad (\text{II.10})$$

Et D_e , Re_D , Re_ω sont calculée par les expressions suivant (Mujumdar [47]) :

$$D_e = \frac{0.5D * (2\pi - \Gamma + \sin \Gamma)}{(\pi - (\frac{\Gamma}{2}) + \sin(\frac{\Gamma}{2}))} \quad (\text{II.11})$$

$$Re_D = \frac{\rho_g x V_g x D_e}{\mu_g} \quad (\text{II.12})$$

$$Re_\omega = \frac{\rho_g x \omega x D_e^2}{\mu_g} \quad (\text{II.13})$$

Nous avons retenu l'expression de Kreith et Black [41] :

$$h_{CGW} = 0.036 \frac{kg}{D} Re^{0.33} Pr^{0.33} (\frac{D}{L})^{0.055} \quad (\text{II.14})$$

Lorsque l'écoulement est turbulent avec la condition suivante $10 < \frac{L}{D} < 400$, L est la longueur du four et D son diamètre.

❖ **Par rayonnement;**

Le flux de chaleur ici est le résultat de gaz à haute température qui transfèrent l'énergie thermique aux briques réfractaires tapissant l'intérieur du four, influençant considérablement le bilan thermique global et l'efficacité du processus.

Par ailleurs Ketslakh et Tsibin [45] ont proposé aussi une expression (Q_{RGW}) plus précise à savoir ;

$$Q_{RGW} = \sigma * \psi * \frac{T_G^4 - T_W^4}{T_G - T_W} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec } \psi = \varepsilon_G \varepsilon_W [1 + \Phi * (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)] \Omega \quad (\text{II.16})$$

$$\text{où } \Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\Gamma}{2})}{\pi - \frac{\Gamma}{2}} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{et } \Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_W)[1 - \Phi(1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B))]} \quad (\text{II.18})$$

Ainsi Hottel et Sarofim [46] ont proposé une expression également précise du flux de chaleur échangée entre le gaz et la paroi intérieur lorsque : $\varepsilon_w \geq 0,8$.

$$Q_{RGW} = \sigma * A_{RGW} * (\varepsilon_W + 1) * \left(\frac{\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_W^4}{2} \right) \quad (\text{II.19})$$

Il est à noter que la surface où le transfert de chaleur par convection et par rayonnement est la même, donc : $A_{RGW} = A_{CGW}$ [II.8].

6.2 Le flux de chaleur entre le gaz(G) et le solide/lit(B) : [47]

❖ **Par rayonnement ;**

La chaleur des gaz à haute température est transmise à la surface exposée du solide, ce qui élève rapidement la température du matériau, en particulier dans les zones à haute température.

Sass [43] et Lyons [44], nous avons des expressions simplifiées de Q_{RGB} qui engendrent des erreurs non négligeables notamment :

$$Q_{RGB} = 2\sigma \varepsilon_G \varepsilon_B (T_G^3 + T_B^3) \quad (\text{II.20})$$

Celle de Lyons et al [43]

$$\text{Et } Q_{RGB} = \sigma \varepsilon_G \frac{T_G^4 - T_B^4}{T_G - T_B} \quad (\text{II.21})$$

Celle de Sass [44]

Par ailleurs Ketslakh et Tsibin [45] ont proposé aussi une expression (Q_{RGB}) plus précise à savoir ;

$$Q_{CGB} = \sigma * \psi * \frac{T_G^4 - T_B^4}{T_G - T_B} \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Avec } \psi = \varepsilon_G \varepsilon_B [1 + \Phi * (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_W)] \Omega \quad (\text{II.23})$$

$$\text{où } \Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\Gamma}{2})}{\pi - \frac{\Gamma}{2}} \quad (\text{II.24})$$

$$\text{et } \Omega = \frac{1}{1-(1-\varepsilon_G)(1-\varepsilon_W)[1-\Phi[1-(1-\varepsilon_G)(1-\varepsilon_B)]]} \quad (\text{II.25})$$

Ainsi Hottel et Sarofim [46] ont proposé une expression également précise du flux de chaleur échangée entre le gaz et la paroi intérieur lorsque : $\varepsilon_B \geq 0,8$.

$$Q_{RGB} = \sigma * A_{RGB} * (\varepsilon_B + 1) * \left(\frac{\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_B^4}{2} \right) \quad (\text{II.26})$$

Avec A_{RGB} : L'aire d'échange entre le gaz et solide. Elle se calcule par des considérations géométriques et est généralement prise égale à :

$$A_{RGB} = 2r_B \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \quad (\text{II.27})$$

❖ Par convection ;

Le flux de chaleur par convection se produit lorsque des gaz chauds circulent sur et entre les particules du lit solide, permettant l'échange d'énergie par contact direct et améliorant la pénétration globale de la chaleur dans le matériau.

$$Q_{CGB} = h_{CGB} A_{CGB} (T_G - T_B) \quad (\text{II.28})$$

La surface à travers laquelle le transfert de chaleur par convection est considéré comme étant la même que celle par rayonnement donc ; $A_{RGB} = A_{CGB}$ [II. 27]

h_{CGB} a été calculé par l'expression de Tscheng et Watkinson [42] basés sur des travaux expérimentaux ;

$$h_{CGB} = 0.46 \frac{k_G}{D_e} Re_D^{0.535} Re_\omega^{0.104} \eta^{-0.341} \quad (\text{II.29})$$

Où k_G a été calculée par l'expression (Mujumdar [47]) : [II.10]

Et D_e , Re_D , Re_ω sont calculée par les expressions [II.11, II.12, II.13] respectivement η est Fraction solide ;

$$\eta = \frac{\Gamma - \sin(\Gamma)}{2\pi} \quad (\text{II.30})$$

6.3 Le flux de chaleur entre les briques réfractaires/paroi interne(W) et le solide/lit(B) : [47]

❖ Par conduction ;

Lorsque le solide entre en contact avec la paroi chaude du four pendant la rotation, un flux de chaleur se produit, permettant un transfert d'énergie direct de la surface réfractaire au matériau.

$$Q_{CWB} = h_{CWB} A_{CWB} (T_W - T_B) \quad (\text{II.31})$$

Pour ce mode de flux de chaleur, beaucoup de recherches se sont basées sur h_{CWB} constant, comme Lyons et al [43]. Il était à estimer $222.0 \leq h_{CWB} \leq 250.0$. Cependant, certaines études l'ont prise comme variable, notamment Tscheng et Watkinsion [42].

h_{CWB} a été évalué en utilisant la corrélation empirique de Tscheng et Watkinsion [42] comme suit :

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

A_{CWB} : L'aire d'échange entre le solide et les briques réfractaires et se calcule par considérations géométriques (Perron [54]) et est généralement prise égale à :

$$A_{CWB} = \Gamma r_B \quad (\text{II.33})$$

❖ Par rayonnement ;

Les briques réfractaires émettent un rayonnement thermique vers le solide contribuant au chauffage du matériau, en particulier dans les zones où l'interaction gaz-solide est limitée.

$$Q_{RWB} = \sigma A_{RWB} * \varepsilon_B * \varepsilon_W * \Omega (T_W^4 - T_B^4) \quad (\text{II.34})$$

Avec Ω qui est le facteur de forme pour les rayonnements qui sont calculés comme suit :

$$\Omega = \frac{L_{gcl}}{2(\pi - \beta)r} \quad (\text{II.35})$$

La zone de contact où se produit le transfert de chaleur est considérée comme la même ainsi ; $A_{RWB} = A_{CWB}$ [II.33]

La consommation énergétique d'un four à ciment est imputable à plusieurs processus internes, notamment le chauffage des solides à la température de réaction, les réactions endothermiques de clinkérisation et la fusion des solides. L'énergie des solides et des gaz chauds sortant du four à ciment est récupérée dans le refroidisseur de clinker et les calcinateurs/préchauffeurs.

L'énergie perdue dans l'environnement par la surface du four n'est généralement pas récupérée et représente environ 15 à 20 % de l'apport énergétique total. Par conséquent, tout doit être mis en œuvre pour réduire les pertes de la virole du four (sans compromettre la qualité du produit) par unité de poids afin d'améliorer la performance énergétique du four.

La figure II.2 illustre les différents modes de transfert thermique lors du fonctionnement d'un four rotatif. Sur cette figure, la zone 1 représente la couche de revêtement, la zone 2 la couche réfractaire et la zone 3 la virole du four. La zone 4 représente l'espace annulaire ou interstitiel entre les deux viroles, la zone 5 la virole secondaire et la zone 6 la couche d'isolation. En l'absence de virole secondaire, les couches 4 à 6 seraient absentes. Pour notre étude de cas, nous avons considéré l'absence de virole secondaire ; par conséquent, les zones 4, 5 et 6 ne sont pas prises en compte. L'énergie est transférée du fond au lit par

rayonnement et convection du gaz du fond. De plus, un échange d'énergie se produit entre le lit et les parois internes du four par rayonnement et conduction. Pour calculer les pertes thermiques dues au rayonnement et à la convection du four, la température de la virole externe est nécessaire. Le modèle a également été utilisé pour calculer les pertes par rayonnement et par convection et déterminer lesquelles sont les plus importantes dans un four rotatif. [51]

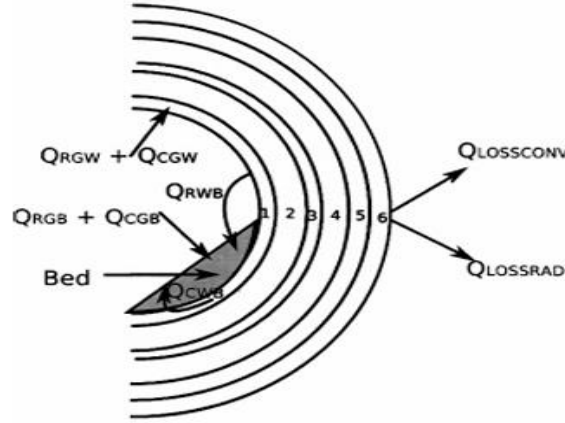


Figure II. 2 : Le flux de chaleur dans la section transversale du four. [51]

Les équations de l'équilibre thermique en régime permanent dans le four s'écrivent comme suit [49] :

$$Q_{RGW} + Q_{CGW} - Q_{RWB} - Q_{CWB} = Q_{COAT} \quad (II.36)$$

$$Q_{COAT} = Q_{REF} \quad (II.37)$$

$$Q_{REF} = Q_{VIROLE} \quad (II.38)$$

$$Q_{VIROLE} = Q_{CONV-VIROLE} + Q_{RAD-VIROLE} \quad (II.39)$$

Étant donné que la virole secondaire est considérée comme étant constituée d'un matériau à faible émissivité, le rayonnement de la virole secondaire vers la virole du four est négligé. [51]

$$Q_{RAD-VIROLE} = \sigma A_{VIROLE} \epsilon_{VIROLE} (T_{VIROLE}^4 - T_{AIR}^4) \quad (II.40)$$

$Q_{CONV-VIROLE}$ est le taux de flux de chaleur par convection entre les parois chaudes de la virole et l'air traversant l'espace interstitiel. Les taux de flux de chaleur par convection sont donnés par ;

$$Q_{CONV-VIROLE} = h_{CONV} A_{VIROLE} (T_{VIROLE} - T_{AIR}) \quad (II.41)$$

En fonction de la masse d'air traversant l'espace annulaire, le coefficient du flux de chaleur par convection a été calculé comme suit :[51]

$$h_{CONV} = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{d_o}{d_i}\right)^{0.8} \quad (II.42)$$

$Q_{LOSSCONV}$ et $Q_{LOSSRAD}$ sont les pertes de la couche externe dues respectivement à la convection et au rayonnement.

Dans notre étude de cas, les différentes viroles 4, 5 et 6 sont considérées comme négligeables, c'est pourquoi les pertes de chaleur par convection et rayonnement dans le four rotatif ont été calculées comme suit [49] :

$$Q_{LOSSCONV} = h_{CONV} A_{VIROLE} (T_{VIROLE} - T_O) \quad (II.43)$$

$$\text{Avec } h_{CONV} = \left(0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{15}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right) \left(\frac{k_a}{D} \right) \quad (II.44)$$

$$Q_{LOSSRAD} = \sigma A_{SHELL} \epsilon_{VIROLE} (T_{VIROLE}^4 - T_O^4) \quad (II.45)$$

6.4 La perte de chaleur du four vers l'environnement est résolue par ;

Cette perte se produit lorsque la chaleur est transmise de la surface réfractaire interne chaude à travers les couches isolantes et la virole en acier, avant d'être dissipée dans l'environnement par convection et rayonnement. Son ampleur dépend de la conductivité thermique et de l'épaisseur des matériaux réfractaires et isolants utilisés. [50]

$$Q_{W \rightarrow VIROLE} = \frac{T_W - T_{VIROLE}}{\sum_j R_{wall,j}^{cd}} \quad (II.46)$$

$$\text{Avec } R_{wall,j}^{cd} = \frac{\ln(d_{outer,j}/d_{inner,j})}{2\pi L k_j} \quad (II.47)$$

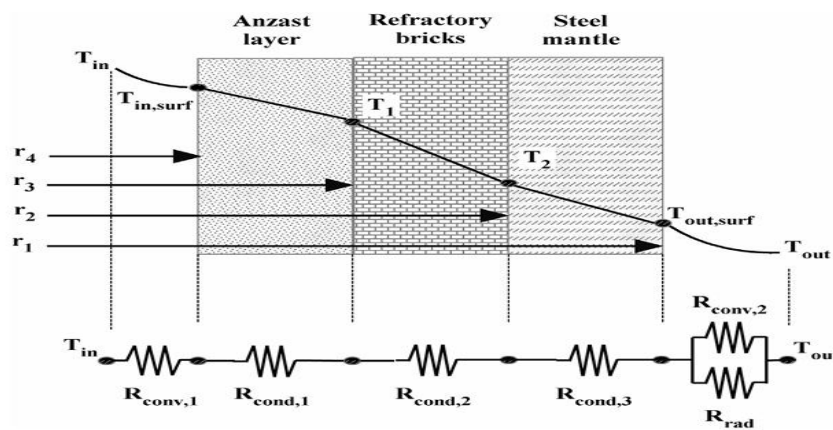


Figure II. 3 : Le réseau de résistance thermique pour le flux de chaleur à travers le manteau du four rotatif. [40]

Donc ;

$$R_{cond,1} = \frac{1}{2\pi L k_1} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \quad (II.48)$$

$$R_{cond,2} = \frac{1}{2\pi L k_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \quad (\text{II.49})$$

$$R_{cond,3} = \frac{1}{2\pi L k_3} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (\text{II.50})$$

7. Conclusion

Comprendre la prédominance du rayonnement dans le flux de chaleur au sein d'un four rotatif est essentiel pour optimiser la conception et le fonctionnement de celui-ci. Cela influence le choix des matériaux pour le revêtement du four, la conception du brûleur et les stratégies globales d'efficacité énergétique. En privilégiant l'amélioration du transfert de chaleur radiatif, notamment en améliorant les caractéristiques de la flamme et en optimisant la géométrie du four, les cimenteries peuvent optimiser leur production de clinker.

Le modèle mathématique du flux de chaleur dans un four rotatif à ciment est complexe et nécessite une approche intégrée combinant conduction, convection et rayonnement. Une modélisation précise est essentielle pour optimiser le processus de production de clinker, améliorer l'efficacité énergétique, réduire les émissions et déterminer le flux de chaleur dominant dans le four. Grâce à ces modèles, les ingénieurs peuvent simuler différentes conditions de fonctionnement, identifier les goulots d'étranglement thermiques et mettre en œuvre des stratégies pour améliorer les performances globales du four. La recherche bibliographique est un fondement essentiel de tout travail universitaire. Elle nécessite une approche systématique et critique pour garantir que les nouvelles recherches soient bien informées et originales. Une revue de la littérature bien menée contribue grandement à la qualité et à la crédibilité des travaux de recherche.

***CHAPITRE 3* : Modélisation du flux de
chaleur avec FORTRAN**

1. Introduction

Le présent chapitre se concentre sur les méthodes mathématiques essentielles pour modéliser les phénomènes physiques liés aux fours rotatifs. En outre, il présente l'interface du logiciel FORTRAN, qui est utilisé pour étudier les phénomènes physiques abordés dans cette étude. Ce logiciel présente plusieurs avantages, notamment une grande facilité d'utilisation et un fort développement dans le domaine de la mécanique.

2. Présentation du logiciel

Fortran (abréviation de Formula Translation) est un langage de programmation de haut niveau conçu pour le calcul scientifique et l'ingénierie. Il a été créé dans les années 1950 par IBM pour les calculateurs scientifiques de la série IBM 704.

Fortran est devenu populaire dans les domaines de la simulation, de la modélisation numérique, de l'optimisation et de la programmation parallèle. Il offre des fonctionnalités avancées pour le traitement de données numériques et est utilisé dans divers domaines tels que la physique, la mécanique des fluides, la chimie, la biologie, l'astronomie et bien d'autres encore.

Avantage par rapport à un langage interprété (e.g. MATLAB)

- Nul besoin de programme annexe pour s'exécuter
- Rapidité d'exécution
- Sécurité du code exécutable
- Toutefois chaque modification du programme source requiert une recompilation.

Les contenus des lignes en Fortran doit respecter les quelques règles suivantes :

- Une ligne de commentaire doit commencer par un « c » ou une « * » en première colonne.
- Tout ce qui suit un ! dans une ligne est aussi considéré comme un commentaire.
- Les instructions:
 - Doivent commencer à partir de la colonne 7 (ou plus) ;
 - Se placent automatiquement avec [X]Emacs en appuyant sur la touche TAB ;
 - Ne doivent pas dépasser la colonne 72.
- Les Labels (ou étiquettes) sont entre les colonnes 2 et 5 et gérés automatiquement avec [X]Emacs.
- Pour couper une instruction sur plusieurs lignes, on met un caractère quelconque en colonne 6 des lignes de suite. 'frtr2'

classement des langages les plus populaires en avril 2021. Même s'il a été éclipsé par d'autres langages au fil des dernières décennies, il reste solidement ancré dans le domaine du High-Performance Computing. [52]

5. Fonctionnement de Fortran

Fortran est un langage compilé, un éditeur de texte ASCII et un compilateur devraient donc suffire pour commencer. Un compilateur populaire est le compilateur Fortran de GNU (gfortran), qui est disponible gratuitement dans le cadre de la collection de compilateurs GNU (gcc). Pour les utilisateurs de systèmes de type Unix, ce compilateur devrait être facilement disponible, soit dans le gestionnaire de paquets du système (GNU/Linux), soit dans le gestionnaire de paquets du système (GNU/Linux (Linux)), soit dans le paquetage Xcode pour Mac OS X (OSX). Il est également possible d'installer gfortran sur les systèmes Microsoft Windows (Windows), en utilisant les systèmes Minimalist GNU pour Windows (MinGW) ou Cygwin.

Il existe de nombreux autres compilateurs, dont certains offrent des fonctionnalités utiles telles que des optimiseurs de code plus puissants comme des optimiseurs de code plus puissants, des outils de débogage/profilage pratiques et/ou un environnement de développement intégré (IDE) convivial. Il n'est pas possible de couvrir l'ensemble du paysage. Veuillez consulter un expert local ou un administrateur système pour obtenir des conseils sur un compilateur approprié. Les programmes d'exemple ont été testés avec des versions récentes de fortran et de Intel Fortran Compiler(ift), sous Linux. Cependant, les programmes devraient être facilement adaptables à d'autres compilateurs et/ou plates-formes récents.[53]

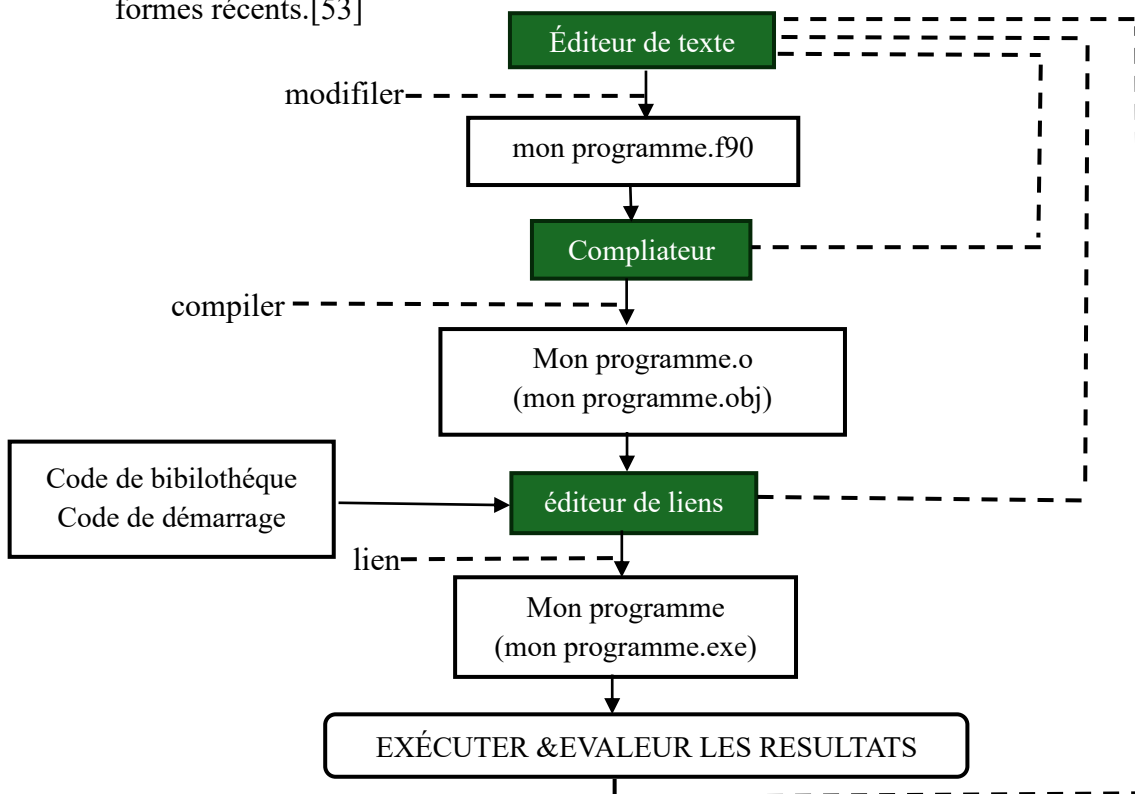


Figure III. 2 : Schéma du processus de programmation en Fortran. Les fichiers sont représentés par des ronds blancs et les programmes externes par des cases vertes [53]

6. La conception d'un programme Fortran

La conception d'un programme commence par l'analyse des besoins et la structuration de l'algorithme. Ensuite, on passe à la programmation, en utilisant les instructions et les structures de contrôle propres à Fortran. Enfin, on valide et teste le programme pour garantir son bon fonctionnement.

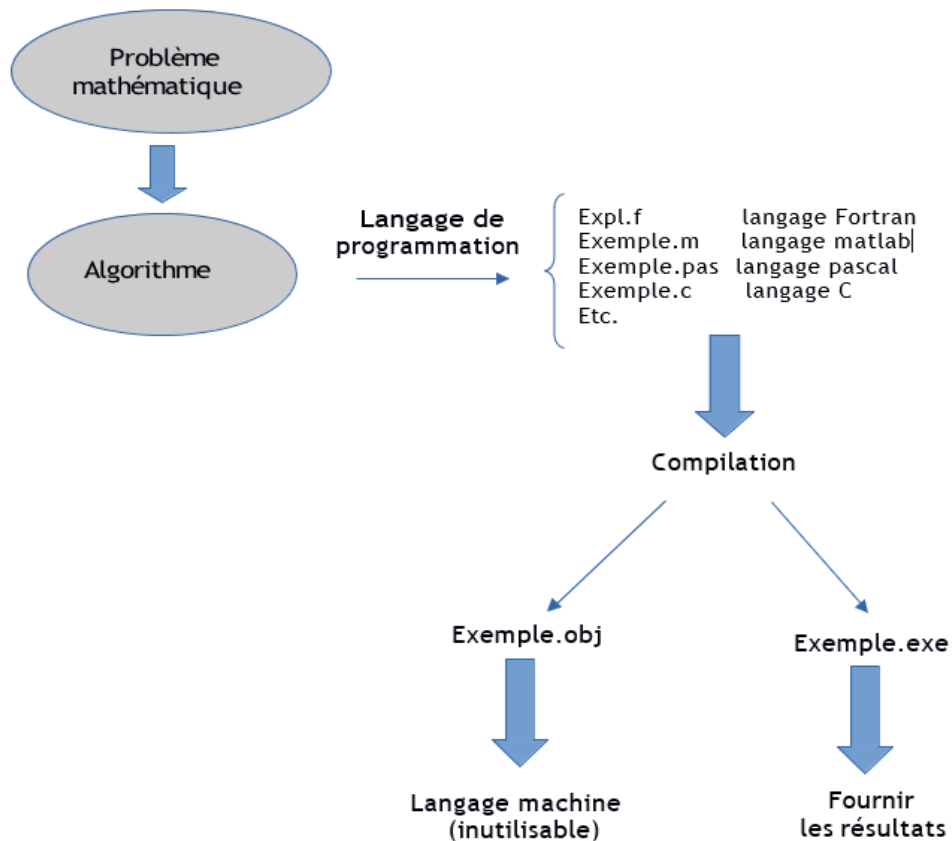


Figure III. 3 : Schéma représentatif des différentes étapes de la conception d'un programme Fortran [52]

7. Organisation d'un programme FORTRAN

Succession de « pavés » élémentaires qu'on appellera blocs fonctionnels. Il en existe 3 sortes :

1. Le programme principal inclus entre program (facultatif) et end

```

program nom
...
end
  
```

2. Les sousroutines incluses entre subroutine et end subroutine nom

```

subroutine nom (arguments)
...
end
  
```

- 3.

```

type fonction nom (arguments)
...
end

```

8. Modélisation du flux de chaleur avec Fortran

Fortran est largement utilisé pour la modélisation et la simulation des phénomènes du flux de chaleur en raison de ses capacités de calculs intensifs et de manipulation de grandes matrices de données. Voici comment Fortran peut être utilisé dans ce domaine :

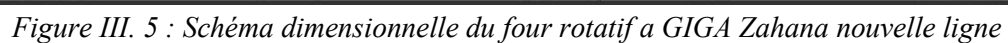
8.1 Données dimensionnelle et analytiques du four rotatif

a. Données dimensionnelles

Désignation de l'équipement	Four rotatif
Spécifications et modèle de l'équipement	Ø 4.8 x 72m
Code de l'équipement	KLN172
Poids de l'équipement	Environ 864 tonnes
Date de production	2017
Température ambiante	22 °C
Altitude	Altitude de +340m
Diamètre de four	Ø 4.8 m
Longueur de four	72 m
Inclinaison de four	3.5%
Vitesse de transmission	14.4 rpm
Plage de vitesse de rotation de four	0.45 / 4.5 rpm

Tableau III. 1 : Tableau des données dimensionnelle pris auprès de la cimenterie GIGA Zahana





b. Données analytiques

Les différentes températures associées à l'analyse de notre modèle sont répertoriées dans le tableau ci-dessous ;

Température	Unité en K
Gaz	2173 jusqu'à 2333 avec un pas de 20
Solide	1553 jusqu'à 1633 avec un pas de 10
Briques	1473
Paroi (wall)	2237
Virole (Shell)	573 jusqu'à 773 avec un pas de 22.222
Ambiante	295

Tableau III. 2 : Différentes températures données

D'autres constantes connues incluent ;

- La constante de Stefann-Boltzman = 5.67×10^{-8}
- Fraction de masse du gaz = 0.748
- La viscosité Dynamique = 0.818
- L'angle de repos = $\frac{\pi}{6}$ rad
- La longueur du four = 72 m
- Le diamètre Intérieure du four = 4.8 m
- La longueur de cuisson = 20 m
- Accélération due à la gravité = 9.81 ms^{-2}
- Alpha $\alpha_G = 0.748$

Ceux-ci varient en fonction des différentes valeurs ;

- La vitesse axiale = 0.534 jusqu'à 1.602 m/s
- La vitesse angulaire = 0.209 jusqu'à 0.628 Rad/s
- Le coefficient de transfert de chaleur = 222 jusqu'à 238 avec un pas de 2

Les différents l'émissivités comprennent ;

- L'émissivité des briques = 0.8
- L'émissivité du gaz = 0.27
- L'émissivité du solide = 0.781
- L'émissivité de l'acier = 0.78

Les Conductivité thermique sont :

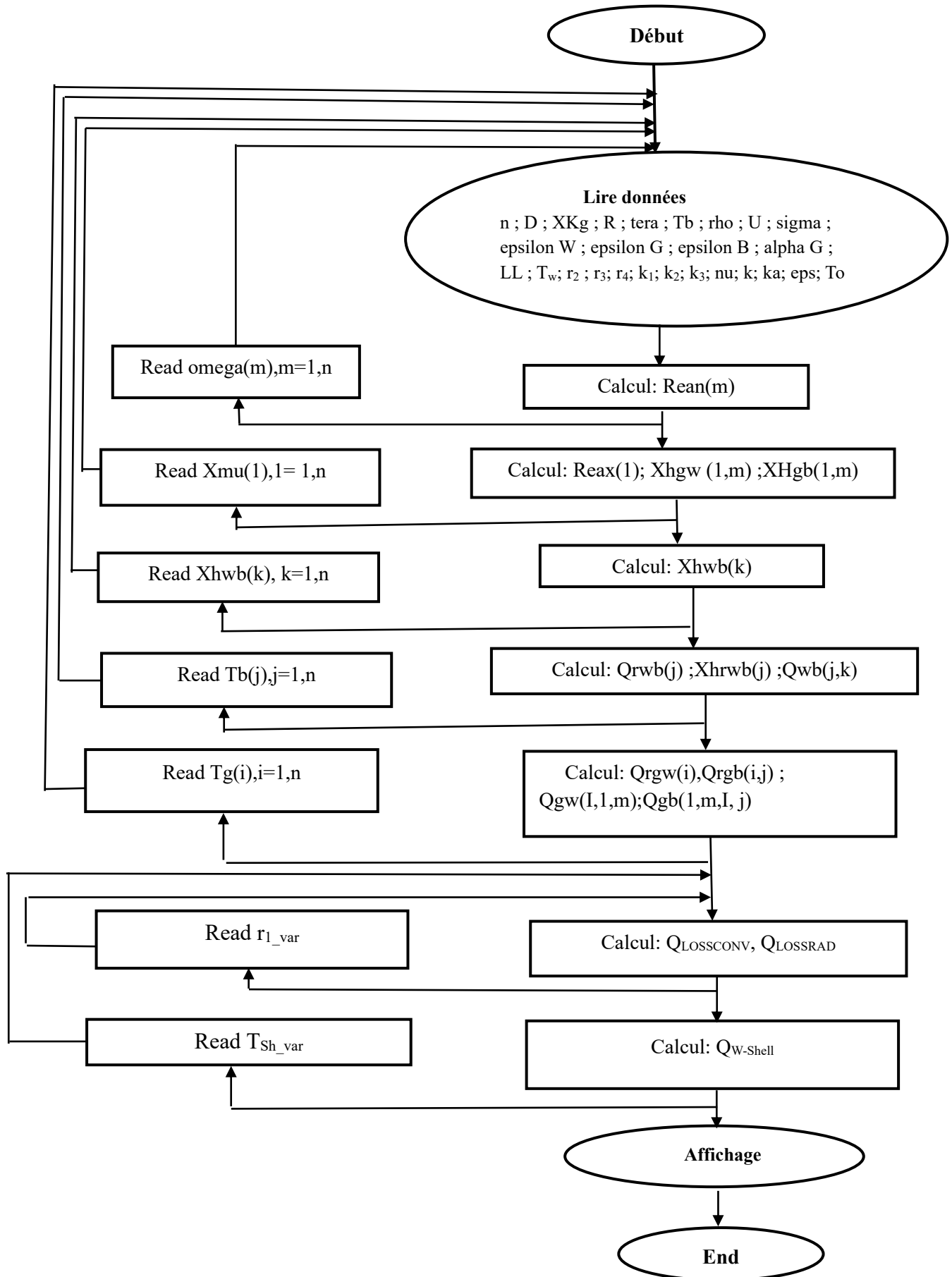
- Du gaz (k) = 0.035 W/mK
- Du brique et croûtage (k_1 et k_2) = 2.7 W/mK
- De l'acier (k_3) = 27 W/mK
- De l'air = 0.0257 W/mK

Le rayon du four rotatif et les différentes épaisseurs étant connus, les différents rayons sont donc ;

Zone	Epaisseur mm	m
Le rayon Intérieure du four r_3		2.4
Rayon de croûtage r_1	200	1.98 jusqu'à 2.18 avec un pas de 0.013
Rayon de brique r_2	220	2.18
Rayon de l'acier r_4	30	2.43

Tableau III. 3 : les différents rayons

8.2 Organigramme du processus de fonctionnement de notre programme



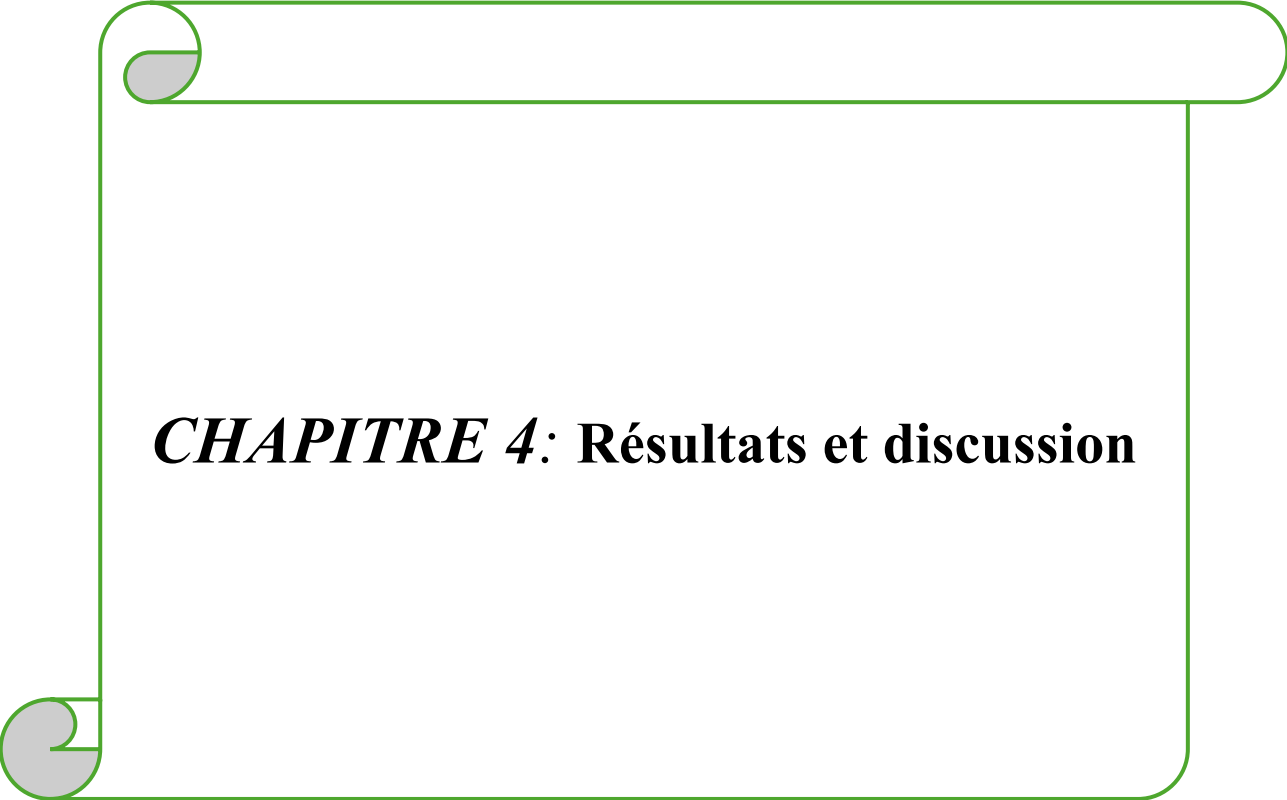
9. Avantages de Fortran pour les analyses du flux de chaleur

- Efficacité : Fortran est optimisé pour les calculs numériques, offrant des performances élevées pour les simulations complexes.
- Fiabilité et robustesse : Fortran est utilisé depuis plusieurs décennies dans des applications de haute précision, telles que la météorologie, l'ingénierie nucléaire et le flux de chaleur. Il est donc particulièrement fiable pour les simulations nécessitant des résultats de haute qualité et une exécution stable sur de longues périodes.
- Précision : Les types de données en Fortran permettent une précision accrue dans les calculs scientifiques.
- Bibliothèques scientifiques : De nombreuses bibliothèques existent en Fortran pour résoudre des équations différentielles, effectuer des calculs de matrices.
- Longévité et maintenabilité du code : Étant un des langages les plus anciens dans le domaine du calcul scientifique, Fortran jouit d'une grande stabilité et est largement utilisé dans de nombreux projets à long terme. Les codes Fortran sont souvent bien documentés et peuvent être maintenus pendant de nombreuses années, ce qui est un avantage pour les simulations de transfert de chaleur qui nécessitent des simulations longues et complexes.

10. Conclusion

Le Fortran, un des langages de programmation les plus anciens, continue d'avoir une place importante dans le domaine des calculs scientifiques et numériques, malgré l'émergence de nombreux autres langages modernes. Son efficacité pour le calcul haute performance, sa stabilité et sa capacité à gérer des opérations complexes en font un choix privilégié dans des secteurs comme la météorologie, la physique, l'ingénierie et la simulation numérique.

En conclusion, bien que d'autres langages aient largement dominé l'industrie, le Fortran reste indispensable pour des applications nécessitant des calculs mathématiques et scientifiques à grande échelle. Sa communauté active, son optimisation pour les architectures modernes et son vaste ensemble de bibliothèques font de lui un outil toujours pertinent dans certains domaines de la recherche et du développement., mais de nombreuses autres techniques et approches peuvent être explorées en fonction des besoins spécifiques des projets de simulation.



CHAPITRE 4: Résultats et discussion

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la démonstration de notre modèle analytique et l'interprétation des résultats obtenus. Nous aborderons ensuite l'influence des différents paramètres sur notre système, à savoir la variation des vitesses axiale et angulaire, la température du solide et du gaz, ainsi que l'effet de la conductivité thermique. Nous examinerons également le flux totale de chaleur perdue dans l'environnement par la paroi externe du four rotatif, par rayonnement et par convection, et déterminerons laquelle des deux entraîne la plus grande perte de chaleur. Ce chapitre développe notre étude de cas en s'appuyant sur des graphiques permettant d'examiner l'influence des paramètres clés sur les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement.

L'analyse thermique et énergétique d'un four rotatif dans une cimenterie est essentielle pour optimiser son fonctionnement et réduire les coûts énergétiques. Les graphiques présentés dans ce mémoire illustrent l'effet de différentes variables opérationnelles sur le flux de chaleur au sein du four

L'objectif est de comprendre l'influence de chaque paramètre sur le transfert de chaleur afin d'identifier les pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique du four rotatif.

2. Résultats et discussion

Les résultats du modèle analytique réalisée à l'aide du logiciel FORTRAN mettent en évidence l'influence de plusieurs paramètres opérationnels sur le flux de chaleur dans un four rotatif utilisé pour la production de ciment. Il apparaît clairement que l'élévation des températures des gaz (T_g), des solides (T_b) et de la virole (T_{sh}) entraîne une augmentation du transfert thermique total. Cette tendance est particulièrement marquée dans le cas du transfert de chaleur par rayonnement, qui croît de manière exponentielle avec la température, soulignant ainsi sa forte dépendance thermique. Par ailleurs, l'augmentation des vitesses axiale et angulaire du four améliore le transfert de chaleur, ce qui suggère que l'optimisation de ces vitesses pourrait accroître le rendement énergétique du système. Enfin, une hausse du coefficient de transfert thermique se traduit par une amélioration linéaire du transfert convectif, mettant en lumière le rôle essentiel de ce paramètre. En résumé, ces résultats démontrent qu'une gestion optimisée des températures, des vitesses de rotation et des coefficients de transfert peut conduire à une amélioration significative de l'efficacité thermique du four.

3. Etude de cas et résultat :

3.1 Effet de la température de gaz

La température du gaz influence fortement le flux de chaleur. En augmentant, elle améliore les propriétés thermiques du gaz, ce qui accroît l'efficacité des échanges thermiques avec la charge solide.

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.

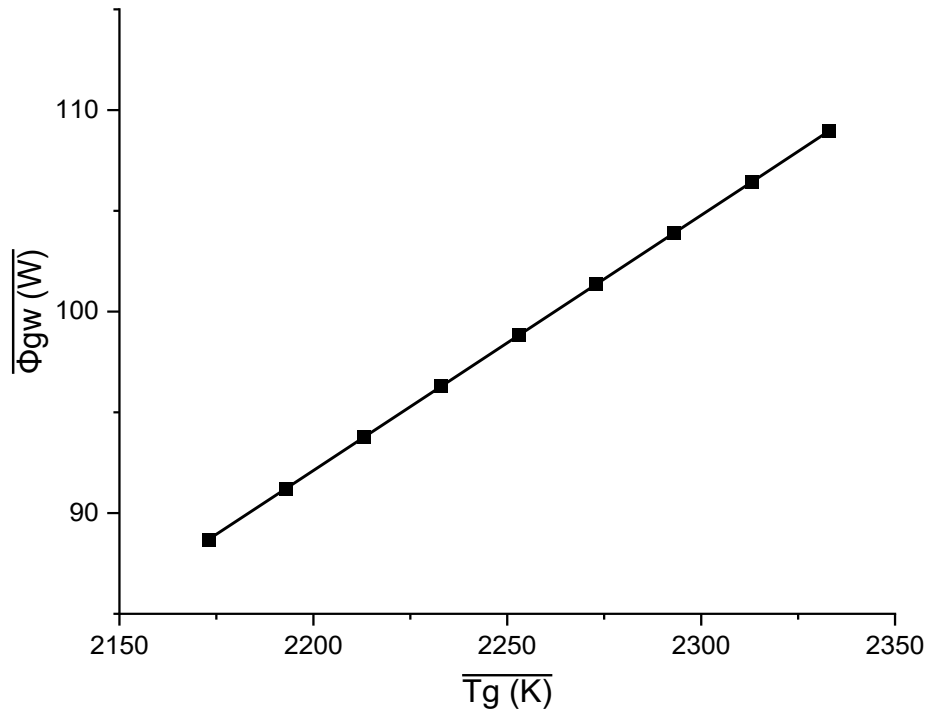


Figure IV. 1 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la température de gaz

La figure IV.1 montre l'évolution du flux de chaleur échangée entre le gaz et les briques Q_{cgw} en fonction de la température du gaz T_g . On observe une nette tendance linéaire, qui montre qu'à mesure que la température augmente, le flux de chaleur transférée augmente proportionnellement. Cela met en évidence une forte corrélation entre la température du gaz et le flux de chaleur par convection. Initialement, à une température de 2173 K, la chaleur échangée est d'environ 88,6 W. Lorsque la température atteint 2333 K, cette valeur augmente régulièrement jusqu'à environ 108,97 W. Cette progression linéaire suggère un comportement stable et prévisible du système dans cette plage de température.

- **Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgw} entre les gaz et les briques.**

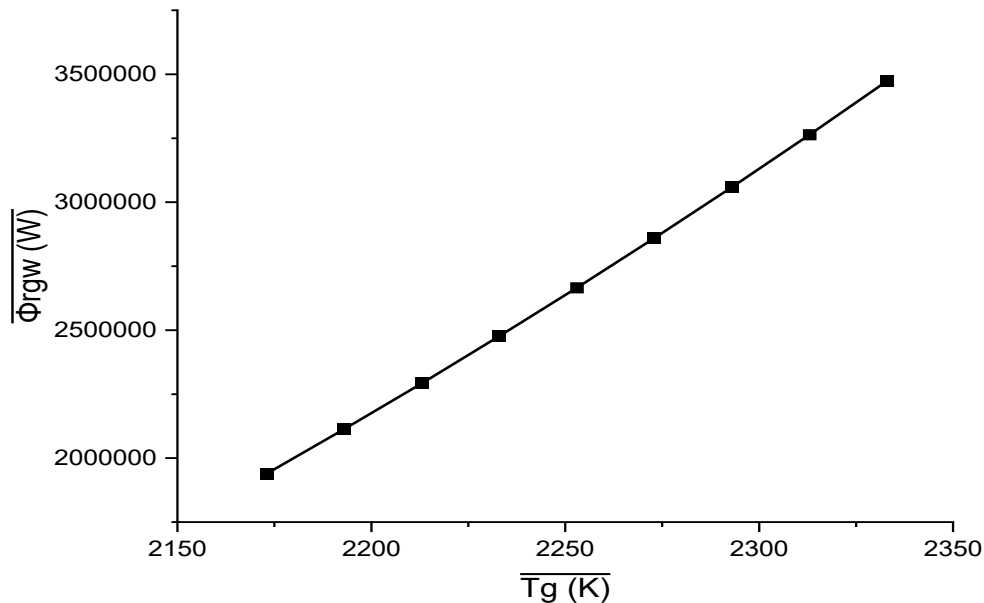


Figure IV. 2 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgw} entre les gaz et les briques par rapport la température de gaz

La figure IV.2 montre la variation du flux transférée par rayonnement entre les gaz et les briques en fonction de la température du gaz T_g . On observe une augmentation exponentielle de Q_{rgw} , indiquant la sensibilité du flux radiatif à la température. Cette augmentation rapide s'explique par la forte dépendance du rayonnement thermique à la température, conformément à la loi de Stefan-Boltzmann, selon laquelle le flux de chaleur émise est proportionnelle à la température élevée à la puissance quatre. Plus précisément, la chaleur transférée débute à environ 1938776 W à une température de 2173 K et atteint environ 3474052 W lorsque la température atteint 2333 K. Cette tendance montre clairement que, dans ce cas, la température du gaz est le seul facteur déterminant du flux de chaleur par rayonnement.

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.

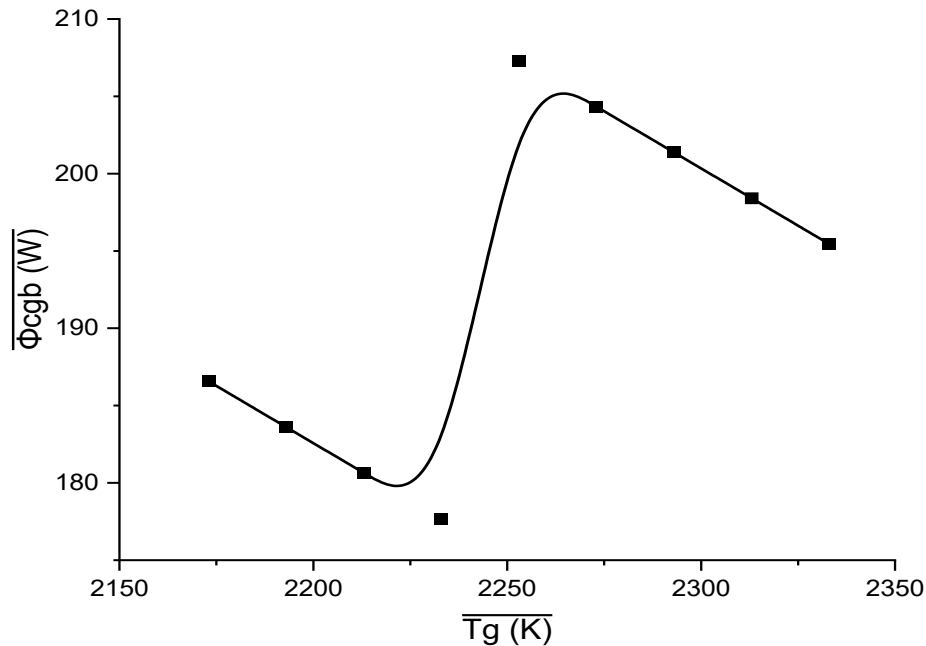


Figure IV. 3 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de gaz

Figure IV.3 montre une non linéaire avec une phase de baisse, puis de montée, puis de nouvelle baisse. De $T_g = 2173$ K à 2213 K, le flux de chaleur diminue d'environ 186.56 W à moins de 180.64 W parce qu'il y a une réduction du gradient de température ou à des changements dans le régime d'écoulement. De 2213 K à 2253 K, le flux de chaleur augmente fortement, atteignant un pic autour de 207.295 W. Cela indique des conditions optimales du flux de chaleur, en raison d'un gradient thermique plus élevé ou d'une convection plus efficace. De 2253 K à 2333 K, le flux de chaleur diminue progressivement, ce qui s'explique par une diminution du gradient thermique. Le graphique montre que la chaleur convective n'augmente pas linéairement avec la température du gaz. Il existe une température optimale du gaz (~ 2253 K) à laquelle le flux de chaleur est maximal. L'augmentation de la température du gaz entraîne d'abord une diminution, puis une augmentation marquée, puis une diminution de la chaleur transférée.

- **Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide.**

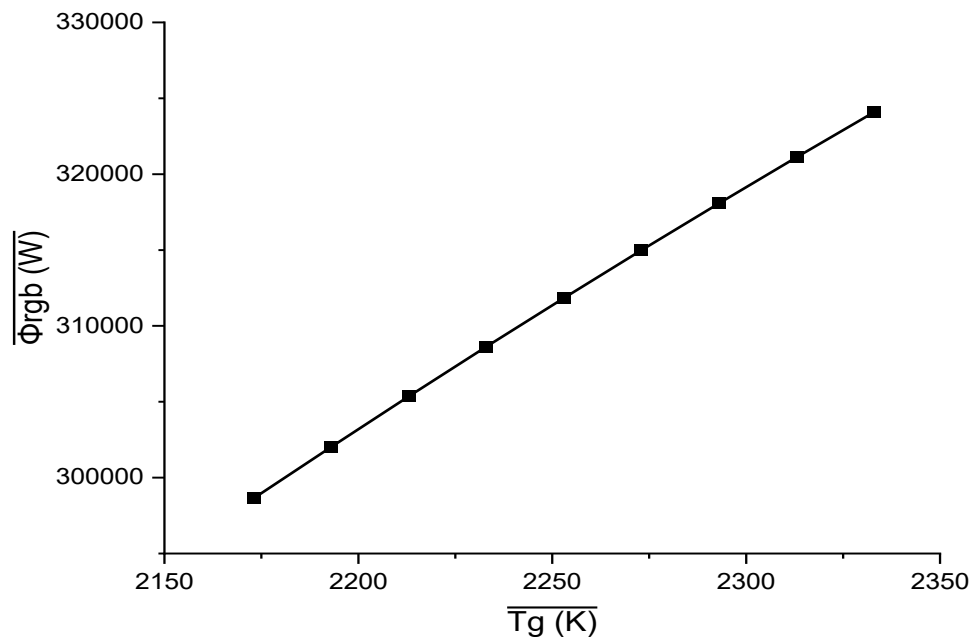


Figure IV. 4 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de gaz

Le figure IV.4 montre une droite ascendante régulière. Le flux de chaleur rayonnée augmente linéairement avec la température du gaz. On passe d'environ 298631.1 W à 324086.5 W quand la température du gaz augmente de 2173 K à 2333 K. Cela signifie que plus le gaz est chaud, plus il émet de chaleur par rayonnement vers le solide. Le rayonnement thermique est proportionnel à la puissance quatrième de la température absolue (loi de Stefan-Boltzmann). Cependant, si le système est conçu de manière à maintenir une certaine linéarité, la courbe semble quasi-linéaire, comme ici qui signifie que le gaz joue un rôle dominant dans l'échange thermique radiatif avec le solide, surtout à haute température. L'augmentation de la température du gaz entraîne une hausse régulière et significative du flux de chaleur transférée par rayonnement.

3.2 Effet de la température du solide

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide

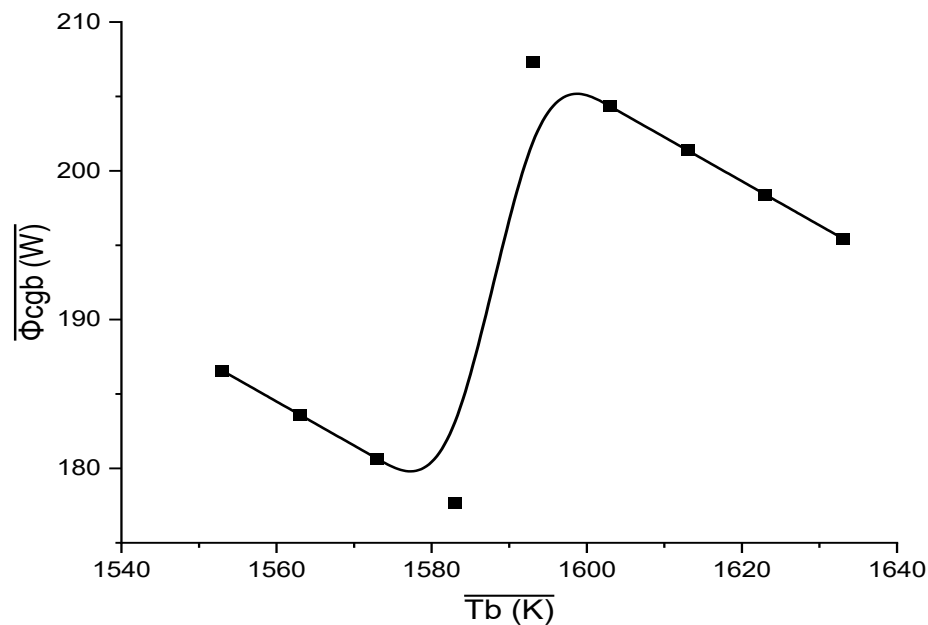


Figure IV. 5 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de solide

La figure IV.5 présente le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre le gaz et le solide par rapport température du solide T_b . La forme est non linéaire. Il y a une légère diminution du flux de chaleur échangée entre 1553 K et 1583 K, ce qui est dû à un gradient de température plus faible entre le gaz et le solide, réduisant ainsi l'efficacité du flux de chaleur. Ensuite, une augmentation marquée est observée, atteignant un maximum vers 1593 K (207,295 W). Cette phase correspond à une température optimale du solide à laquelle le flux de chaleur par convection est le plus efficace, en raison d'un gradient thermique plus élevé et d'un meilleur couplage entre les mécanismes de transfert. Enfin, au-delà de cette température, le flux de chaleur transférée diminue progressivement jusqu'à environ 1633 K. Cette diminution s'explique par une diminution du gradient thermique, une possible saturation thermique du solide ou une convection moins efficace. Ainsi, le comportement global indique l'existence d'une température optimale à laquelle le flux convectif est maximal, avec une efficacité plus faible en dehors de cette plage. Le flux de chaleur par convection entre le gaz et le solide dépend non linéairement de la température du solide.

- **Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide.**

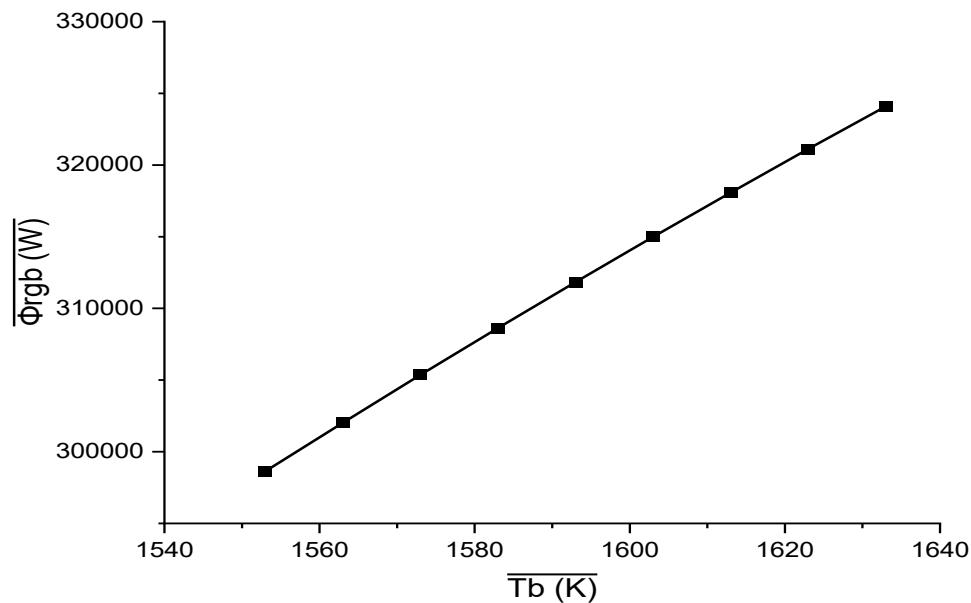


Figure IV. 6 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rgb} entre les gaz et le solide par rapport la température de solide

Le figure IV.6 illustre la variation du flux de chaleur Q_{rgb} transférée par rayonnement entre un gaz et un solide en fonction de la température du solide T_b . On y observe une augmentation progressive et quasi linéaire de cette chaleur tout au long de la courbe. Au point de départ, lorsque la température du solide est de 1553 K, la chaleur échangée s'élève à 298631,10 W. En fin de graphique, à 1633 K, elle atteint 324086,50 W. Cela indique une relation linéaire entre la température du solide et le flux de chaleur transférée, dans la plage considérée. Il est important de noter que la chaleur rayonnée dépend à la fois de la température du gaz et de celle du solide. L'augmentation de la température du solide entraîne une hausse de la chaleur échangée, un comportement comparable à celui provoqué par l'élévation de la température du gaz.

La forme quasi linéaire de la courbe s'explique par la nature de l'équation du rayonnement thermique, qui est régie par la loi de Stefan-Boltzmann. Théoriquement, le flux de chaleur rayonnée est proportionnel à la différence des températures absolues à la puissance quatre.

- **Le flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les briques et le solide.**

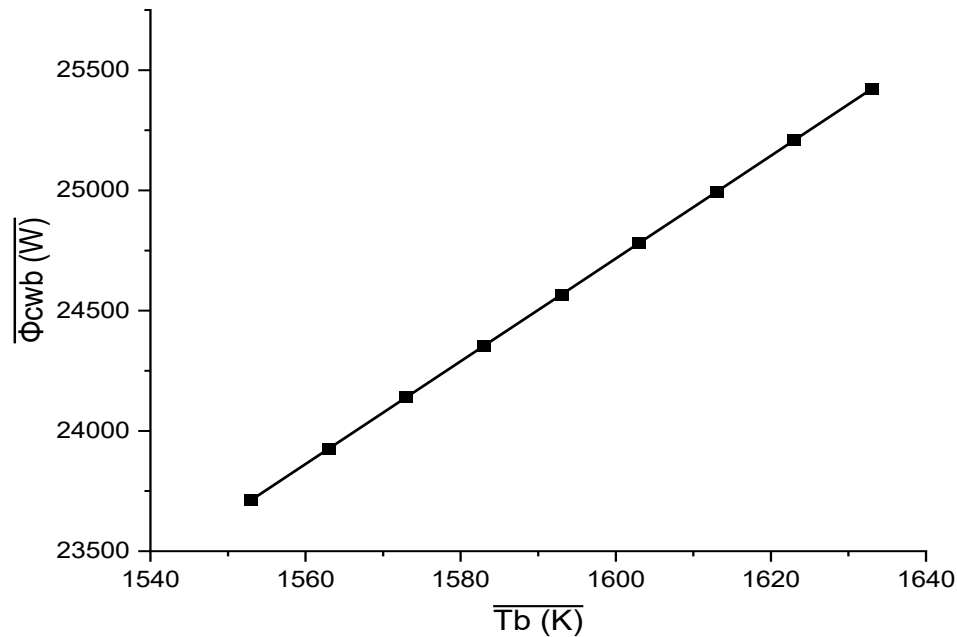


Figure IV. 7 : Variation du flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre le solide et les briques par rapport la température de solide

La figure IV.7 présente le flux de chaleur Q_{cwb} entre les briques et le solide par rapport à la température T_b qui est généré par la conduction. Il montre une augmentation linéaire du flux de chaleur Q_{cwb} avec l'augmentation de la température du solide T_b qui signifie que plus le solide est chaud, plus le flux de chaleur transférée par conduction entre les briques et le solide est élevée. On a le flux de chaleur qui débute de 23712,79 W par rapport à une température de 1553 K ce graphe nous résulte une droite linéaire à sa fin qui est de 25421,83 W par rapport à une température de 1633 K car le flux de chaleur et en fonction de deux variable le coefficient de conductivité thermique (h_{bs}), la température du solide. Ce graphique met en évidence que la conductivité thermique entre les briques et le solide est proportionnelle à la température du solide.

- Le flux de chaleur par rayonnement Q_{rwb} entre les briques et le solide.

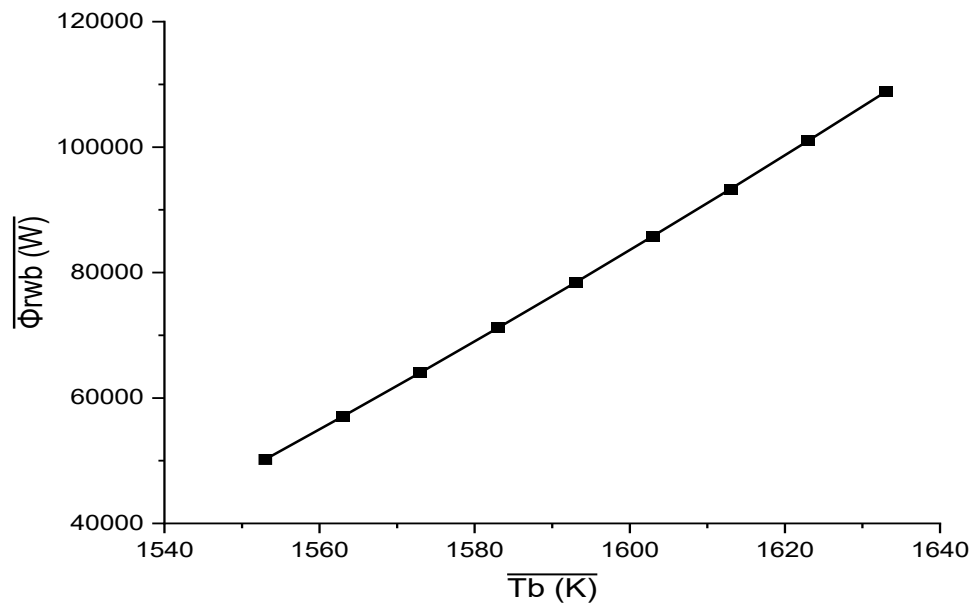


Figure IV. 8 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{rwb} entre le solide et les briques par rapport la température de solide

La figure IV.8 illustre le flux de chaleur Q_{rwb} transmise par rayonnement entre une paroi et un solide, en fonction de la température du solide T_b . Il y a une augmentation régulière, avec une courbe légèrement incurvée, traduisant une croissance presque linéaire, mais en réalité non parfaitement droite. La chaleur transférée commence à 50216,92 W pour une température de 1553 K, et atteint 108824,10 W à 1633 K. Dans ce cas, la température du solide est la seule variable influençant le flux de chaleur.

Donc on conclure que la courbe est croissante en fonction de cette variable unique qui suggère que la croissance est exponentielle, ce qui confirme la forte dépendance du rayonnement thermique à la température.

3.3 Effet de la vitesse axiale

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.

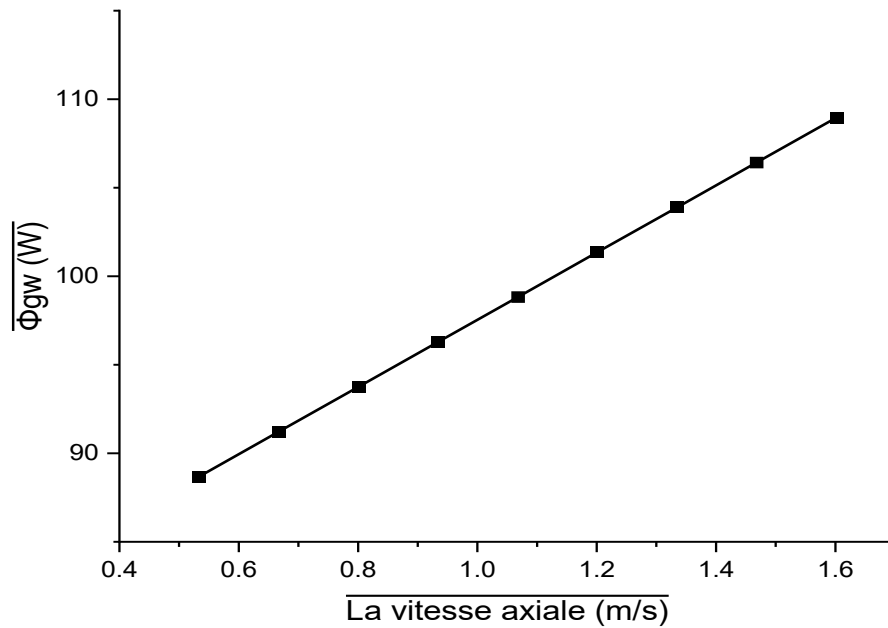


Figure IV. 9 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la vitesse axiale

Ce figure IV.9 présente le flux de chaleur transférée par convection entre le gaz et les briques par rapport à la vitesse axiale. Le graphique montre une augmentation régulière et linéaire qui signifie que plus la vitesse du gaz augmente, plus le flux de chaleur transférée aux briques par convection augmente. Le flux de chaleur commence à 88,60 W pour une vitesse de 0,534 m/s et se termine à 108,9680 W pour une vitesse de 1,602 m/s. Cela forme un graphique en ligne droite. Le flux de chaleur par convection dépend directement du mouvement du gaz. Une vitesse axiale plus grande réduit la couche limite thermique au contact des briques, ce qui améliore le transfert thermique. Le graphique met en évidence une relation linéaire croissante entre la vitesse axiale et le flux de chaleur par convection entre les gaz et les briques. Cela suggère que l'augmentation du débit du gaz est un levier efficace pour améliorer le flux thermique par convection dans le four rotatif.

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.

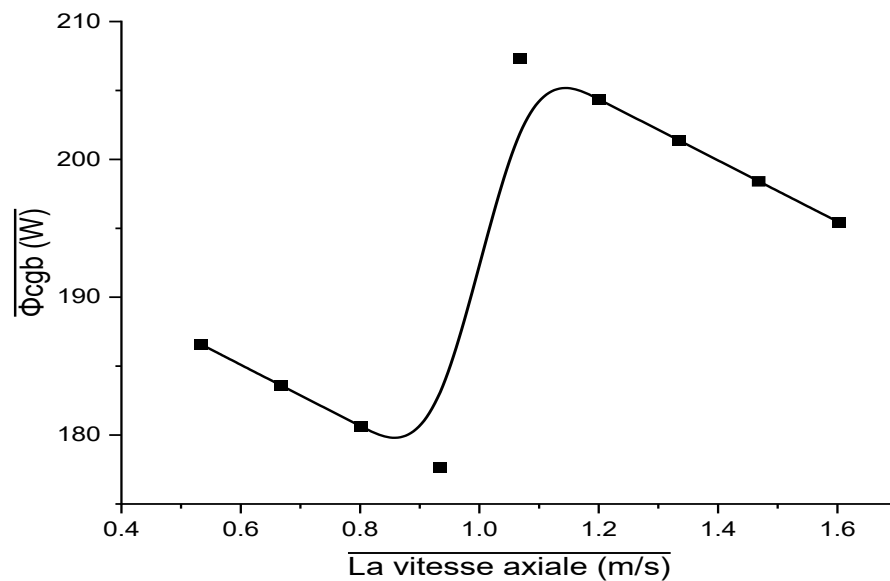


Figure IV. 10 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la vitesse axiale

La figure IV.10 présente le flux de chaleur Q entre le gaz et le solide par rapport à la vitesse axiale qui est généré par la convection. La courbe n'est pas linéaire, on observe une évolution en forme de « V inversé » ou de pic, Q_{cgb} augmente d'abord avec la vitesse axiale jusqu'à un maximum. Ensuite, Q_{cgb} diminue à mesure que la vitesse axiale continue d'augmenter. On a le flux de chaleur qui débute de 186,56550 W à une vitesse de 0,534 m/s puis chute jusqu'à 177,68 W à la vitesse de 0,934 m/s puis il augmente à 207,2950 W par rapport à une vitesse de 1.068 m/s puis il prend chute jusqu'à 195,44W a une vitesse de 1,602 m/s. Ce comportement suggère qu'il existe une vitesse optimale à laquelle le flux de chaleur entre le gaz et le solide est maximal. À faible vitesse, le flux de chaleur augmente car le gaz reste plus longtemps en contact avec le solide. À vitesse moyenne, le mélange thermique est optimal et la convection est efficace et à vitesse élevée, le gaz traverse trop rapidement la surface solide, réduisant le temps d'échange thermique, ce qui diminue le transfert de chaleur.

Ce graphe montre une relation positive entre la vitesse axiale et la chaleur convective transférée, suggérant que l'augmentation de la vitesse axiale améliore l'efficacité du flux de chaleur par convection.

3.4 Effet de la vitesse angulaire

- Le flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques.

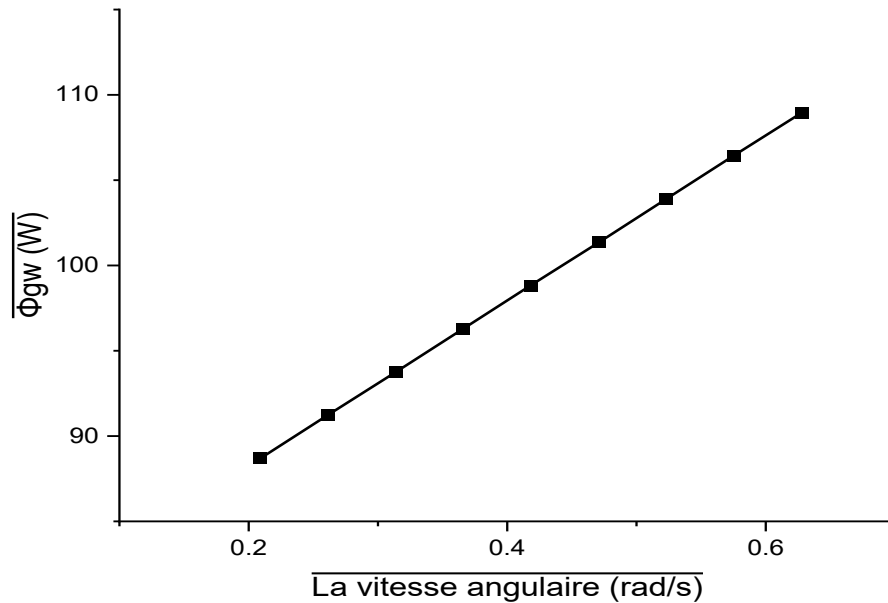


Figure IV. 11 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgw} entre les gaz et les briques par rapport la vitesse angulaire

La figure IV.11 présente le flux de chaleur Q_{cgw} entre le gaz et les briques par rapport à la vitesse angulaire (oméga) qui est généré par la convection on voit qu'on a une courbe linéaire croissante, ce qui signifie que lorsque la vitesse angulaire augmente, le flux de chaleur par convection augmente également. Dans ce graphe on a le flux de chaleur qui débute de 88,60 W par rapport à une vitesse angulaire de 0,209 rad/s ce graphe nous résulte une droite linéaire à sa fin qui est de 108,9680 W à une vitesse 0,628 rad/s. La relation entre la vitesse angulaire et semble être linéaire qui suggère une proportionnalité directe. Une vitesse angulaire plus élevée peut induire un mélange plus intense des gaz, ce qui améliore le flux thermique entre les gaz et les briques. Cela peut également créer une meilleure homogénéité de température, réduisant les gradients thermiques et augmentant l'efficacité du flux thermique.

- **Le flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide.**

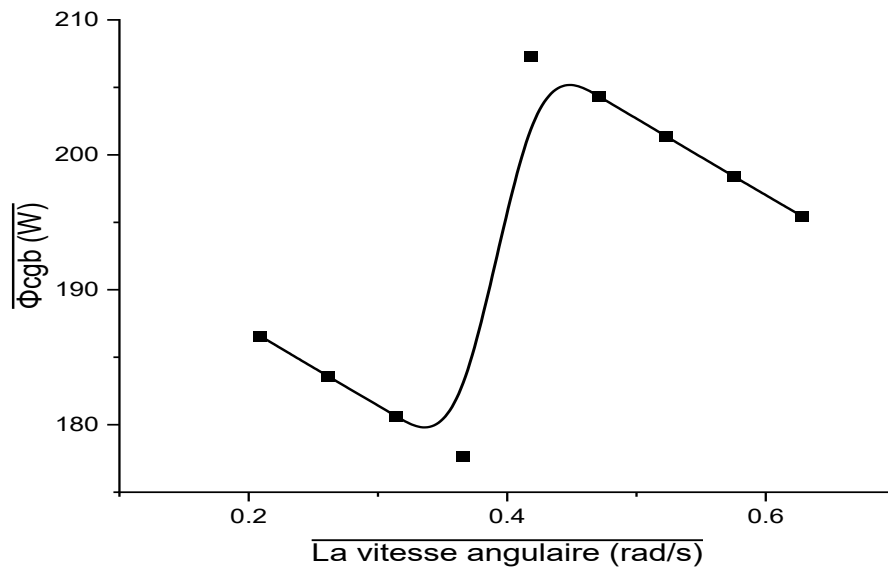


Figure IV. 12 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide par rapport la vitesse angulaire

La figure IV.12 présente l'évolution du flux de chaleur transférée par convection Q_{cgb} entre les gaz et le solide en fonction de la vitesse angulaire (ω). On observe d'abord une légère diminution de Q_{cgb} entre 0,209 et 0,366 rad/s, qui s'explique par une turbulence trop faible ou un contact imparfait entre les phases gaz et solide. Dans cette plage de vitesses, les échanges thermiques restent limités. Ensuite, entre 0,366 et 0,418 rad/s, Q_{cgb} augmente fortement, atteignant un maximum aux alentours de 0,418 rad/s. Cette zone est due à une amélioration des conditions du flux thermique, résultant d'une meilleure homogénéité du mélange gaz-solide, favorisant l'entrée en régime d'écoulement turbulent optimisant la convection. Au-delà de 0,471 rad/s, Q_{cgb} diminue progressivement. Ceci est dû à une réduction du temps de contact entre le gaz et les particules solides ou à une turbulence excessive, qui réduit l'efficacité du flux thermique. Ainsi, cette courbe met en évidence l'existence d'une valeur optimale de la vitesse angulaire pour maximiser le flux de chaleur par convection dans notre modelé analysés.

3.5 Effet du coefficient de transfert thermique hbs

- Le flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les briques et le solide.

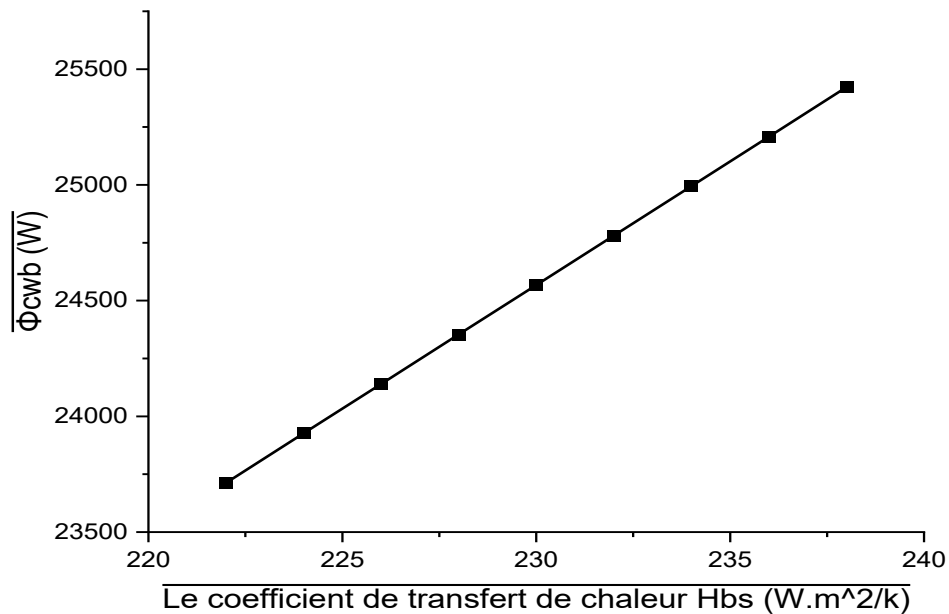


Figure IV. 13 : Variation du flux de chaleur par conduction Q_{cwb} entre les gaz et les briques par rapport le coefficient de transfert de chaleur

La figure IV.13 présente une courbe linéaire croissante, ce qui indique une relation directe et proportionnelle entre le flux de chaleur transférée par conduction et le coefficient de conductivité thermique. La chaleur échangée commence à 23712,79 W pour un coefficient de 222 K, et atteint 25421,83 W lorsque le coefficient passe à 238 K. Cette évolution quasi linéaire traduit une augmentation régulière de la capacité du système à transférer de la chaleur par conduction. La forme linéaire de la courbe s'explique par la loi de Fourier du flux de chaleur par conduction, selon laquelle le flux thermique est directement proportionnel au coefficient de conductivité thermique, à la surface de contact, et au gradient de température. Dans cette analyse, la surface et le gradient de température étant supposés constants, l'augmentation de entraîne mécaniquement une augmentation proportionnelle du flux de chaleur échangée.

En d'autres termes, plus le matériau ou le milieu présente une conductivité thermique élevée, plus il facilite le passage de l'énergie thermique d'une zone chaude vers une zone froide. Cette amélioration peut également être influencée par des effets indirects comme une meilleure homogénéité thermique ou une réduction des résistances internes. Cela suggère que l'optimisation des propriétés thermiques des matériaux ou des conditions de fonctionnement peut contribuer significativement à améliorer l'efficacité thermique du four.

3.6 Effet de la température de la virole

- Le flux de chaleur Q_{lossconv} perdu pour l'environnement.

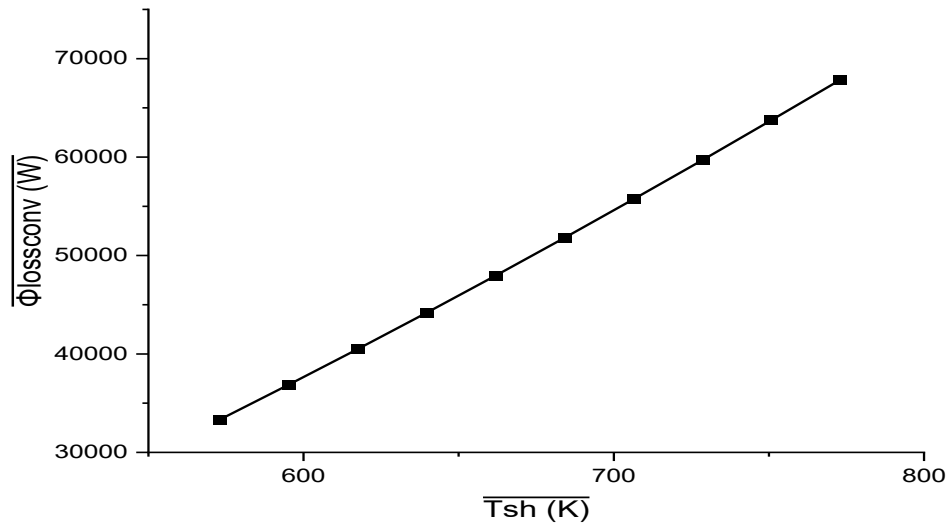


Figure IV. 14 : Variation du flux de chaleur par convection Q_{lossconv} perdu pour l'environnement par rapport la température de la virole

La figure IV.14 montre la relation entre le flux de chaleur Q_{lossconv} perdue pour l'environnement par rapport à la température de la virole. On remarque une augmentation continue et presque linéaire de Q_{lossconv} avec l'élévation de T_{sh} , allant de 600 K jusqu'à 800 K. À basse température environ 573 K, la perte de chaleur est de l'ordre de 33338.1159 W. À haute température environ 773 K, la perte atteint plus de 67849.496 W. La pente du graphe indique une relation proportionnelle entre T_{sh} et Q_{lossconv} . Cette tendance est cohérente avec les lois du flux thermique par convection. En effet, la perte de chaleur vers l'environnement dépend principalement du gradient de température entre la virole et l'air ambiant. Lorsque la température de la virole augmente, la différence de température entre la virole et l'extérieur augmente, ce qui amplifie le flux de chaleur perdu par convection. La loi de Newton sur le refroidissement qui suit l'équation déjà établie (II.43) qui explique cette augmentation de température conduisant à une perte Q plus importante, à surface et coefficient de convection constants. La figure IV.14 illustre clairement que l'élévation de la température de la virole entraîne une augmentation significative des pertes thermiques par convection vers l'environnement. Il est donc crucial, dans une perspective d'optimisation énergétique, de limiter la température de la virole ou d'améliorer son isolation thermique afin de réduire ces pertes.

- **Le flux de chaleur Q_{lossrad} perdu pour l'environnement.**

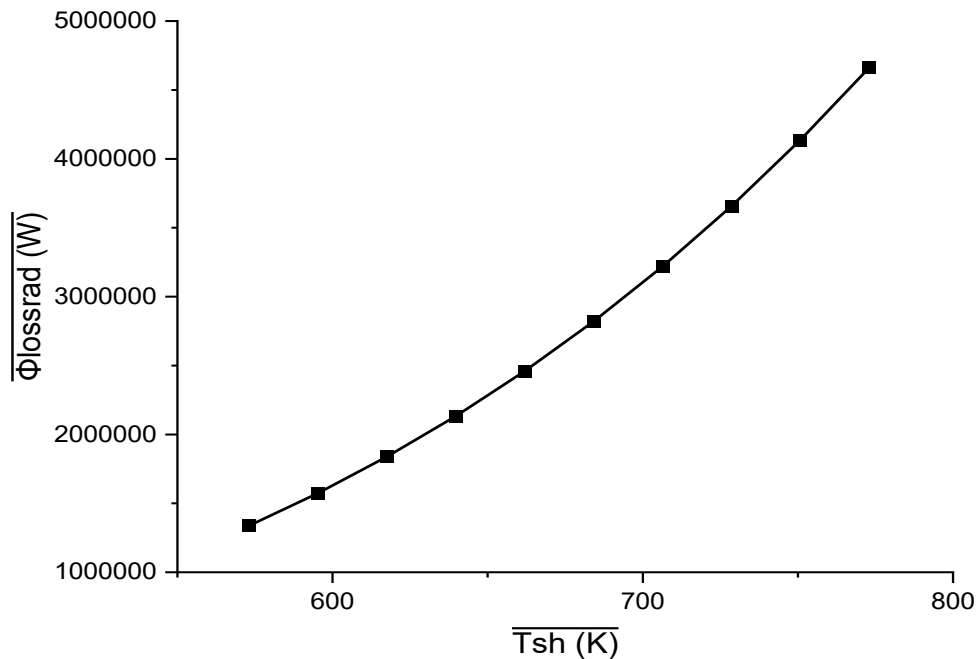


Figure IV. 15 : Variation du flux de chaleur par rayonnement Q_{lossrad} perdu pour l'environnement par rapport la température de la virole

La figure IV.15 illustre la variation de la perte de chaleur par rayonnement Q_{lossrad} en fonction de la température de la virole. La courbe montre une augmentation exponentielle de Q_{lossrad} avec l'élévation de T_{sh} . Dans ce graphe on a le flux de chaleur qui débute de 1336846.938 W par rapport à T_{sh} de 573 K ce graphe nous résulte une ligne parabolique à sa fin qui est de 4661284.697 W par rapport à T_{sh} de 773 K. Cette tendance est en parfaite cohérence avec la loi de Stefan-Boltzmann qui régit les pertes de chaleur par rayonnement suivante l'équation déjà établie (II.45).

L'élévation de T_{sh} entraîne une augmentation très marquée de Q_{lossrad} , en raison de la dépendance à la puissance 4 de la température. Cela explique la courbure ascendante du graphique. Cette figure montre clairement que les pertes de chaleur par rayonnement augmentent de manière exponentielle avec la température de la virole. À des températures élevées, le rayonnement devient le mode de perte dominant, bien plus significatif que la convection. Cela met en évidence l'importance cruciale d'isoler thermiquement la virole et d'éviter des températures excessives.

- Le flux de chaleur Q_{w-sh} entre le croûtage et le virole par rapport à la température de virole T_{sh} au rayon de croûtage r_1 constant et T_{sh} variable

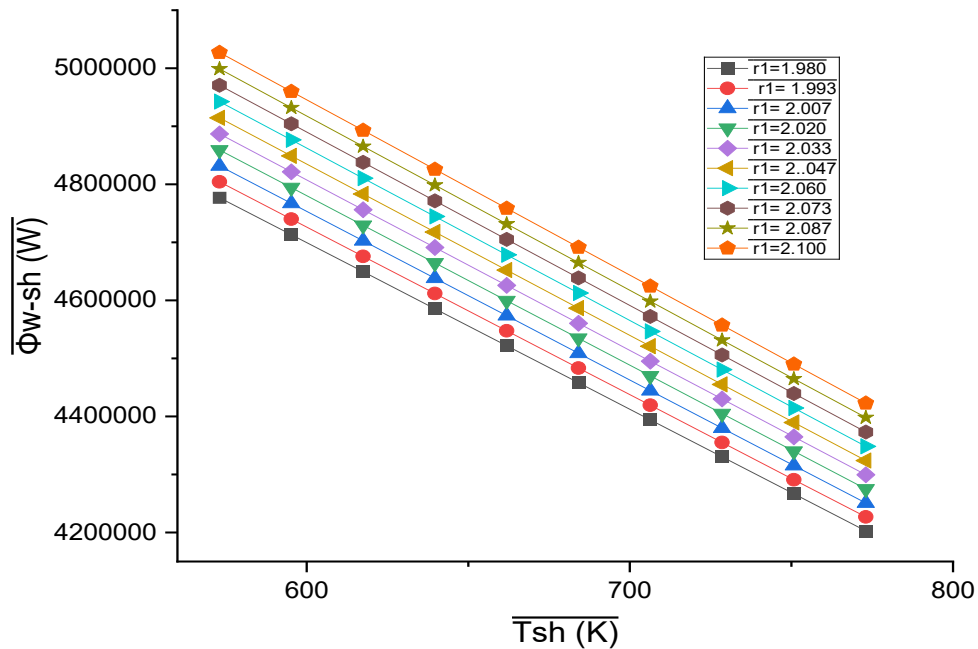


Figure IV. 16 : Variation du flux de chaleur par Q_{w-sh} par rapport la température de la virole au rayon de croûtage r_1 constant

La figure IV.16 montre la relation entre le flux de chaleur Q_{w-sh} par rapport T_{sh} au rayon de croûtage r_1 constant. Les lignes montrent une diminution régulière et linéaire. Pour toutes les valeurs de r_1 , le flux de chaleur diminue lorsque la température de la virole augmente qui a expliqué par une réduction du gradient de température, ou une variation des propriétés thermiques du matériau à haute température (par exemple la conductivité ou l'émissivité thermique). À température constante, plus r_1 est élevé, plus le flux de chaleur transférée est important qui est probablement dû à une augmentation de la surface d'échange thermique, ce qui favorise le flux de chaleur. Les courbes semblent linéaires, indiquant une relation approximativement linéaire entre Q_{w-sh} et T_{sh} , pour chaque valeur de r_1 .

- Le flux de chaleur Q_{w-sh} entre le croûtage et la virole par rapport au rayon de croûtage r_1 à température de virole T_{sh} constant et r_1 variable

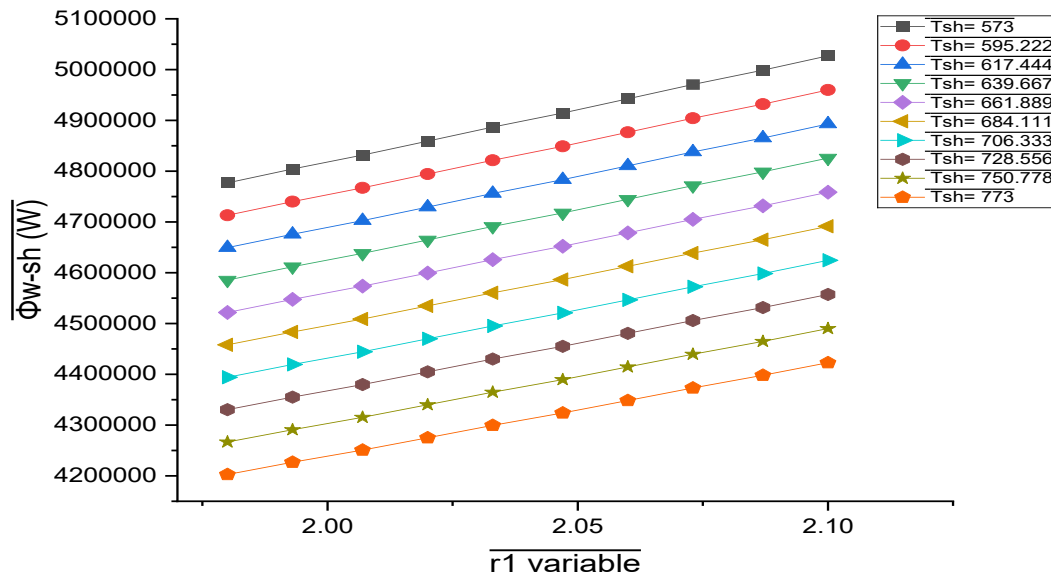


Figure IV. 17 : Variation du flux de chaleur par Q_{w-sh} par rapport r_1 à température de virole T_{sh} constant

La figure IV.17 montre la relation entre le flux de chaleur Q_{w-sh} et T_{sh} à rayon de croûte constant r_1 . Pour toutes les températures constantes, le flux de chaleur augmente avec le rayon de croûte r_1 , car une augmentation de r_1 signifie une plus grande surface de contact ou un meilleur couplage thermique entre la virole et la paroi, ce qui favorise le transfert de chaleur. Les courbes sont parallèles et décalées verticalement, ce qui suggère que plus la température T_{sh} est élevée, plus la valeur de Q_{w-sh} est élevée à un r_1 donné, ce qui indique que la température joue également un rôle amplificateur dans le transfert de chaleur dans cette étude. Cette augmentation est cohérente avec les phénomènes du flux de chaleur par conduction ou par convection, où une augmentation de la surface d'échange améliore le transfert de chaleur pour optimiser ce transfert dans le four rotatif.

4. Comparaison des flux de chaleur dans un four rotatif.

4.1 Le flux de chaleur entre le gaz et les briques à $T_g = 2253\text{K}$

À une température de gaz de 2253 K dans le four rotatif, l'analyse des mécanismes du flux de chaleur entre le gaz et les briques réfractaires montre que le rayonnement constitue le mode de transfert prédominant. En effet, le flux thermique par rayonnement représente environ 2665570 W, soit 99,9996 % de la chaleur totale échangée. En comparaison, le flux par convection est très faible, avec une valeur d'environ 98,82 W, correspondant à seulement 0,0004 %. Quant à la conduction, elle est négligeable dans ces conditions de fonctionnement, avec une valeur calculée de 0 W.

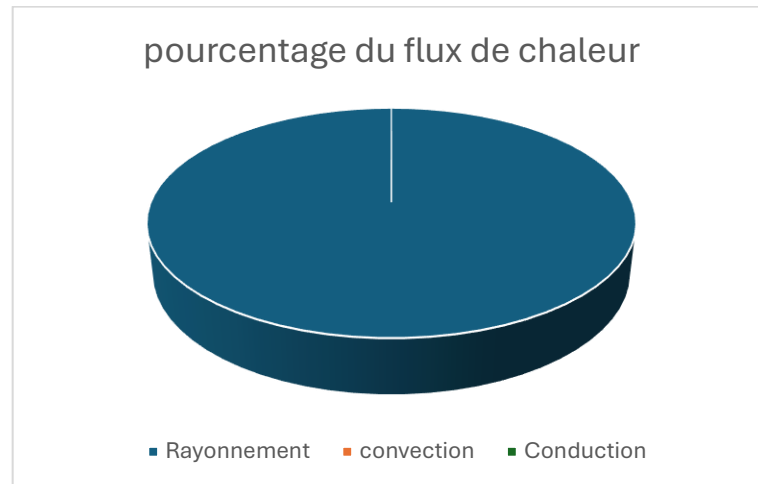


Figure IV. 18 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le gaz et les briques

4.2 Le flux de chaleur entre le gaz et le solide à $T_g = 2293\text{K}$

À une température de gaz de 2293 K, le transfert de chaleur entre le gaz et le solide dans le four rotatif est également dominé par le rayonnement. Cela représente un flux de chaleur transférée d'environ 318 079 W, soit 99,94 % du total. Le flux par convection reste marginal, avec une contribution de seulement 201,37 W, correspondant à 0,06 %, tandis que la conduction est négligeable, avec une valeur de 0 W.

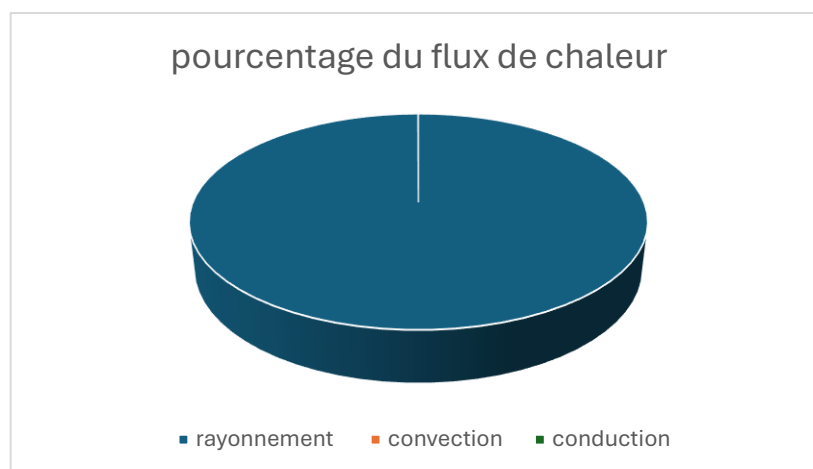


Figure IV. 19 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le gaz et le solide

4.3 Le flux de chaleur entre le solide et les briques à $T_b = 1593K$

À une température de paroi (briques) de 1593 K, le transfert de chaleur entre le solide et les briques dans le four rotatif se fait majoritairement par rayonnement. Celui-ci atteint une valeur de 78417,38 W, correspondant à 76,145 % de la chaleur totale échangée. La conduction intervient également de manière notable, avec une contribution de 24567,31 W, soit 23,855 %. En revanche, aucun flux par convection n'est observé dans cette configuration, avec une valeur de 0 W. Cette répartition met en évidence l'importance relative du rayonnement et de la conduction dans les échanges thermiques entre le solide et les parois réfractaires.

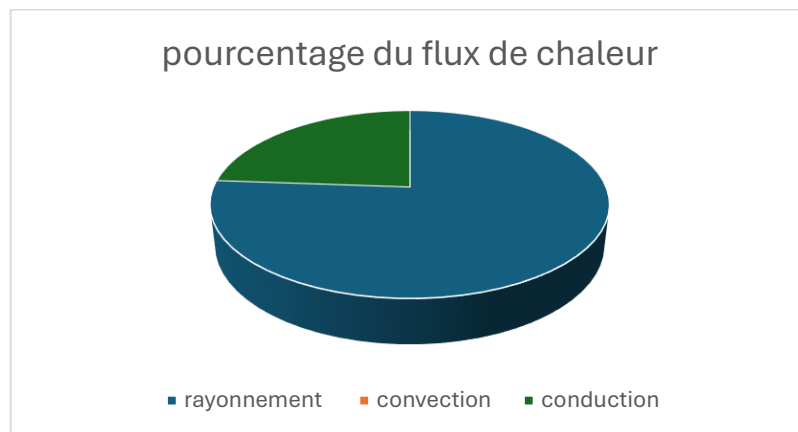


Figure IV. 20 : Comparaison numérique du flux de chaleur entre le solide et les briques

4.4 Le flux de chaleur Q_{loss} perdu pour l'environnement à $T_{\text{sh}} = 684.111K$

À une température de surface externe de 684,11 K, le flux de chaleur perdue vers l'environnement Q_{loss} se fait essentiellement par rayonnement. Celui-ci représente une perte de 2820480,63 W, soit 98,196 % de la chaleur totale dissipée. La convection contribue également, bien que de manière beaucoup plus limitée, avec 51801,76 W, ce qui correspond à 1,804 %. La conduction, quant à elle, est nulle dans ce cas, avec une valeur de 0 W.

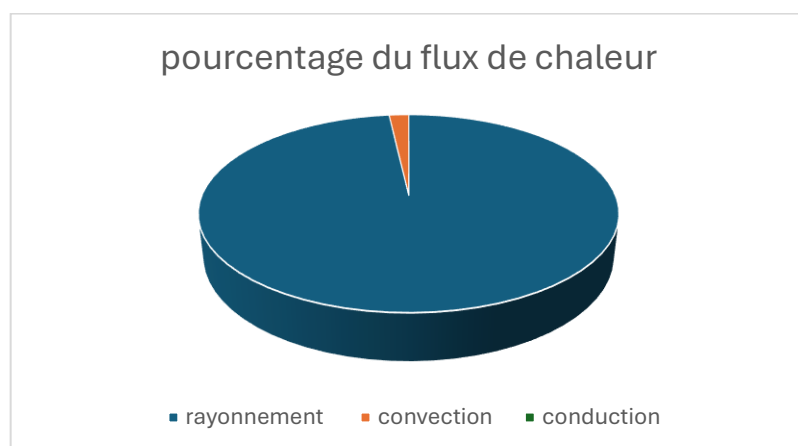


Figure IV. 21 : Comparaison numérique du flux de chaleur perdue vers l'environnement

4.5 Comparaison des flux de chaleur globale dans la virole a $T_g = 2253 \text{ K}$.

D'après l'équation générale pour les flux de chaleur dans la virole qui a déjà établie (II.36), le flux radiatif du gaz vers la paroi, Q_{RGW} est 2 665 570 W qui est largement supérieur au flux convectif Q_{CGW} de 98,82 W, ce qui correspond respectivement à 96,277 % pour le rayonnement et 0,000037 % pour la convection.

Du côté paroi-brique, le rayonnement Q_{RWB} est 78417,38 W qui représente 2.836% du flux, tandis que la conduction Q_{CWB} de 24567,31 W constitue 0.887 %.

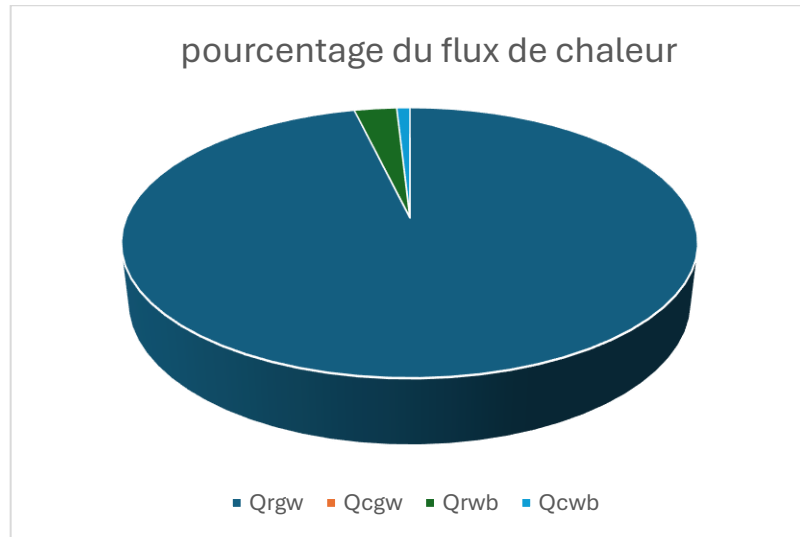


Figure IV. 22 : Comparaison numérique du flux de chaleur globale dans la virole

Mode du flux de chaleur	Domination dans le four rotatif	Caractéristiques principales
Rayonnement	Le plus dominant	Les températures élevées entraînent un important flux de chaleur par rayonnement ; elles sont efficaces sur de longues distances sans contact direct.
Convection	Secondaire	Le flux de chaleur par mouvement de gaz ; moins efficace que le rayonnement dans les zones à haute température.
Conduction	Le moins dominant	Le flux de chaleur par contact direct ; limité par la conductivité thermique des matériaux et la nécessité d'un contact physique.

Tableau IV. 1: Analyse comparative des flux de chaleur dans un four rotatif

5. Conclusion :

L'analyse des graphiques et des diagrammes circulaires fournit des informations essentielles sur le comportement thermique et énergétique d'un four rotatif utilisé dans l'industrie du ciment. Les principales conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- Influence de la température des gaz (T_g)

L'augmentation de la température des gaz entraîne une amélioration significative du transfert de chaleur vers la paroi du four et vers le matériau solide, principalement par convection et rayonnement. Ce résultat souligne le rôle déterminant de la température des gaz dans l'efficacité globale des échanges thermiques. Plus la température des gaz est élevée, plus le potentiel de transfert de chaleur est élevé, ce qui accroît la vitesse et l'efficacité du chauffage du matériau.

- Influence de la température du solide (T_b)

L'élévation de la température du solide favorise également les flux thermiques, notamment par rayonnement. En effet, plus la température du matériau traité est élevée, plus il émet et reçoit d'énergie thermique, ce qui renforce les échanges avec la paroi réfractaire. Ce comportement démontre que les performances thermiques du four dépendent étroitement de la température du matériau traité, ce qui influence directement la qualité et la rapidité du procédé.

- Influence de la vitesse axiale.

L'augmentation de la vitesse axiale des gaz à l'intérieur du four améliore le flux de chaleur par convection en améliorant le contact entre le flux gazeux et les surfaces internes du four. Cette dynamique favorise également les échanges thermiques entre les gaz et la paroi réfractaire. Ces observations révèlent que l'optimisation de la vitesse axiale est un levier efficace pour accroître l'efficacité énergétique du four tout en assurant une meilleure uniformité de chauffe.

- Influence de la vitesse angulaire.

L'augmentation de la vitesse angulaire du four favorise le flux de chaleur, notamment par convection. Une rotation plus rapide améliore la répartition de la chaleur dans le four, assurant un meilleur mélange de la matière solide. Cette homogénéisation thermique permet une utilisation plus efficace de la chaleur disponible, réduisant les zones froides ou surchauffées et contribuant à une meilleure qualité du produit final.

- Influence du coefficient de transfert thermique (h_{bs})

Le coefficient de transfert thermique entre le solide et les briques réfractaires présente une relation linéaire positive avec le flux de chaleur transférée par convection. Autrement dit, une augmentation de ce coefficient accroît significativement les échanges thermiques. Ceci souligne l'importance de maximiser ce paramètre, par exemple en améliorant le contact entre les phases, pour améliorer l'efficacité énergétique du procédé.

- Influence de la température de la virole (T_{sh})

La température de la virole extérieure du four joue un rôle déterminant dans le bilan thermique global. Une température élevée de la virole peut indiquer des pertes de chaleur importantes vers l'environnement, réduisant ainsi l'efficacité énergétique du système. À l'inverse, une virole bien isolée limite les pertes de chaleur, favorisant ainsi une meilleure conservation de l'énergie à l'intérieur du four. Le contrôle de cette température est donc

essentiel non seulement pour améliorer les performances thermiques, mais aussi pour prolonger la durée de vie des matériaux réfractaires et garantir un fonctionnement stable et sûr du four.

- Influence du rayon de croûtage (r_1)

Le rayon de croûtage r_1 , représentant l'épaisseur de la couche de matériau adhérent à la paroi interne du four, joue un rôle crucial dans la dynamique du transfert de chaleur. Une augmentation de r_1 agit comme une barrière thermique, réduisant le flux de chaleur transmise de la paroi chaude vers la coque externe. Cela entraîne une diminution des pertes thermiques à travers la coque, ce qui peut contribuer à une meilleure rétention de la chaleur au sein du four. Toutefois, un croûtage excessif peut également perturber l'écoulement du matériau et compromettre l'efficacité globale du processus. Il est donc essentiel de maintenir un équilibre optimal du rayon de croûtage afin d'assurer à la fois une bonne isolation thermique et un fonctionnement stable du four rotatif.

En conclusion, les graphiques étudiés démontrent que le contrôle des paramètres thermiques tels que les températures, les vitesses (axiales et angulaires) ainsi que les coefficients de transfert thermique est essentiel pour optimiser la performance énergétique d'un four rotatif. Des ajustements judicieux de ces paramètres peuvent conduire à des économies d'énergie substantielles et contribuer à la réduction de l'empreinte carbone de l'installation. Ces résultats constituent une base précieuse pour des améliorations pratiques et théoriques de la conception, du contrôle et de l'exploitation des fours rotatifs industriels.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était de réaliser une étude analytique approfondie du bilan thermique et énergétique d'un four rotatif de cimenterie, dans le but de mieux comprendre les mécanismes de transfert de chaleur et d'identifier les leviers d'optimisation énergétique. En s'appuyant sur une modélisation rigoureuse, appuyée par un modèle analytique développé en langage Fortran, ce travail a permis de représenter de manière fidèle les dynamiques thermiques complexes à l'intérieur du four.

L'analyse détaillée des modes de transfert thermique, qu'il s'agisse du rayonnement ou de la convection, a mis en évidence le rôle clé joué par les paramètres opérationnels, notamment les températures des gaz et du solide, ainsi que les vitesses axiale et angulaire du four. Il en ressort que l'élévation de la température améliore nettement l'efficacité des échanges thermiques, à condition qu'elle soit maîtrisée pour éviter les pertes énergétiques inutiles ou les dégradations des matériaux. L'influence des vitesses de rotation a également été soulignée, montrant qu'un contrôle mécanique précis permet une meilleure homogénéité thermique et une réduction significative des pertes d'énergie.

Le modèle analytique mis en œuvre et validé par les données de la cimenterie de Zahana s'est avéré être un outil fiable et efficace pour anticiper le comportement thermique du four et guider les décisions d'optimisation énergétique, tout en fournissant une base scientifique solide pour les améliorations futures dans le domaine de la production de ciment. Cette mémoire ouvre plusieurs pistes intéressantes pour de futures études prospectives telles que l'intégration de modèles thermomécaniques, l'analyse des régimes transitoires, la récupération d'énergie et de chaleur, utilise autre méthode de calcul tel que les méthodes numériques et expérimentale et aussi comment on peut jouer sur les épaisseurs de les différents parois dans le four pour minimiser les pertes.

En somme, notre étude pose les fondements d'une approche intégrée combinant modélisation analytique pour l'analyse thermique des fours rotatifs de cimenterie. Elle démontre qu'une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et des paramètres influents peut mener à des améliorations substantielles en matière de performance énergétique. En ouvrant la voie à des outils d'analyses plus avancés et à des stratégies d'optimisation plus fines, ce travail contribue activement à la transition vers une industrie cimentière plus efficace et plus durable.

Références bibliographiques

- [1] Adam M. «Guide pratique pour l'emploi des ciments», 8^e éd. Eyrolles, Paris, 1985 (coll. U.T.I.-I.T.B.T.P.).
- [2] Association Française de la connaissance et de l'application des normes, « Actualité technologique et scientifique, Les Ciments » disponible sur : www.Techno-Science.Net.
- [3] K. Djoudi FORMATION «Process de fabrication du ciment. » Société des ciments de ZAHANA. Mascara. C.F.I.C, 2022
- [4] B.M. Salah, « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier M'sila », Université de M'sila, faculté des sciences et des sciences de l'ingénierat, département de geine civil, 2007/2008.
- [5] C. GUTIERREZ «Faisabilité de matrices emplois-expositions aux poussières en cimenterie Participation à une étude épidémiologique rétrospective de mortalité dans les cimentaires», françaises Association Technique de Industrie des Liants Hydraulique 2005/2006.
- [6] BELBACHIR Nasrine «Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse» Université Abdelhamid Ibn Mostaganem, Mémoire Master 2012.
- [7] BOUGUESSA. D. EDDINE «Simulation Numérique des Contrainte Mécanique et Thermique d'une virole de Four Rotatif de Cimenterie », Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Université d'ORAN 2, Mémoire Master juin 2016.
- [8] « Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment » cemento_fr.pdf ; Étude publiée en mai 2008.
- [9] Omar El-Rouby «Les fours rotatifs un potentiel d'efficacité énergétique considérable pour la décarbonation des sites industriels » Conseiller principal expertise énergétique Groupe DATECH, 27 Mai 2024.
- [10] M. H. SABAH «Mise en place de la maintenance Conditionnelle et amélioration du four rotatif de rotatif de HOLCIM Ras El Ma, -B. P2202» Route de l'mouzzar -FES : Faculté des sciences et Techniques,25/06/2015
- [11] Hasan Basri, Irsyadi Yania, «fatigue analysis of rotary cement kiln welded using finite element method», / Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) xx:x (201x) xxx–xxx
- [12] Prasad Ingawale and Kiran Narkar. «Contact Stress Analysis of Kiln Tyre and Thrust Roller by Using Normal Loading». PhD thesis, 2015.
- [13] H. Helen, J. K. Brimacombe, A.P Watkinson «Experimental study of transverse bed motion in rotary kiln Metallurgical Transaction», Volume I4B, June 1983, DOI:[10.1007/BF02661016](https://doi.org/10.1007/BF02661016)
- [14] S.V. RADOVANOVIC «The reactions between zirconia from MgO-ZrO₂ refractories and the compounds of Portland cement clinker » Proceedings of UNITECR '95, Nov 19-22-1995, Kyoto, Japan, Vol.1,224-232.
- [15] Phillips kiln services blog; «Calculating cold gap using temperatures differences», 01.12.2012
- [16] Bernard Gilbert, Alain Regnault «Fours de cimenterie FOUR ROTATIF» BE8845 Editions techniques de l'ingénieur.

- [17] I. Winarko, <<Ring & Snow Ball formation in the kiln>> ,03.12.2016, <https://www.cementequipment.org/home/snow-ball-formation-in-cement-rotary-kiln-infograph/>.
- [18] S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss, M. Schiemann, S. Schaefer. Scherer <<Impact of Coating layers in rotary cement kiln. Numerical investigation with a blocked off region approach for radiation and momentum >> Thermal Science & Engineering Progress 15(2020)
- [19] Ricardo Araujo Mosci <<Refractories in cement manufacturing>> 2015 <http://www.cementequipment.org/home/complete-courses/chapter-3-7-refractories-cement>
- [20] S. Haddaoui <<Mise en place de la maintenance Conditionnelle et améliorative>> Université Ibn Khaldoun, Mémoire masters.
- [21] Engin et Ari <<Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems >> Energy Conversion and Management 46 (2005) 551–562 DOI: [10.1016/j.enconman.2004.04.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.007)
- [22] Mojtaba Mirhosseini, A. Rezaniakolaei & L. Rosendahl, <<Numerical Study on Heat Transfer to an Arc Absorber Designed for a Waste Heat Recovery System around a Cement Kiln>> Energies, MDPI, vol. 11(3), pages 1–16, March 2018, <https://doi.org/10.3390/en11030671>.
- [23] H. Sahin, <<Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler>> April 2016·Energy Conversion and Management·114:110–121, DOI: [10.1016/j.enconman.2016.02.017](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.017)
- [24] Qian Yin et al, <<Optimization design of heat recovery systems on rotary kilns using genetic algorithms>> Applied Energy ·202:153–168, September 2017· DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.05.072](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.072)
- [25] Swastik Acharya et Sukanta K. Dash <<Natural Convection Heat Transfer from a Short or Long, Solid or Hollow Horizontal Cylinder Suspended in Air or Placed on Ground>>, Journal of Heat Transfer·139(7) February 2017. DOI: [10.1115/1.4035919](https://doi.org/10.1115/1.4035919)
- [26] Gajendra Kumar Gaurav, <<Analysis of temperature profile and % metallization in rotary kiln of sponge iron process through CFD>> March 2016·Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers·63, DOI: [10.1016/j.jtice.2016.02.035](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.02.035)
- [27] Maozohao Xie, <<Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln>>, Powder Technology ·287:239–247, January 2016 · DOI: [10.1016/j.powtec.2015.10.007](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.007)
- [28] Gongfali et al, <<Numerical simulation of the influence factors for rotary kiln in temperature field and stress field and the structure optimization>> Advances in Mechanical Engineering·7(6), June 2015, DOI: [10.1177/1687814015589667](https://doi.org/10.1177/1687814015589667)
- [29] Sak et al, <<The role of turbulence length scale and turbulence intensity on forced convection from a heated horizontal circular cylinder>> Exp. Therm. Fluid Sci, 2007.
- [30] Sanitjai, <<Forced convection heat transfer from a circular cylinder in cross flow to

- air and liquids», October 2004 ·International Journal of Heat and Mass Transfer·47(22):4795-4805, DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.012](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.012)
- [31] Nakamura et Igarashi, «variation of Nusselt number with flow regimes behind a circular cylinder for Reynolds numbers from 70 to 30,000», International Journal of Heat and Mass Transfer, November 2004, DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.034](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.034)
- [32] Scholten, J. W., Murray, D. B., «Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow. low free stream turbulence» International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.41, Issue 10, 1139-1148, doi:[10.1016/S0017-9310\(97\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00250-0).
- [33] M. M Zdravkovich et Williamson, « Flow Around Circular Cylinders: A Comprehensive Guide Through Flow Phenomena, Experiments, Applications, Mathematical Models, and Computer Simulations » Oxford University Press: New York, NY, USA, 2003. DOI: [10.1093/oso/9780198565611.001.0001](https://doi.org/10.1093/oso/9780198565611.001.0001).
- [34] Zhukauskas, «Heat Transfer of a Cylinder in Cross Flow», 1st ed.; Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, USA, 1985, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985wdch.book.Z/abstract>.
- [35] Sarma et Sukhatme, «Local heat transfer from a horizontal cylinder to air in cross flow: Influence of free convection and free stream turbulence». Int. J. Heat Mass Transfer, 1977.
- [36] Jain et Goel, «A numerical study of unsteady laminar forced convection from a circular cylinder» , 1976 Journal Article [10.1115/1.3450537](https://doi.org/10.1115/1.3450537).
- [37] Schmidt et Wenner, «Heat Transfer Over the Circumference of a Heated Cylinder in Transverse Flow»; NACA TM1050; University of North Texas: Denton. Document ID [20000043165](https://naca.central.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/10.1018/1.3292222), 1941.
- [38] Mohamed A. Aldeib et all «Energy Analysis Using MATLAB Graphical User Interface of Cement Rotary Kiln for Alburge Cement Plant», Journal of Alasmarya University: Basic and Applied Sciences Vol. 6, No. 5, December 2021, DOI: [10.59743/aujas.v6i5.1514](https://doi.org/10.59743/aujas.v6i5.1514).
- [39] Shihab Ali Khalifa et all «Heat Balance Analysis in Cement Rotary Kiln» May 2019·Advances in Applied Sciences·4(2):34, DOI: [10.11648/j.aas.20190402.11](https://doi.org/10.11648/j.aas.20190402.11).
- [40] A. Atmaca et Yumrotas, «Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry», 2014. journal homepage: www.elsevier.com/locate/apthermeng
- [41] F. Kreith, W. Black, «basic heat transfer», Harper & Row, New York, USA, (1980).
- [42] S. Tscheng et A. Watkinson, « Convective heat transfer in a rotary kiln » (1979). Canadian journal of Chemical Engineering, vol. 57, n° 4, p. 433-443, <https://doi.org/10.1002/cjce.5450570405>.
- [43] J. Lyons, H. Min, P. Parisotet, J. Paul, « Experimentation with a wet-process rotary cement kiln via the analog computer », Industrial & Engineering Chemistry Process design and development, vol.1, n°1, p.29-33.(1962). <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/i260001a005>.

- [44] A. Sass, « Simulation of heat transfer phenomena in a rotary kiln » Industrial & Engineering Chemistry Process Design and development, vol.6, n°4, p.532-535. (1967).
- [45] G. Ketslakh et I. Tsibin, « Heat transfer by radiation in rotary kilns » Refractories, vol. 19, n°1-2, p 17-19, ISSN 00343102. (1978)
- [46] H. Hottel et A. Sarofin, « Radiative transfer », McGraw-Hill, New York, USA Journal, Volume 15, Issue 5, pp. 794-796, 3 pp. (1967) DOI:[10.1002/aic.690150504](https://doi.org/10.1002/aic.690150504).
- [47] K.S. Mujumdar , V.V. Ranade, «Simulation of Rotary Cement Kilns Using a One-Dimensional Model », [Chemical Engineering Research and Design](https://doi.org/10.1205/cherd.04193) Volume 84, Issue 3, March 2006, Pages 165-177, <https://doi.org/10.1205/cherd.04193>
- [48] Thunman et H. Leckner «Thermal conductivity of woods Models for different stages of combustion. » July 2002 Biomass and Bioenergy 23(1):47-54 DOI: [10.1016/S0961-9534\(02\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00031-4)
- [49] 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)
- [50] 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 doi.org/[10.1080/17436753.2017.1303261](https://doi.org/10.1080/17436753.2017.1303261)
- [51] K.S. Mujumdar, V.V. Ranade, «Modeling of Rotary Cement Kilns: Applications to Reduction in Energy Consumption», Industrial Flow Modeling Group, National Chemical Laboratory, Pune 411008, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, No. 7, 2006.
- [52] BOUTALEB Habib, « Initiation au Langage de Programmation Fortran 90 », Université « Dr. Tahar moulay « De Saida, Notes de Cours 2018/2019.
- [53] Dragos B. Chirila, Gerrit Lohmann, «Introduction to Modern Fortran for the Earth System Sciences », 2015 <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/i260001a005>
- [54] J. Perron, « Modélisation mathématique d'un four de calcination du coke de pétrole », thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, Canada (1986).
- [55] Viola, A., R. Baratti et A. Teodosi. 1986, «Analysis and simulation of the alumina calcination process in a rotary kiln», Light Metals 1986., vol. 2, p. 179–189.