



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 و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département De Maintenance En Electromécanique MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : électromécanique
Spécialité : électromécanique industrielle

Thème

Comportement thermique du refroidissement de la virole d'un four rotatif par jet d'air

Présenté et soutenu publiquement par :

Dgahiche soufiane & Benazzouz Mohammed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Yahiaoui Reda	MCA	UNIV ORAN 2	Président
Bouhafis Mohammed	MCA	UNIV ORAN 2	Encadreur
Abed MEGHDIR	MCA	UNIV ORAN 2	Examineur

Année 2023/2024

REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier tout d'abord **Allah** pour le peu de savoir que nous avons acquis.*

*A travers ce modeste travail nous adressons nos très sincères remerciements à monsieur « **bouhafs mohammed** » pour son encadrement, nous avons eu le privilège de travailler avec vous et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir qui nous a énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de nos respectueuses considérations et notre profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent aux membres du jury Mme « **Yahiaoui Reda** » présidente de jury, et Ms « **MEGHDIR Abed** » qui ont honorés d'accepter avec une grande sympathie et une très grande amabilité d'être parmi le jury.*

*Nous tenons également à remercier Mme « **Ben Ali kouchih Fatima** » et Mme « **Seddik bouchouicha malika** » pour son aide et son soutien.*

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont apporté des connaissances de base en recherche au cours de ces cinq années.

Enfin, nous remercions infiniment nos parents, nos amis et toutes personnes ayant soutenue de près ou de loin ce travail. Veuillez accepter mes plus respectueuses salutations.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en guise de témoignage d'amour et de gratitude à mes parents, grâce à leur organisation, leur travail acharné, leur encouragement et leurs grands sacrifices. Ils ont réussi à créer un environnement propice à la poursuite de nos études. Que Dieu les bénisse, les protège et les accorde Sa miséricorde, tout comme ils nous ont élevés lorsque nous étions jeunes. J'espère être toujours une fierté et une source de réconfort pour eux.

À mes chers frères et sœurs, oncles et tantes, oncles et tantes maternels, et toute ma précieuse famille qui a toujours été un soutien pour moi.

À mes amis proches et collègues qui ont été mes compagnons et mes confidents tout au long du parcours.

À tous nos enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à aujourd'hui, ils ont joué un rôle majeur dans notre réussite en nous aidant à atteindre nos objectifs.

Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui nous connaissent et qui ont eu un impact sur nous. Nous demandons à Dieu de les récompenser pour nous avec la meilleure récompense. Et si nous les oublions, Dieu ne les oublie pas.

DEDICACES

A mes chères parents, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

Mes chères sœurs et mon frère qui n'ont pas cessé d'être pour moi un exemple de persévérance, de courage et de générosité.

A mes amies vous étiez ma force et mon énergie merci d'être présente toujours pour m'écouter et pour me soutenir.

Résumé

Cette étude a pour objet la modélisation numérique du refroidissement de la virole d'un four rotatif dans ANSYS CFX. La géométrie de modèle existe en réel dans l'usine, la Géométrie et les conditions aux limites ainsi que les conditions d'exploitations ont servi pour valider les calculs numériques. Les résultats de la simulation numérique sont en bonne concordance avec ceux mesurés dans l'usine. Pour améliorer le refroidissement de la virole et alors on à proposer une solution. En effet l'ajout des injecteurs d'air à la virole a permis une diminution considérable de la température.

Abstract

This study aims to model and numerically simulate the cooling of a rotary kiln shell using ANSYS Fluent. The model is based on a real installation in a factory, and the geometry, boundary conditions, and operating conditions were used to validate the numerical calculations. The results of the numerical simulation show good agreement with the measurements taken at the factory. To enhance the cooling of the kiln shell, a solution was proposed: the addition of air injectors. This modification resulted in a significant reduction in temperature

تلخيص

يعتمد النموذج على تركيب حقيقي في مصنع، وقد تم استخدام الهندسة والحدود ANSYS Fluent برنامج التشغيلية وظروف التشغيل للتحقق من صحة الحسابات العددية. أظهرت نتائج المحاكاة العددية توافقاً جيداً مع القياسات المأخوذة في المصنع. لتحسين تبريد الغلاف، تم اقتراح حل يتمثل في إضافة حقنات هوائية. أسفر هذا التعديل عن انخفاض كبير في درجة الحرارة

Sommaire

I: Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie :	16
II.1: Cimenterie :	16
II.2 : Types de ciments :	16
II.3: Principe et étapes de fabrication:	17
II.3.2: Préparation de la matière première:	19
II.3.3: le Cuisson :	20
II.3.4: Broyage ciment :	20
II.3.5: Stockage et expédition :	21
III : Fours rotatifs de ciment:	22
III.1 : Définition de fours rotatifs :	22
III.2 : Fonctionnement de fours rotatifs :	22
III.3 : Les composants du four rotatif :	23
III.3.2: Les éléments intérieurs principaux du four rotatif :	25
IV. Conclusion :	28
I : Partie Bibliographie :	30
II : Transfert de chaleur dans le four :	36
II-1 : Transfert de chaleur :	36
II 1.1 : conduction :	37
II .1.1 : La convection :	38
II .1.2 Le rayonnement :	39
II .2 :Modèles mathématiques :	39
II .2.1. Transfert de chaleur entre le gaz et les briques réfractaires (paroi interne) :	40
II .2.2. Transfert de chaleur entre le gaz et le solide (lit de matière) :	41
II .2.3. Transfert de chaleur entre la paroi et le solide :	42
III. Conclusion :	43
Chapitre III : Méthode Numérique	44
I . Introduction :	45
II.1. Méthode des différences finies :	45
II.2. Méthode des éléments finis :	45
II.3. La méthode des volumes finis:	46
II.3.1. Principe de la méthode des volumes finis :	47

II.3.2. Etapes de résolution avec la méthode des volumes finis	48
II.3.3 : Équations gouvernantes :	48
Conservation de quantité de mouvement :	49
Équation de conservation d'énergie :	49
III.1. Description du problème :	49
III.2 : Présentations du logiciel ANSYS :	51
III.2 .1. Présentation du WORK-BENCH :	51
III.2.2. Présentation de l'ANSYS Fluent CFX :	52
III.3. Modélisation dans ANSYS :	53
III.3.2. Maillage :	54
III.3.3. Optimisation du maillage :	55
III.3.4. Conditions aux limites :	56
VI. Conclusion :	56
I. Introduction :	58
II. Résultats et discussion :	58
III. Etude de cas :	59
III.1. Contour de température (section du four) :	60
III.2. Contour des lignes de vitesse :	61
III.3. Contour de pression :	62
III.4. Variation de la vitesse d'injection d'air :	63
III.5. Variation de température intérieure du four :	65
III.6. Variation de vitesse de rotation du four :	67
IV. Conclusion :	69
Conclusion générale :	71
References:	73

Liste des figures

figure (1): le processus global de la fabrication du ciment.....	18
figure (2) : extraction de matière première.	18
figure (3): atelier concassage.	19
figure (4) :Préhomogénéisation du calcaire et du sable.	19
figure (5) : Broyeur à boulets de l’atelier broyage cru.	20
figure (6): Atelier de cuisson de la clinker.	20
figure (7): silo de stockage ciment.	21
figure (8): Expédition en vrac et en sac.	21
figure (9) : Le four rotatif.	22
figure (10) : Coupe transversale d’un four rotatif.	23
figure (11) : la virole de four rotatif.	24
figure (12) : Le bandage de four rotatif.	24
figure (13): un galet de four rotatif.	25
figure (14): Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.	26
figure (15) : brûleur de four rotatif.	27
figure (16) : croutage de four rotatif.	27
figure (17): Section longitudinale du four rotatif.	28
figure (18) : Répartition de la température dans les réfractaires préemballés et mesures avec isolation thermique (données expérimentales).	30
figure (19): Impact des couches de revêtement dans les fours à ciment rotatifs.	30
figure (20) : Temperature contour at 1 hour (a), temperature contour at 2 hours (b) and temperature contour at 3 hours (c).	31
figure (21): système de récupération de chaleur.	32
figure (22) : Profil de la composition chimique du clinker le long du four.	35
figure (23): Énergie thermique dissipée du four par rayonnement.	35
figure (24) : Principaux échanges de chaleur du système.	37
figure (25) : Effet de la conductivité et le temps sur le gradient de la température pour deux solides de températures et conductivité différentes.	38
figure (26): Transfert de chaleur dans la section transversale du four.	39
figure (27) : Volume de contrôle typique bidimensionnel.	47
figure (28) : Volume de contrôle décalé pour u et v dans un maillage entrelacé.	48
figure (29) : four rotatif de l’usine BENI SAF	50
figure (30): profile de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d’usine (BENI SAF).	51
figure (31) : L’interface d’Ansys Workbench.	52
figure (32): L’interface d’Ansys Fluent CFX.	53
figure (33) : géométrie du four rotatif.	54
figure (34): maillage quadratique.	54
figure (35): Comparaison des différents maillages.	55
figure (36) : la validation des températures de la virole de notre étude par rapport celle du l’usine.	59
figure (37) : Configuration de four rotatif dans CFX-Pre.	59
figure (38) : les contours des températures dans la section du four rotatif.	61
figure (39) : Contour des lignes de vitesse de four rotatif.	62
figure (40) : Contour de pression de four rotatif.	63

figure (41) : Evolution de la température extérieure de la virole en fonction de la vitesse d'air injecté.	64
figure (42) : Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de la vitesse d'air injecté.	65
figure (43): Température extérieur de la virole en fonction de température intérieur du four.	66
figure (44): Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de température intérieur du four.	66
figure (45) : Température extérieur de la virole en fonction de vitesse de rotation du four.	68
figure (46): Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de vitesse de rotation du four.	69

Liste des tableaux

Tableau(1) : Les dimensions du four rotatif d'usine BENI SAF.....	50
Tableau(2) : Paramètre de maillage.....	55
Tableau(3) : Les conditions aux limites de la partie cuisson du four.	56
Tableau(4) : Température extérieure de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air.	64
Tableau(5): Température extérieur de la virole en fonction de Température intérieur du four.....	65
Tableau(6): Température extérieure de virole en fonction de la vitesse de rotation du four.....	67

Nomenclature

T	Température	K
Q	quantité de chaleur	J
H	Enthalpie	J
A	Surface	m ²
L	longueur	m
V	Vitesse	m.s-1
K	Conductivité thermique	W.Km-1
C _p	Capacité thermique massique	J.kg ⁻¹ .k-1
F	Kg Fe ₂ O ₃ /Kg CaO	-
S	Kg SiO ₂ /Kg CaO	-
H	coefficient de convection	W.m-2. k-1
R	rayon	m
R1	rayon intérieur du four 1.975	m
R2	rayon extérieur du four 2.175	m
D	diamètre	m
P	pression	Pa
P	angle sous-tendus par la surface du solide $3\pi/2$	-
p	périmètre	m
T	temps	s
R	constante des gaz parfaits 8.314	J.mol-1.K-1
C	Calcium oxide CaO	-
h _o	fraction of radiation 0.0757	-
α	Diffusivité thermique	m ² .s-1
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
f	Coefficient de conduction	W.m ² .K-1

Symboles grecs

Φ	Flux de chaleur	W
β	Coefficient de transfert de chaleur	W.K ⁻¹
τ	Constante de temps	
θ	Température adimensionnelle	-
φ	Densité de flux thermique	W.m ⁻²
ρ	Masse volumique	Kg.m ³

Indices

p	Parois
G	gaz
f	fluide
s	solide
W	mur

sh	virole
cv	convective comb Combustion
c	réaction chimique
c	centre
ch	croûtage
a	air
a	aillette
i	initiale
r	radiative
b	rupture

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds
Gr	Grashof
Pr	nombre de Prandtl

Opérateur mathématique

∂	Dérivée partielle
Δ	variation

Introduction générale

Le ciment Portland est le matériau de construction le plus utilisé, dont la consommation à l'échelle mondiale est estimée aux environs de 200 kg de ciment par personne par an. Le défi de l'industrie de ciment consiste à produire un ciment performant, à coût compétitif et avec un impact environnemental minimal. La production d'une tonne de ciment nécessite 1.65 tonnes de matières premières. L'industrie du ciment, en Algérie, a connu, ces dernières années, une amélioration progressive vue le nombre de ligne de production de ciment qui a augmenté.

Le four rotatif est un équipement principal dans une industrie cimentière employée pour convertir le cru en clinker calciné. La farine crue pour la production de ciments est un mélange des proportions prédéterminées de pierre à chaux, de silice, et de petites quantités d'oxyde d'alumine et de fer. Le four rotatif se compose d'un tube produit à partir de la plaque en acier, souvent 5 mètres de diamètre et plus de 100 mètres de longueur, garnie de la brique réfractaire. Le tube est légèrement incliné ($1 - 4^\circ$) et tourne lentement sur son axe à environ 30 à 250 révolutions par heure.

Dans le présent travail, nous étudions le refroidissement de la virole d'un four rotatif et le mécanisme de transfert de chaleur dans un four en considérant les phénomènes de transfert rencontrés à l'intérieur et à l'extérieur de la virole à savoir la conduction et la convection. Les calculs par simulation, deviennent un outil indispensable à l'étude des phénomènes physiques complexes. La présente étude a été réalisée avec le solveur ANSYS (FLUENT)-CFX validée avec des mesures réelles au niveau de l'usine (BENI SAF, groupe industriel des ciments d'Algérie-Gica-) pendant le stage pratique.

L'objectif est de contribuer à l'étude de l'amélioration du refroidissement de la partie cuisson de la virole du four par une simulation numérique d'un four rotatif par la méthode des volumes finis, l'utilisation des capacités de simulation qui offrent dans le logiciel FLUENT(ANSYS) représente une partie non négligeable du présent travail. La construction de modèle géométrique est générée par le logiciel ICEM CFX. Des solutions ont été donc proposées pour cette usine.

Pour bien comprendre ce modeste travail, nous avons eu l'occasion de faire un stage pratique dans l'usine BENI SAF, groupe industriel des ciments d'Algérie-Gica-, et suivis les diverses étapes de fabrication du ciment gris et blanc pour avoir une idée globale sur le processus de système de production du ciment et les étapes de fabrication de ce dernier. Nous avons pu examiner attentivement les divers appareils et machines qui jouent un rôle fondamental dans l'industrie du ciment. On parle des fours rotatifs qui sont très utilisés dans l'industrie. Ils sont utilisés dans la cuisson du clinker dans la cimenterie, fabrication de la chaux, fabrication des charbons.

L'étude envisagée dans le présent mémoire est structurée en 4 chapitres :

-Dans le 1er chapitre nous avons décrit les étapes de la fabrication de ciment puis on a présenté le four rotatif de cimenterie avec l'ensemble des organes qui le constitue ainsi que, le rôle et la spécificité.

-le 2em chapitre concerne l'étude des différents échanges de chaleur entre la virole et l'environnement telle que la convection et le rayonnement.

-le 3em chapitre englobe les méthodes numériques, présentation de logiciel ANSYS et la réalisation de la géométrie et des modèles numériques par FLUENT ANSYS.

Enfin, dans le dernier chapitre, les résultats de différentes simulations réalisées sur notre four sont représentés pour différentes vitesse d'air d'injection, l'étude d'évolution de température de la virole, ainsi que, l'étude de l'effet du refroidissement par le jet d'air sur l'évacuation de flux de chaleur.

**Chapitre I : Généralité
sur le ciment et les fours
rotatifs**

I: Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie :

Les fours rotatifs se retrouvent dans beaucoup de processus qui comportent le traitement de solides. Ceux-ci incluent le séchage, l'incinération, le mélange, le chauffage, le refroidissement, l'humidification, la calcination, la réduction, l'agglomération et la réaction gaz-solide. Une des plus importantes utilisations industrielles est la production du ciment. Les fours à ciment peuvent être très grands.

Les fours rotatifs sont des unités bien établies dans l'industrie des procédés, mais ils restent parmi les moins compris. Ils sont utilisés pour le chauffage, la réaction et le séchage des matériaux solides, souvent combinés. Quatre aspects clés de leur conception sont le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides, le transfert de masse gaz-solide et les réactions. Le transfert thermique est souvent le plus crucial, limitant la performance du four, comme en témoigne le nombre de recherches sur les modèles de transfert thermique. Cependant, le premier aspect à avoir été modélisé était le mouvement des matériaux à travers le four.

Au cœur du processus de cuisson, le four rotatif est soumis à des conditions thermiques extrêmes, accueillant toutes les réactions, qu'elles soient exothermiques ou endothermiques, ainsi que des échanges thermiques massifs, avec d'importantes entrées et pertes d'énergie. Comprendre ces phénomènes permet de mieux contrôler le four. Le four rotatif est essentiellement un cylindre en acier, généralement animé d'une vitesse de rotation variable entre 4 tr/mn et 6 tr/mn. Ce cylindre, également appelé virole, est construit en chaudronnerie et soutenu par bandages reposant sur des galets. À l'intérieur, il est revêtu de briques réfractaires et incliné à environ 3% dans le sens de l'écoulement des matériaux. Cette inclinaison combinée à la rotation permet aux matériaux de progresser vers le brûleur par gravité. [5]

II.1: Cimenterie :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450 °C) d'un mélange minéral (calcaire + agrile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement (plus au moins rapidement, d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec liants aériens « à base de chaux grosse et maigre » qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air. [1]

II.2 : Types de ciments :

La nouvelle normalisation des ciments Portland distingue deux catégories principales avec des noms légèrement différents. Pour les ciments Portland composés, il existe plusieurs sous-catégories. Le ciment Portland Type I, aussi appelé "CPA-CEM I", contient au moins 95% de clinker, tandis que le ciment Portland composé Type II, désigné par "CPJ-CEM II/A" ou "CPJ-CEM II/B", comprend du clinker et d'autres composants en proportions spécifiques, variant selon les sous-catégories. Jusqu'à la fin de 1994, les ciments de haut-fourneau

(CHF) contenaient 25 à 60% de clinker et 40 à 70% de laitier, avec éventuellement un filler jusqu'à 3% de l'ensemble des constituants. Cependant, les nouveaux ciments de haut-fourneau, regroupés sous les ciments de Haut-Fourneau Type III en trois catégories, couvrent une plage plus large, incluant les ciments de laitiers au clinker (CLK). La nouvelle normalisation des ciments Type IV introduit deux catégories de ciments pouzzolaniques, regroupés sous le nom général "CPZ-CEM IV". Ces catégories se distinguent par les proportions de clinker et d'autres constituants à propriété pouzzolanique, tels que les pouzzolanes (Z), les cendres volantes siliceuses (C), ou les fumées de silice (D), pouvant représenter jusqu'à 10% du mélange. La première catégorie, "CPZ-CEM IV/A", contient entre 65 et 90% de clinker et entre 10 et 35% d'un des constituants mentionnés, avec une possibilité d'ajouter jusqu'à 5% d'un constituant secondaire. La deuxième catégorie, "CPZ-CEM IV/B", comprend entre 45 et 64% de clinker et entre 36 et 55% d'un des autres constituants pouzzolaniques, avec la même possibilité d'ajout d'un constituant secondaire jusqu'à 5%. Avant la fin de 1994, les ciments de laitier et aux cendres (CLC) étaient composés de 60% de clinker, 20 à 45% de cendres volantes, et 20 à 45% de laitier, avec éventuellement un filler jusqu'à 3%. La nouvelle normalisation distingue deux catégories de ciment au laitier et aux cendres, sous le nom général "CLC-CEM V". On trouve les ciments "CLC-CEM V/A" avec 40 à 64% de clinker, 18 à 30% de laitier, et 18 à 30% de pouzzolane ou de cendres siliceuses, tandis que les ciments "CLC-CEM V/B" contiennent 20 à 39% de clinker, 31 à 50% de laitier, et 31 à 50% de pouzzolane ou de cendres siliceuses. Parmi les variantes secondaires des ciments couramment utilisées dans l'industrie de la construction, on trouve les ciments à prise en milieu marin (PM), adaptés aux environnements maritimes. De plus, les ciments à faible chaleur d'hydratation initiale, avec une teneur en sulfures limitée, offrent une solution lorsque la génération de chaleur doit être minimisée. Les ciments prompts (CNP) se distinguent par leur capacité à durcir rapidement, souvent privilégiés pour des applications nécessitant une mise en œuvre rapide. Le ciment alumineux fondu est une option spécialisée, riche en alumine, utilisée pour ses propriétés résistantes à la chaleur et à la corrosion. Les ciments blancs, appréciés pour leur teinte claire, sont souvent choisis pour des raisons esthétiques. Enfin, le ciment pour béton précontraint est conçu pour offrir une résistance et une durabilité supplémentaires aux structures en béton.

II.3: Principe et étapes de fabrication:

Le ciment est principalement constitué de clinker, obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450°C. Le clinker est ensuite broyé avec environ 5% de gypse pour former du ciment Portland artificiel (CPA). En plus du calcaire et de l'argile, d'autres matériaux comme les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes et les fumées de silice peuvent être ajoutés pour produire une variété de ciments avec différentes caractéristiques. Nous pouvons résumer les processus de fabrication du ciment dans figure suivante :

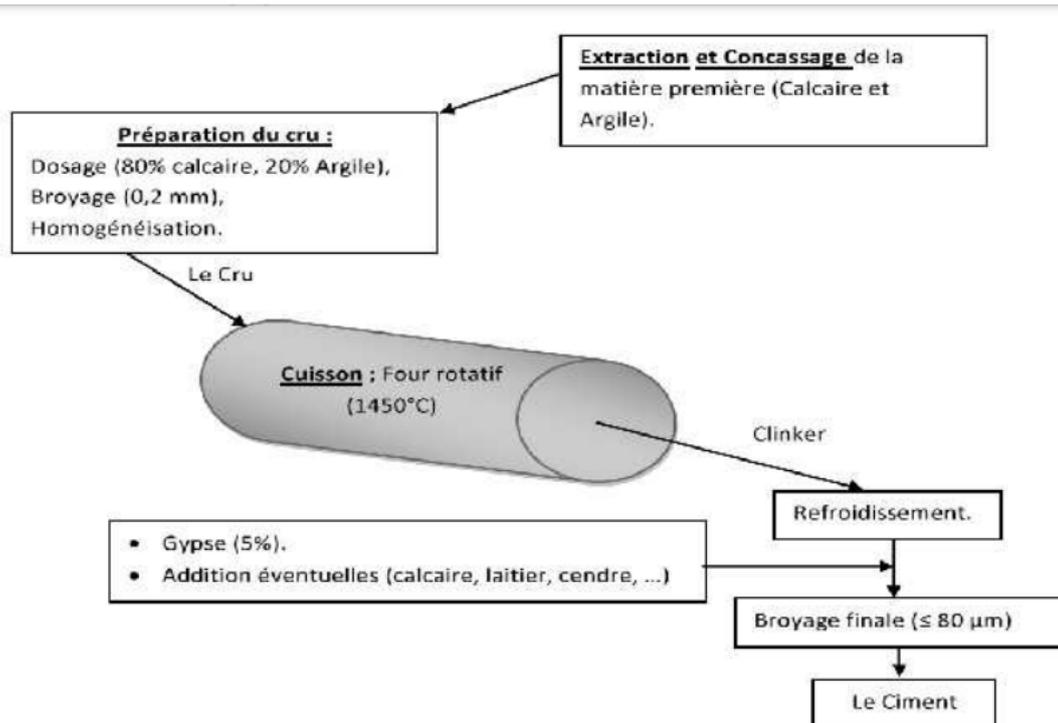


figure (1): le processus global de la fabrication du ciment

La fabrication des ciments se réduit aux 5 étapes principales :

II.3.1: Extraction et concassage :

Les matières premières comme le calcaire et la marne sont extraites des carrières à ciel ouvert. Ensuite, elles sont transportées vers l'usine où elles sont concassées séparément pour réduire leur taille à environ 0 – 25 mm. Les concasseurs, situés parfois sur les lieux d'extraction, ont des débits nominaux de 1000 t/h pour le calcaire et 250 t/h pour la marne. Enfin, les matières traitées sont acheminées vers l'usine par tapis roulant pour être stockées et pré-homogénéisées avant d'être réduites en éléments d'une taille maximale de 50 mm.



figure (2) : extraction de matière première.



figure (3): atelier concassage.

II.3.2: Préparation de la matière première:

Le calcaire et l'argile sont broyés et mélangés pour former une poudre fine appelée "cru". Cette poudre est ensuite préhomogénéisée et stockée avant d'être introduite dans le four. Où le cru est préparé sous forme de poudre. Après la formulation du cru et la préhomogénéisation, le broyage du cru permet d'obtenir des grains de petite taille pour faciliter la cuisson. L'homogénéisation finale garantit une composition chimique stable avant la cuisson.



figure (4) :Préhomogénéisation du calcaire et du sable.



figure (5) : Broyeur à boulets de l'atelier broyage cru.

II.3.3: le Cuisson :

Le processus de préparation du cru comprend trois principales étapes : le préchauffage, la pré-calcination et la clinkérisation. Le cru est d'abord préchauffé et décarbonaté dans un préchauffeur, puis subit une pré-calcination dans un pré-calciateur pour libérer le gaz carbonique nécessaire à la fabrication du clinker. Enfin, la clinkérisation a lieu dans un four à haute température, où les composants réagissent pour former le clinker. Ce dernier est ensuite refroidi et stocké en attendant d'être broyé pour produire du ciment.



figure (6): Atelier de cuisson de la clinker.

II.3.4: Broyage ciment :

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

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

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

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

Le ciment est transporté aux silos au moyen de pompes et d'un système de tuyauterie fermée

II.3.5: Stockage et expédition :

Après le broyage, les ciments sont stockés dans des silos, chaque silo ne pouvant contenir qu'une qualité spécifique de ciment. Ils sont ensuite commercialisés en vrac par camions ou trains pour les dépôts, La durée de stockage varie selon les conditions, allant d'illimitée dans un silo hermétiquement fermé à 2-4 mois en hiver et jusqu'à 12 mois en été à ciel ouvert. [3.4]



figure (7): silo de stockage ciment.



figure (8): Expédition en vrac et en sac.

III : Fours rotatifs de ciment:

III.1 : Définition de fours rotatifs :

Le four rotatif est un composant principal de la ligne de production de ciment. C'est un cylindre en acier, incliné à environ 3 %, revêtu de briques réfractaires et tournant lentement sur son axe à une vitesse de rotation variable entre 4 tr/mn et 6 tr/mn. Il mesure environ 89 mètres de long et 5.5 mètres de diamètre intérieur, et pèse plus de 200 t/h. Le four rotatif permet la calcination de différents matériaux, notamment la farine crue qui, introduite à l'extrémité supérieure du four, descend progressivement vers le bas grâce à la rotation du cylindre. Un brûleur injecte du combustible sous forme de gaz, produisant une flamme concentrique qui chauffe le matériau jusqu'à des températures d'environ 1500 °C. Les gaz chauds circulent en sens inverse du déplacement du matériau. Le four rotatif est essentiel pour la production de clinker, base du ciment, mais il nécessite une énergie thermique élevée en raison de ses coefficients de transfert de chaleur médiocres. Dans la conception des fours, il y'a 04 aspects importants à considérer d'un point de vue de technologie de processus, à savoir le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides granulaires à travers le four, le transfert de masse gaz-solide et les réactions.



figure (9) : Le four rotatif.

III.2 : Fonctionnement de fours rotatifs :

A l'intérieur du four, la température des fumées évolue de 2000-2200 °C (température de la flamme) à des températures de l'ordre de 1000 °C à la sortie du four, tandis que la matière passe de températures comprises entre 800 et 900 °C à des températures au voisinage de 1450 °C. Alors un revêtu de briques réfractaires est impératif, afin de protéger la virole et de réduire les pertes de chaleur, et le type de brique employé diffère selon la température de la zone concernée.

La farine se déplace à l'intérieur par gravité, en raison de l'inclinaison du four et de la rotation de ce dernier. Elle progresse peu à peu, de l'entrée par la partie supérieure jusqu'à la sortie par la partie inférieure, en étant exposée à toutes les

phases de la réaction pour former le clinker. Le lit de matière couvre entre 10 à 12 % de la section intérieure du four.

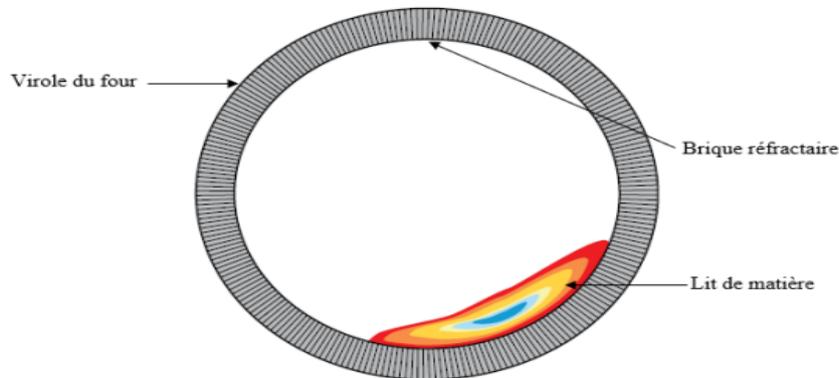


figure (10) : Coupe transversale d'un four rotatif.

Le flux de farine crue dans le four, avance à contre-courant par rapport aux gaz chauds provenant de la combustion, ce qui va favoriser l'échange thermique entre les deux flux. Le combustible est injecté par l'extrémité inférieure du four à travers une tuyère. Cette tuyère est alimentée par un mélange d'air primaire et de gaz naturel. Il y a aussi une quantité d'air secondaire qui entre à travers la partie inférieure du four. Le débit de gaz est réglé de façon à avoir une température de flamme comprise entre 2000- 2200 °C selon les besoins. Le débit de l'air (primaire et secondaire) est réglé selon celui du gaz de façon à avoir une combustion complète. Un analyseur de gaz est placé à la sortie du four et mesure le pourcentage de CO dans la fumée, ceci va permettre de contrôler si la combustion est complète.

III.3 : Les composants du four rotatif :

III.3.1 : Les éléments extérieurs principaux du Four rotatif :

III.3.1.1 : La virole :

Le tube d'un four rotatif est constitué de plusieurs viroles soudées ensemble en fonction de leur taille et des exigences de transport. Ces viroles, fabriquées à partir de tôles en acier de qualité E 24.2 ou A42 CP, sont arrondies pour correspondre au diamètre intérieur du four. Les tôles, d'environ 2200 mm de largeur, sont soudées de manière à éviter la continuité des soudures axiales, renforçant ainsi l'intégrité structurale du tube. Chaque virole est revêtue d'un matériau réfractaire pour garantir une efficacité thermique optimale. Les viroles se divisent en trois catégories selon leur position sur l'axe du four, il y a les viroles courantes, d'une épaisseur de 22 à 36 mm, les viroles intermédiaires, d'une épaisseur de 40 à 60 mm, et les viroles porteuses ou sous bandage, d'une épaisseur de 70 à 110 mm, La déformation due à l'ovalisation est perceptible jusqu'à une distance de 1,5 fois le diamètre du four de part et d'autre du bandage. La jonction entre une virole courante et une virole intermédiaire se situe à moins de 1,5 fois le diamètre, nécessitant une attention

particulière aux soudures en raison des contraintes combinées axiales et tangentielles. La surveillance de la température extérieure des viroles est cruciale, avec une limite maximale de 400 °C. Les contraintes admissibles sur les viroles sont de 2 daN/mm² pour les viroles courantes et de 1,5 daN/mm² pour les viroles intermédiaires ou porteuses, avec une variation de contrainte au changement d'épaisseur de 0,8 daN/mm². La flèche tolérée est de 10 pour la portée. Le choix des épaisseurs des viroles doit minimiser la discontinuité des contraintes, garantissant ainsi une structure robuste et durable. [2]



figure (11) : la virole de four rotatif.

III.3.1.2 : Le bandage :

Le bandage (voir Figure I.14) est un anneau métallique de section rectangulaire qui est fixé sur la virole du four au niveau des paliers. Le nombre de bandages varie d'un four à l'autre en fonction de sa conception. Dans le cas de notre four, il comporte quatre stations de roulement, ce qui signifie qu'il est équipé de quatre bandages.



figure (12) : Le bandage de four rotatif.

Le principal objectif du bandage est dû servir de support au four de maintenir l'ovalisation de la virole à des valeurs acceptables et d'éviter la déformation locale du bandage et du galet, De plus, il préserve la forme cylindrique de la virole afin de prévenir les fissures et la détérioration des briques réfractaires. Le bandage contribue également à limiter le transfert de chaleur de la virole vers les galets de support.

III.3.1.3 : Les galets :

Les galets, constitués de formes cylindriques en acier massif, remplissent la fonction cruciale de supporter le four. Leur conception vise à minimiser le frottement avec le bandage grâce à un faible coefficient de frottement de surface, et ils sont fabriqués dans le même matériau que les bandages auxquels ils sont en contact, assurant ainsi une usure uniforme. Chaque galet, illustré dans la Figure I.15, se compose d'un arbre et d'un corps, solidement assemblés par un ajustement serré grâce à une technique de frettage



figure (13) : un galet de four rotatif.

III.3.2: Les éléments intérieurs principaux du four rotatif :

III.3.2.1: Les briques réfractaires :

Les briques utilisées sont fabriquées à partir de matériaux céramiques réfractaires, conçues pour supporter des températures élevées allant jusqu'à 900 °C à l'entrée du four et jusqu'à environ 1450 °C près de la flamme à la sortie du four. Leur fonction principale est de protéger la virole en réduisant le transfert de chaleur.



figure (14): Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.

La fabrication du clinker de ciment dans les fours rotatifs constitue une étape cruciale du processus de production de ciment, nécessitant l'utilisation de briques réfractaires pour garantir l'isolation thermique. Le four rotatif est subdivisé en cinq parties, débutant par la zone d'entrée des matières jusqu'à la zone de décharge. La partie la plus critique des briques réfractaires est la zone de transition supérieure, exposée à hautes températures sans la protection d'une couche de croustage. Les briques à spinelle d'aluminate de magnésium sont privilégiées dans cette zone en raison de leurs propriétés thermomécaniques exceptionnelles. Comprendre les mécanismes de dégradation de ces réfractaires est crucial pour prolonger leur durée de vie et améliorer l'efficacité des fours rotatifs à ciment. En l'absence de briques, la virole du four serait exposée à des températures élevées pouvant entraîner la fusion de l'acier au carbone. De plus, les briques protègent la virole contre l'abrasion causée par le clinker, minimisant ainsi les pertes de chaleur grâce à leur faible conductivité thermique. [6]

III.3.2.2: Brûleur de four rotatif :

Le four fonctionne grâce à la combustion par le brûleur, atteignant une température de 1400 – 1450 °C. Pour ajuster la longueur de la flamme, l'air primaire est crucial, représentant 10 à 15 % de l'air total de combustion. Le brûleur du four rotatif est un injecteur avec un mélange d'air primaire et secondaire pour concentrer la flamme au centre du four. Les brûleurs contrôlent la combustion et la répartition thermique. Ils se composent d'un distributeur d'air et d'un injecteur de combustible,



figure (15) : brûleur de four rotatif.

III.3.2.3: Croutage :

Le croutage, conséquence du collage de la matière à la brique, revêt une importance capitale dans le processus de transformation. En plus de son rôle d'isolant thermique, il protégé le garnissage réfractaire contre l'attaque chimique du clinker en fusion dans cette zone dite de cuisson, zone la plus chaude dans le four. Également, sa présence à des épaisseurs bien précises améliore le mélange de la matière à l'intérieur et favorise ainsi une cuisson homogène du produit.

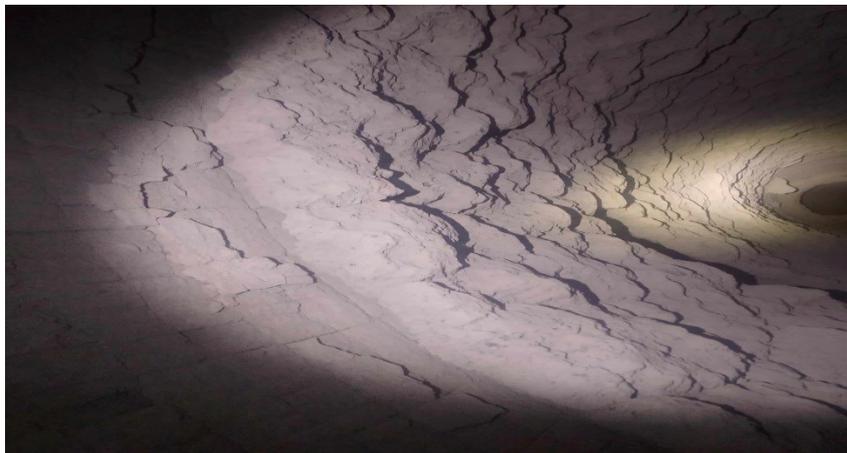


figure (16) : croutage de four rotatif.

En arrivant dans la zone de cuisson, la température de la matière avoisine les 1280 °C. Sa composition chimique est telle qu'elle se ramollie et aura tendance à coller au réfractaire, ce phénomène va se poursuivre, conditionnant la marche du four et la composition chimique du produit, jusqu'à la formation d'une certaine épaisseur estimée entre 200 et 400 mm ; le croutage peut être assimilé alors à du clinker en fusion, brusquement refroidit. [8]

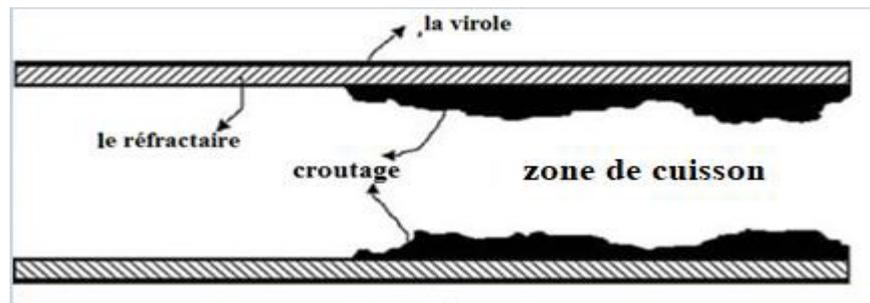


figure (17): Section longitudinale du four rotatif.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail le processus de fabrication du ciment, mettant en lumière les éléments clés ainsi que leur fonction au sein du four rotatif. Ce dernier joue un rôle central dans la production du ciment, étant le lieu où se déroulent les réactions chimiques cruciales, et ce, dans des conditions de température. Ainsi, une analyse thermique approfondie du four rotatif s'avère essentielle. Le chapitre suivant nous verrons le transfert de chaleur dans le four rotatif.

Chapitre II : Transfert de chaleur

I : Partie Bibliographie :

- Le travail de D.G. Shvachko and all [9], propose une méthode pour améliorer l'efficacité des fours rotatifs en utilisant un croutage comme isolant pour conserver la chaleur. En Ukraine, le clinkers est cuits dans des fours ayant une efficacité thermique de seulement 55 à 60%. Il est donc crucial d'optimiser l'utilisation de ces fours pour obtenir des gains économiques significatifs. Le revêtement est composé d'une tôle d'acier formant le tubage, avec des matériaux réfractaires. Ce système vise à simuler les conditions réelles du fonctionnement du four rotatif.

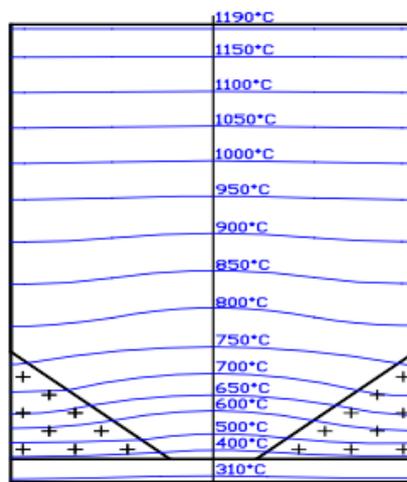


figure (18) : Répartition de la température dans les réfractaires préemballés et mesures avec isolation thermique (données expérimentales).

- L'étude de S. Wirtz and all [10], vise à estimer l'épaisseur du croutage dans un four rotatif en contrôlant la température de la virole. Des simulations sont utilisées pour modéliser le transfert de chaleur et déduire l'épaisseur du croutage. Ces simulations intègrent une couche de croutage et sont comparées à un cas de référence sans croutage. L'épaisseur du croutage est estimée initialement à partir des mesures de température le long de la virole, puis introduite dans les simulations. L'impact sur les conditions de traitement dans le four est évalué.

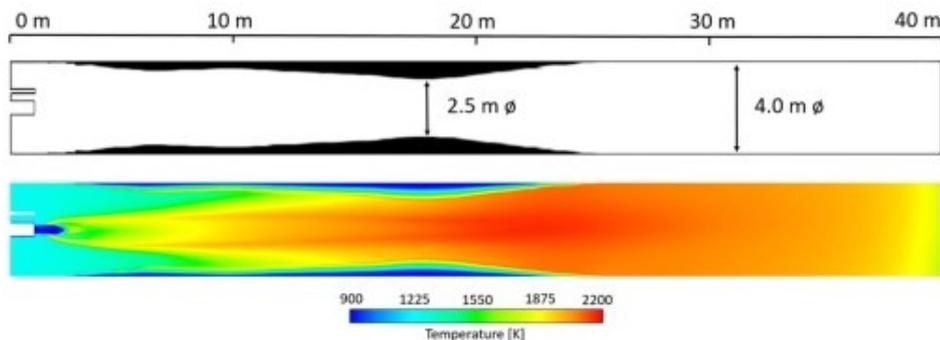


figure (19): Impact des couches de revêtement dans les fours à ciment rotatifs.

- L'étude de A. Rindang and all [11], explore un modèle de transfert de chaleur et de masse dans un séchoir rotatif. Elle propose un système de récupération de chaleur avec neuf échangeurs pour réduire les pertes énergétiques. Un modèle mathématique analyse les températures et les pertes de chaleur. Un modèle d'optimisation détermine les paramètres de conception optimaux, réduisant la surface de transfert de chaleur de 15,6%. L'analyse CFD montre une distribution inégale de la chaleur dans la chambre de séchage, principalement vers le haut et le centre.

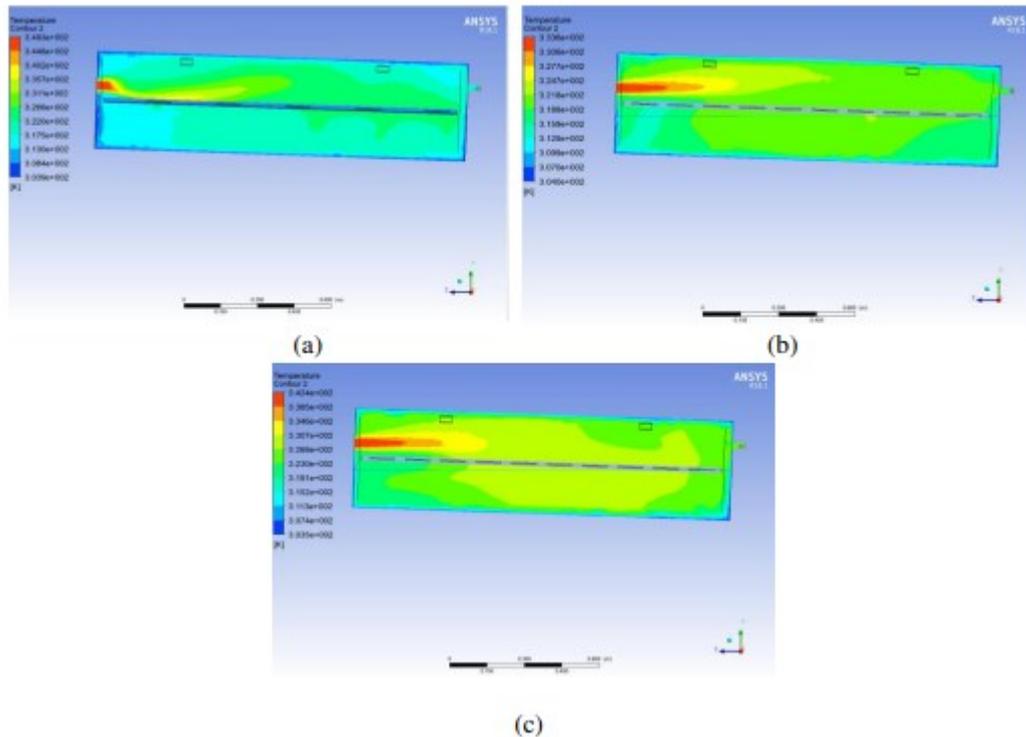


figure (20) : Temperature contour at 1 hour (a), temperature contour at 2 hours (b) and temperature contour at 3 hours (c).

- Un modèle basé sur l'analyse dimensionnelle est proposé par A. S. Bongo Njeng and all [12] pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur paroi-matière pour des températures de chauffage variant de 100 à 500 °C, cela est réalisé par la considération des conditions de service.

- Q.Y. Wen-Jing Du, and all [13],présentent un système innovant pour récupérer la chaleur perdue d'un four rotatif dans la production de ciment. En utilisant neuf échangeurs de chaleur, il optimise le transfert de chaleur et les débits massiques. Les tests expérimentaux ont montré une réduction de 10,8 % de la surface totale de transfert de chaleur et de 12,1 % de la consommation d'énergie, comparé aux méthodes traditionnelles.

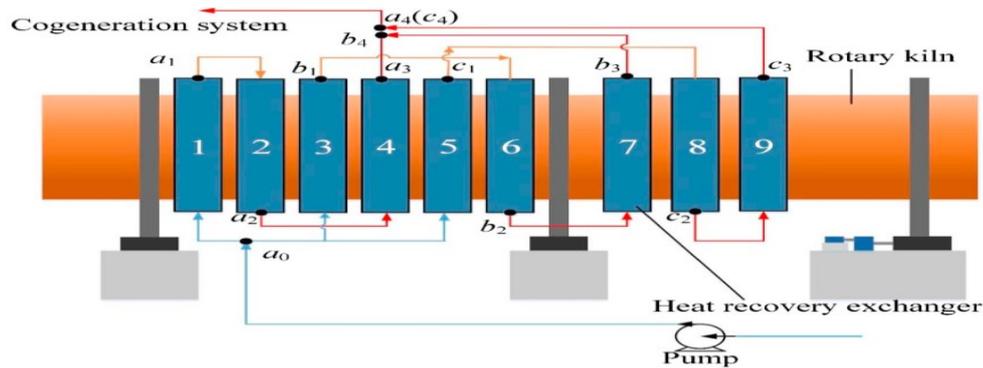


figure (21): système de récupération de chaleur.

- Ce papier de D. Ramanenka and all [14] présente une modélisation par éléments finis d'un four rotatif chaud revêtu de briques, étudiant la fiabilité du revêtement pour la production de boulettes de minerai de fer. Trois types de briques ont été testés en compression entre 25 °C et 1300 °C. Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente jusqu'à 1000 °C puis diminue. Les contraintes maximales observées sont de 34 MPa en compression et 3 MPa en traction. Les auteurs concluent que le modèle est fiable pour étudier le revêtement en brique à haute température.

- Les auteurs Q. Yin and all [15], ont développé un système pour récupérer la chaleur perdue par un four rotatif, en utilisant neuf échangeurs de chaleur pour chauffer l'eau. Ils ont créé un modèle mathématique qui prend en compte plusieurs facteurs comme la surface d'échange et les températures des fluides. Ce système vise à réduire les pertes d'énergie dans les industries chimiques et métallurgiques. Des tests ont été effectués pour évaluer les performances des échangeurs. Les résultats ont permis d'optimiser le système en se basant sur des critères comme la consommation d'énergie et le taux de transfert de chaleur.

- Q. Yin and all [16], proposent un modèle mathématique pour analyser les températures et les pertes de chaleur des fours rotatifs. Ensuite, un modèle d'optimisation est utilisé pour déterminer les paramètres de conception optimaux des neuf échangeurs de chaleur. Ce système réduit la consommation d'énergie en préchauffant l'eau, améliorant ainsi l'efficacité du four. Après optimisation, la surface totale de transfert de chaleur nécessaire est réduite de 15,6%, tout en répondant aux exigences des réactions chimiques et mécaniques des fours.

- H. Shahin, and all, [17] donner un modèle mathématique pour analyser l'énergie thermique dans la production de la chaux, couvrant le préchauffeur, le four rotatif et le refroidisseur. Ce modèle intègre le transfert de chaleur et les réactions chimiques. Après vérification avec des données réelles, il a été déterminé que l'augmentation du temps de séjour dans chaque zone améliore l'efficacité énergétique.

- Dans cette étude de A. Ustaoglu and all [18], sur un four rotatif à ciment à voie humide, les performances énergétiques et exergétiques ont été analysées. Les rendements énergétique et exergétique du four sont d'environ 46 % et 35 %. Une grande quantité d'énergie thermique, 30,5 MW, est évacuée de la cheminée du four. Pour évaluer la récupération d'énergie des gaz épuisés, le cycle organique de Rankine (ORC) a été étudié avec différents fluides. Le R245fa (pentafluoropropane) montre les

meilleures performances, tandis que le R600a (Isobutane) est moins efficace. Les fluides comme R245fa et R142b (Chlorodifluoroethane) sont plus adaptés aux hautes pressions et basses températures, contrairement au R600a. Les pertes d'exergie dans l'échangeur et l'évaporateur représentent environ 80% de la perte totale d'exergie.

- Cette thèse de C. M. Csernyei [19], étudie le transfert de chaleur dans un four à ciment rotatif via des jets dirigés vers sa virole. Un modèle a été créé pour analyser ce processus, prenant en compte la chimie et la chaleur. Une corrélation a été trouvée pour évaluer l'effet des jets sur le refroidissement, avec une précision d'environ ± 26 %. La convection forcée a permis de réduire la température de la virole comparée à la convection libre.

- H. Liu and all [20], donner un papier présente une simulation numérique de la dynamique et de la thermique des gaz chauds dans un four rotatif. Il utilise une approche à deux fluides et des modèles de transfert de chaleur, validés par des données expérimentales. Les résultats montrent une vitesse maximale du lit au centre et une température plus élevée en surface. Les facteurs clés influençant la distribution de la température sont la température initiale du gaz et la vitesse de rotation du four.

- H.R Goshayeshi,[21], présentent un modèle complet pour réduire la consommation énergétique des fours rotatifs dans la production de ciment. Il se concentre sur des paramètres clés comme le changement de température du revêtement, la phase de la matière et la température des gaz de combustion. La simulation vise à améliorer les performances et réduire les coûts de fabrication en optimisant ces paramètres.

- G. K. Gaurav and all [22], soumettre un article présente une simulation sur un four rotatif pour optimiser ses performances. En utilisant un modèle CFD 2D, les effets de différents paramètres comme l'angle d'inclinaison, le nombre de rotations et le débit massique du minerai de fer ont été étudiés. Les résultats montrent que les valeurs optimales sont un angle de $2,8^\circ$, 4 et 7 rot/min, et un débit de 5,83 kg/s. Ces conditions ont augmenté la teneur en Fe à 92%, soit une amélioration de 4,5% par rapport au système précédent. Les profils de température sont également restés dans des limites acceptables.

- Le travail de A.Agrawal and all[23], présente une modélisation du transfert thermique de la convection, du rayonnement et la conduction entre le gaz chaud, la paroi réfractaire et la surface de la matière.en supposant Les différences finies en régime permanent .en outre, L'analyse paramétrique le taux d'humidité, et le débit de matière, le débit de gaz, et aussi l'angle d'inclinaison et la vitesse de rotation du four est faite.

- L'article de Ch. M. Csernyei [24] étudie le transfert de chaleur par convection forcée à partir de jets dans un four rotatif à ciment. En effet, une corrélation a été développée afin d'intégrer cet effet dans un modèle unidimensionnel du four, ce qui a permis de montrer une précision de ± 26 % et de bien représenter les profils de température. De plus, l'ajout de la convection forcée a entraîné une réduction de la température de la virole par rapport à la convection libre.

- L'importance de étude de Christopher Csernyei and all 25], réside dans le transfert thermique par convection qui est mis en évidence par le refroidissement des fours rotatifs à ciment par l'utilisation de grands ventilateurs axiaux. A partir de ce travail, un

model numérique à été mis en évidence en utilisant des approches de model de turbulence.

- Ch Csernyei and all [26], développent un modèle unidimensionnel pour les fours rotatifs en utilisant des modèles existants et en intégrant des effets de convection forcée des ventilateurs de refroidissement. Le modèle utilise Matlab pour analyser les profils de température et les fractions massiques dans un four à ciment. Une validation montre des résultats cohérents avec un modèle existant. Les données numériques sont comparées avec la convection libre et forcée, montrant une erreur de 20% sans tenir compte de la convection forcée.

- Dans cet article de H.R Goshayeshi and all [27], une simulation a été réalisée pour étudier le comportement des paramètres du procédé de fonctionnement du four rotatif. Cela inclut le changement de phase de la matière, ainsi que la température du gaz et du revêtement intérieur du four. Les processus d'influence dans un four rotatif à ciment simulé et les paramètres de fonctionnement ont été examinés pour valider les systèmes.

- Le rapport de Y. V. Sharikov and all [28] explore l'application potentielle des techniques de calorimétrie TG/DSC, DSC, et flux de chaleur dans l'étude cinétique de réactions industrielles complexes à plusieurs étapes. Il aborde la pertinence des données calorimétriques et la manière dont elles sont traitées conjointement avec des données analytiques pour résoudre des problèmes de cinétique inverse. Les résultats et l'expérience tirés de l'utilisation des données DSC et calorimétriques pour développer des modèles mathématiques de processus chimiques industriels réels, ainsi que pour optimiser ces processus.

- l'étude menée par de K. Moussi and all [29], vise à modéliser un four rotatif dans une cimenterie utilisant la voie sèche. Ce modèle se base sur la connaissance des cinétiques des réactions et sur une représentation macroscopique des écoulements, réalisée par une cascade de réacteurs parfaitement agités avec reflux pour la zone de calcination, suivie d'une série de réacteurs tubulaires pour les zones de transition, de clinkerisation et de refroidissement. Les équations du modèle intègrent les bilans de matière et de chaleur, qui sont couplés entre eux par la cinétique des réactions. Ce modèle, validé par des mesures expérimentales, permet d'obtenir la température ainsi que les compositions du gaz et du solide le long des différentes zones du four.

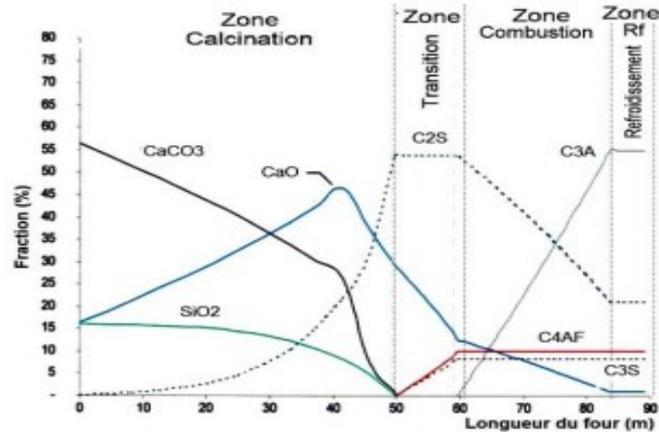


figure (22) : Profil de la composition chimique du clinker le long du four.

- Dans cette étude de P. Kalkert and all [30], Les ventilateurs classiques des fours peuvent être remplacés par un système de refroidissement par eau. Des buses spéciales projettent de l'eau sur le four pour le refroidir. Un contrôle précis maintient la température correcte. Les tests ont montré que cela fonctionne bien, réduisant la consommation d'énergie. Cela permet également de refroidir les zones chaudes spécifiques, prolongeant la durée de vie du four.

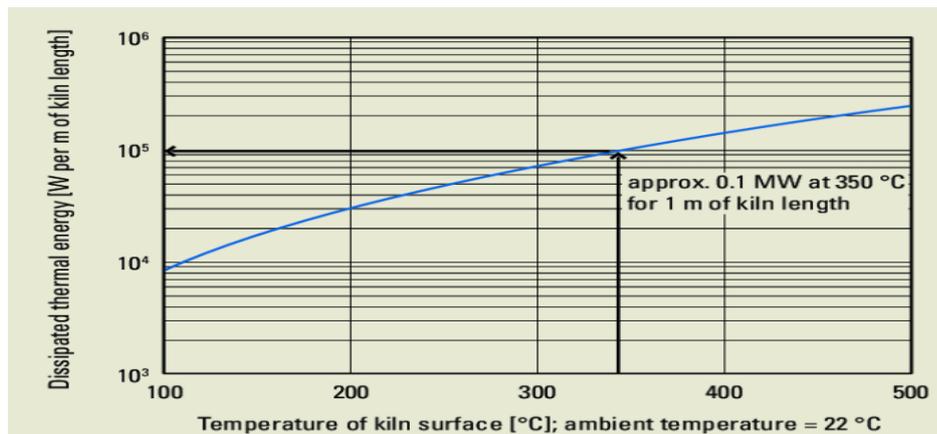


figure (23): Énergie thermique dissipée du four par rayonnement.

-dans l'étude menée par A. Atmaca and all [31], l'analyse se concentre sur l'impact des briques réfractaires et de la formation d'une couche d'Anastase sur la consommation d'énergie d'un four rotatif dans une cimenterie à Gaziantep, Turquie. Les résultats montrent que 12,5 MW d'énergie sont perdus, représentant 11,3% de l'apport énergétique total. Grâce à l'utilisation de matériaux spécifiques, une économie de 271,78 MJ par tonne de clinker est réalisée, réduisant la consommation d'énergie de 7,27 %. De plus, cela permet d'éviter l'émission de 1614,48 tonnes de CO₂ par an.

- l'article de W. K. Hiromi and all[32], étudie la dynamique des fluides d'un four à ciment rotatif avec un brûleur multicanaux. Les simulations utilisent ANSYS FLUENT 13.0 pour la combustion du charbon et des farines de viande et d'os (MBM). Les résultats montrent que la température des produits de combustion du MBM est plus

basse de 300 K par rapport au charbon, avec un épuisement du charbon du MBM de 83 % en raison de particules plus grosses.

- YI Zhengming and all [33], présentent un modèle mathématique pour prédire les profils de température dans un four rotatif d'alumine. En étudiant les processus de transfert de chaleur, de combustion du charbon et de refroidissement de la paroi du four, le modèle a été développé et testé avec des paramètres réels. Les résultats montrent que l'optimisation du coefficient d'excès d'air et de la quantité de charbon peut influencer la température et la longueur de la zone de frittage.

II : Transfert de chaleur dans le four :

La thermodynamique est une branche de la physique qui nous permet de comprendre comment l'énergie se comporte dans différents systèmes. Elle nous aide à prédire la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec son environnement pour passer d'un état d'équilibre à un autre. Lorsqu'il y a une différence de température entre deux points d'un système ou entre deux systèmes en contact, il se produit un transfert spontané de chaleur pour équilibrer les températures. Ce phénomène est ce qu'on appelle le transfert thermique. Le transfert thermique vise à décrire de manière quantitative, à la fois dans l'espace et dans le temps, comment les grandeurs caractéristiques du système évoluent, en particulier la température, entre un état d'équilibre initial et un état d'équilibre final. Cependant, bien que les principes de base de la thermodynamique nous fournissent des orientations sur ces processus, ils ne sont pas suffisants pour expliquer en détail comment l'énergie thermique se propage et comment sa vitesse de propagation peut être prédite. Pour ces aspects, d'autres lois et concepts sont nécessaires. Dans de nombreux domaines industriels, comme les fours, les évaporateurs, les condenseurs et les séchoirs, la compréhension du transfert thermique est cruciale. Ces systèmes utilisent des principes de transfert thermique pour fonctionner efficacement et en toute sécurité. [34]

II-1 : Transfert de chaleur :

La transmission d'énergie thermique est cruciale pour de nombreux appareils comme les générateurs de vapeur, les fours et les échangeurs. De nos jours, avec les coûts croissants de l'énergie, l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique tout en minimisant la consommation. La température est le principal moteur du transfert d'énergie thermique, qui peut se produire de trois manières : conduction, convection et rayonnement. Dans un four, la chaleur est généralement produite dans la zone de combustion, où les combustibles comme le gaz naturel et l'oxygène réagissent pour former le clinker. Cette chaleur est essentielle pour les réactions chimiques nécessaires à la transformation du matériau en clinker. Le gaz chaud du four transmet sa chaleur à différents endroits : il aide à la formation de la clinker dans les zones de calcination et de préchauffage, évapore l'eau dans la zone de séchage et contribue au refroidissement du clinker à sa sortie du four. Il est important de gérer

efficacement cette chaleur pour garantir le bon déroulement des réactions chimiques et assurer un fonctionnement énergétiquement autonome du four. Les échanges de chaleur peuvent se faire par radiation, convection et conduction. [34.35]

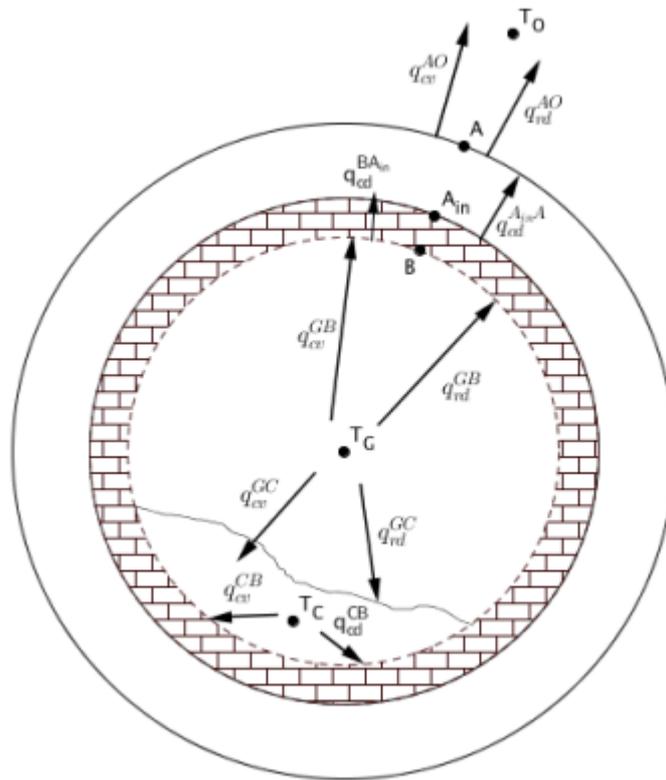


figure (24) : Principaux échanges de chaleur du système.

II 1.1 : conduction :

L'énergie peut se déplacer de deux manières : Par l'agitation des molécules due à la température. Et Par le mouvement des électrons libres, principalement dans les métaux. Dans les fours industriels, le transfert de chaleur par conduction directe est rare. Cela peut se produire lorsqu'un métal froid est placé sur une surface chaude ou quand il est immergé dans un liquide chaud comme le sel fondu. Lorsque deux objets solides se touchent, leurs surfaces atteignent rapidement une température similaire. La vitesse de transfert de chaleur dépend des propriétés des matériaux et de la manière dont ils sont en contact. La loi correspondante à ce mode de transfert de chaleur est :

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (\text{Loi de Fourier}) \quad (\text{III.1})$$

Où : q : la densité de flux de chaleur ;
 T : la température absolue ;

λ : la conductivité thermique [kcal/h.m.°C] ou [w/m.K (SI)]. λ est fonction de la composition chimique du milieu, de son état physique, sa température et de sa pression. Pour les solides la dépendance de la pression est négligeable. En fonction de la température λ évolue généralement d'une manière linéaire :

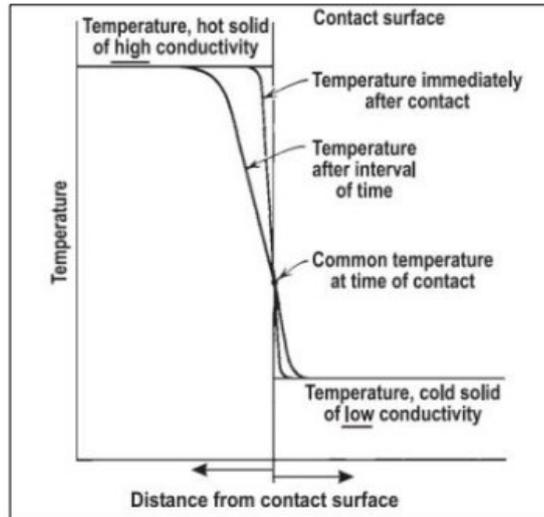


figure (25) : Effet de la conductivité et le temps sur le gradient de la température pour deux solides de températures et conductivité différentes.

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta T) \quad (III.2)$$

II .1.1 : La convection :

La convection est un processus de transfert de chaleur dû au déplacement d'un fluide, qui peut être un liquide ou un gaz. Ce mouvement transporte la chaleur d'une zone à une autre. Il existe deux types principaux de convection, la Convection naturelle, le fluide se déplace spontanément en raison des différences de température, où la partie chaude monte et la partie froide descend. Convection forcée , le mouvement du fluide est provoqué par une force extérieure, comme une pompe ou un ventilateur. La convection est un moyen efficace de transférer la chaleur, car elle combine les effets de la conduction thermique et du mouvement du fluide. La loi correspondante à ce mode de transfert de chaleur est :

$$q = hc \Delta T = hc (T_s - T_f) \quad (III.3)$$

Où : q : densité de flux de chaleur ;

hc : coefficient d'échange de chaleur par convection [Kcal/h.m².°C] ou [w/m²K (SI)] ;

T_s : Température de la surface du solide ;

T_f : Température du fluide.

II .1.2 Le rayonnement :

Le rayonnement thermique se produit lorsque deux objets à des températures différentes sont séparés par un milieu transparent comme l'air. Cela se produit grâce à des ondes électromagnétiques similaires à la lumière visible. Plus la température de l'objet émetteur est élevée, plus le rayonnement est intense. Lorsque ces ondes frappent une surface, elles peuvent être réfléchies, traversées ou absorbées. L'énergie absorbée est ensuite convertie en chaleur. En conséquence, la chaleur se déplace de l'objet le plus chaud vers l'objet plus froid. Dans les environnements à haute température, comme les fours opérant à plus de 1000 °C, le rayonnement thermique est souvent le principal mode de transfert de chaleur, représentant environ 90 % du transfert total. Bien que les principes du rayonnement thermique soient bien compris, ils ne sont pas toujours suffisants pour décrire précisément les situations réelles en raison des variations dans les surfaces et des interactions complexes entre elles. Le flux net de chaleur radiante entre un corps chaud (source de chaleur) et un corps plus froid (récepteur de chaleur) peut être calculé par les équations de Stefan-Boltzmann. [34]

$$M^{\circ} = \sigma T^4 \quad (\text{III.4})$$

Où : M° : l'émittence ;

σ : constante de Stefan-Boltzmann ;

T : Température absolue.

II .2 :Modèles mathématiques :

Nous présenterons les grandes approches utilisées par la plupart des travaux dans l'étude du four rotatif de clinker (Selon industrial furnaces). La première méthode utilise un modèle à une dimension (1D) qui se base sur les équations de conservation de la matière et de l'énergie. En revanche, la deuxième méthode se distingue par l'introduction du concept de fonctions opératoires.

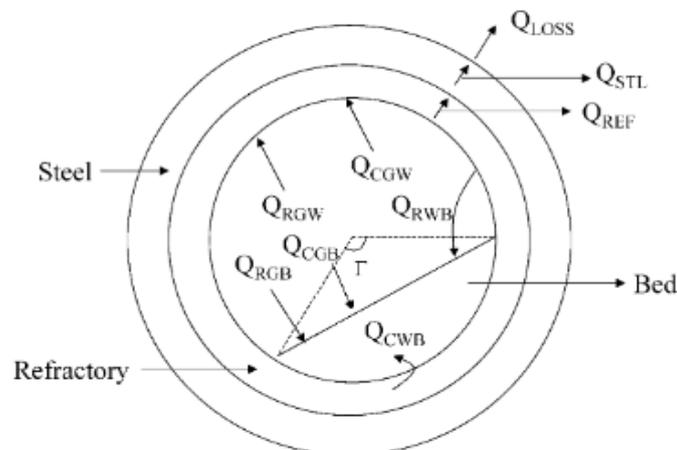


figure (26): Transfert de chaleur dans la section transversale du four.

II .2.1. Transfert de chaleur entre le gaz et les briques réfractaires (paroi interne) :

La quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur du four peut être exprimée par :

$$Q_{GB} = h_{GB} A_{GB} (T_G - T_B). \quad (\text{II-5})$$

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

$$A_{GB} = R_B (2\pi - \theta) \quad (\text{II-6})$$

Égale aussi à l'aire intérieure totale moins l'aire d'échange entre la paroi et le solide soit :

$$A_{GB} = 2\pi R_B - A_{BC} \quad (\text{II-7})$$

Avec

$$A_{BC} = 2.44 \left(\frac{M_{lit} T}{L_t \rho_{lit}} \right)^{0.35} \quad (\text{II-8})$$

qui est l'aire d'échange entre le mur intérieur et le solide rapportée par viola et al.

h_{GB} : est un coefficient global de transfert de chaleur (convection et rayonnement). [36]

- **Convection :**

Nous avons l'expression de Kreith et Black :

$$h_{GB} = 0,036 \frac{kg}{D} Re^{0,33} Pr^{0,33} \left(\frac{D}{L} \right)^{0,055} \quad (\text{II-9})$$

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

Et celle de Tscheng et watkinson qui à travers une étude expérimentale, ont proposé la relation suivante :

$$h_{GB} = 1,54 \frac{kg}{D_e} Re_D^{0,575} Re_D^{-0,292} \quad (\text{II-10})$$

Par ailleurs, ils ont montré que h_{GB} est indépendant du taux de remplissage volumique. [37]

- **Rayonnement :**

Nous avons quelques expressions simplifiées de h_{GB} qui engendrent des erreurs non négligeables notamment :

$$h_{GB} = 2\sigma\varepsilon_G\varepsilon_B(T_G^3 - T_B^3) \quad (\text{II-11})$$

Celle de Lyons et all.

Et

$$h_{GB} = \sigma\varepsilon_G(T_G^4 - T_B^4)/(T_G - T_B) \quad (\text{II-12})$$

Par ailleurs Ketslakh et all ont proposé une expression plus précise à savoir

$$h_{GB} = \sigma\Psi(T_G^4 - T_B^4)/(T_G - T_B) \quad (\text{II-13})$$

Avec

$$\Psi = \varepsilon_G\varepsilon_B[1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]\Omega, \quad (\text{II-14})$$

Où

$$\Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \theta/2} \quad (\text{II-15})$$

et

$$\Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi[1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]]} \quad (\text{II-16})$$

Toutefois, Hottel et all proposent une expression également précise de la quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur lorsque [38] : $\varepsilon_B \geq 0,8$

$$Q_{GB} = \sigma A_{GB}(\varepsilon_B + 1)(\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_B^4)/2 \quad (\text{II-17})$$

II .2.2. Transfert de chaleur entre le gaz et le solide (lit de matière) :

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

$$Q_{GC} = h_{GC}A_{GC}(T_G - T_c), \quad (\text{II-18})$$

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

$$A_{GC} = 2R_B \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (\text{II-19})$$

h_{GC} : Coefficient global de transfert de chaleur (convection et rayonnement). [39]

- **Convection :**

On considère également ici les travaux de Tscheng et all basés sur des travaux expérimentaux, ainsi ils proposent :

$$h_{GC} = 0,46 \frac{k_g}{D_e} Re_D^{0,535} Re_\omega^{0,104} \eta^{-0,341}. \quad (\text{II-20})$$

• **Rayonnement :**

Nous avons également quelques expressions simplifiées de h_{GB} qui engendrent des erreurs non négligeables notamment :

$$h_{GC} = 2\sigma\varepsilon_G\varepsilon_C(T_G^3 + T_C^3) \quad (\text{II-21})$$

Et

$$h_{GC} = \sigma\varepsilon_G(T_G^4 - T_C^4)/(T_G - T_C) \quad (\text{II-22})$$

Par ailleurs Ketslakh et Tsibin ont proposé une expression plus précise à savoir :

$$h_{GC} = \sigma\Psi(T_G^4 - T_C^4)/(T_G - T_C) \quad (\text{II-23})$$

Avec $\Psi = \varepsilon_G\varepsilon_C[1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)]\Omega,$ (II-24)

Où $\Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \theta/2}$ (II-25)

Et $\Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]}$ (II-26)

Toutefois, Hottel et all proposent une expression également précise de la quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur lorsque $\varepsilon_C \geq 0,8$:

$$Q_{GC} = \sigma A_{GC}(\varepsilon_C + 1)(\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_C^4)/2. \quad (\text{II-27})$$

II .2.3. Transfert de chaleur entre la paroi et le solide :

L'équation générale est :

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

Avec A_{BC} L'aire d'échange entre le gaz et les briques réfractaires et se calcule par des considérations géométriques et est généralement prise égale à :

$$A_{BC} = 2,44 \left(\frac{M_{lit.T}}{L_{T.\rho lit}} \right) \quad (\text{II-29})$$

$$\text{Ou à : } A_{BC} = \theta R_B \text{ ou à } A_{BC} = 2R_B \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{II-29})$$

h_{BC} Est un coefficient global de transfert de chaleur (conduction et rayonnement).

- **Conduction :**

Pour ce mode de transfert de chaleur, beaucoup de recherches se sont basées sur h_{BC} constant, comme Lyons et al. Qui l'ont estimé $222.0 \leq h_{BC} \leq 250.0$. Cependant, certaines études l'ont prise comme variable, notamment celle de Sass qui propose :

$$h_{BC} = 118,2 \left(\frac{M_G}{A_G}\right)^{0,67} . \quad (\text{II-30})$$

- **Rayonnement :**

Les expressions simplifiées proposées respectivement par Lyons et al. et Sass sont :

$$h_{BC} = 2\sigma\varepsilon_B\varepsilon_C \frac{A_B}{A_C} (T_C^3 + T_B^3) \quad (\text{II-31})$$

et
$$h_{BC} = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon_C(T_B^4 - T_C^4)/(T_B - T_C). \quad (\text{II-32})$$

Quant à ketslakh et Tsibin ils ont proposé une expression plus précise à savoir :

$$h_{BC} = \sigma\Psi(T_B^4 - T_C^4)/(T_B - T_C) \quad (\text{II-33})$$

Avec
$$\Psi = \varepsilon_B\varepsilon_C(1 - \varepsilon_G)\Omega,$$

Où
$$\Omega = \frac{1}{1-(1-\varepsilon_G)(1-\varepsilon_B)[1-\Phi[1-(1-\varepsilon_G)(1-\varepsilon_C)]]} \quad (\text{II-34})$$

Et
$$\Phi = \frac{\sin(\pi-\frac{\theta}{2})}{\pi-\theta/2}. \quad (\text{II-35})$$

III. Conclusion :

Dans cette section, nous avons examiné les recherches existantes sur le four rotatif de ciment, montrant son importance via une revue de littérature. L'analyse thermique du four implique l'étude des différentes façons dont la chaleur se transfère entre les gaz, les briques réfractaires et les surfaces solides, ce qui justifie pleinement l'intérêt d'une telle étude. Le prochain chapitre portera sur la méthode numérique utilisée pour notre four rotatif.

Chapitre III : Méthode Numérique

I. Introduction :

La simulation numérique utilise des outils informatiques et mathématiques pour modéliser le fonctionnement de systèmes, appliquée notamment dans les domaines nucléaire, aérospatial et automobile. Elle comprend la préparation des données, l'exécution des programmes de calcul et l'analyse des résultats, avec des logiciels traduisant les modèles physiques en algorithmes numériques. Les logiciels conviviaux comme ABAQUS, ANSYS, etc., démontrent l'efficacité des simulations en dynamique des structures. Les résultats sont obtenus via des logiciels tels qu'ANSYS et CFX d'ANSYS, avec une discrétisation des équations permettant leur résolution par des méthodes numériques comme les éléments finis et les volumes finis, souvent utilisés dans des logiciels comme Fluent d'ANSYS.[37]

La CFD, ou dynamique des fluides numériques, prédit les comportements des fluides en résolvant des équations par ordinateur. Elle offre des avantages par rapport aux expériences physiques, comme la capacité à simuler des phénomènes difficiles à étudier autrement, comme les avions, les éoliennes ou les explosions. En pratique, elle est utilisée pour concevoir et optimiser des produits, évaluer des performances et compléter les données théoriques et expérimentales. [38]

II.1. Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées dans le problème continu par des valeurs ponctuelles sur une grille discrète, avec des avantages en simplicité d'écriture et coût de calcul, mais des inconvénients comme la limitation de géométrie et la complexité des conditions aux limites. Elle est souvent utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles en deux étapes : la discrétisation des opérateurs différentiels et la convergence du schéma numérique. Par exemple, pour le problème de la diffusion de chaleur dans un barreau chauffé avec des conditions de Dirichlet homogènes, on peut utiliser la méthode en discrétisant l'équation et en résolvant le schéma numérique avec une méthode itérative. Cependant, cette méthode est limitée aux géométries simples et peut être difficile à généraliser pour des cas plus complexes. [39]

II.2. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une approche largement utilisée dans divers domaines industriels pour résoudre des problèmes complexes de mécanique des solides, de mécanique des fluides, de thermique, d'électricité, d'électromagnétisme, et bien d'autres. Elle repose sur la discrétisation ou le maillage d'un modèle mécanique en éléments finis, où chaque élément est assemblé à partir de points nodaux. Ces éléments sont conçus pour représenter des parties discrètes de la structure étudiée, permettant ainsi une modélisation précise du comportement global. La qualité des résultats obtenus dépend fortement du maillage choisi, ce qui nécessite une attention particulière lors de sa conception. En décomposant le milieu continu en éléments finis et en reliant ces éléments par des points nodaux, il devient possible de définir les déplacements à l'intérieur de chaque élément à l'aide de

fonctions de forme, en fonction des déplacements nodaux. Ces déplacements déterminent les déformations à l'intérieur de chaque élément, ce qui, combiné aux propriétés élastiques du matériau, permet de déterminer les contraintes à chaque point de l'élément. En utilisant des équations de la théorie de l'élasticité, on peut établir une relation linéaire entre les contraintes et les déformations, permettant ainsi de résoudre le problème de manière efficace. Enfin, en équilibrant les contraintes exercées aux frontières avec un système de forces concentrées aux nœuds, et en prenant en compte les éventuelles forces réparties, on peut déterminer le comportement global du système. [37]

II.3. La méthode des volumes finis:

La méthode numérique repose sur une formulation aux volumes finis. Elle présente le très grand avantage d'être à la fois facilement applicable sur un maillage quelconque, et assure également la conservation des propriétés physiques. De plus, une régularité suffisante des solutions ne peut pas toujours être garantie : le cas des écoulements avec chocs en est un exemple classique, ou encore l'écoulement sur le bord de fuite d'une aile lorsque la production d'entropie est différente le long des lignes de courants de part et d'autre du profil (discontinuité tangentielle). Il est alors important de représenter précisément les lois de conservation dans leur formulation intégrale. La méthode la plus naturelle pour y parvenir est évidemment de discrétiser la formulation intégrale des équations et non la forme différentielle.

Dans la méthode aux volumes finis, le domaine est subdivisé en cellules quelconques. Sur chacune d'elles les lois de conservation sont appliquées afin de déterminer les variables du champ de l'écoulement en des points discrets des cellules (nœuds). Les méthodes aux volumes finis n'exigent pas un maillage structuré. Il y a donc bien évidemment une liberté considérable dans le choix des cellules et des nœuds. Cependant, des règles doivent être suivies dans la construction du maillage pour garantir la stabilité du code et s'assurer de la pertinence du calcul (maillage fin lorsque l'on s'attend à trouver de petites structures, raffinement plus précis dans les zones de discontinuités etc.). On dispose ainsi d'une méthode de discrétisation très facilement adaptable à tous types de géométrie, et également capable de gérer des discontinuités.

La méthode des volumes finis est la plus utilisée actuellement dans les codes de simulation numérique (Fluent, CFX d'ANSYS, etc....).

La méthode des volumes finis est une approche de résolution numérique qui découpe le domaine d'étude en petits volumes autour de points principaux. Chaque volume est délimité par des interfaces, et l'équation différentielle est intégrée dans chaque volume. On approxime la solution entre les points principaux à l'aide de fonctions d'approximation, puis on discrétise l'équation dans tout le domaine. Le résultat est une équation algébrique basée sur les valeurs aux points principaux.

II.3.1. Principe de la méthode des volumes finis :

Le domaine de calcul est divisé en un certain nombre de volumes élémentaires entourant des points du réseau de maillage. L'équation différentielle qui gouverne le problème est intégrée sur chaque volume de contrôle, vérifiant ainsi le principe de conservation à la proximité des points ou nœuds du réseau de maillage discret. Le résultat est l'équation de discrétisation qui contient les valeurs de ϕ dans le domaine étudié. L'équation de discrétisation obtenue de cette manière exprime le principe de conservation de ϕ dans un volume infinitésimal de contrôle. La méthode des volumes finis est aussi une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équation algébriques, qui peuvent être résolus numériquement elle consiste à intégrer les équations de transport ou aux dérivées partielles (EDP) sur chaque volume de contrôle, couvrant ainsi tout le domaine physique. Pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (V_c).

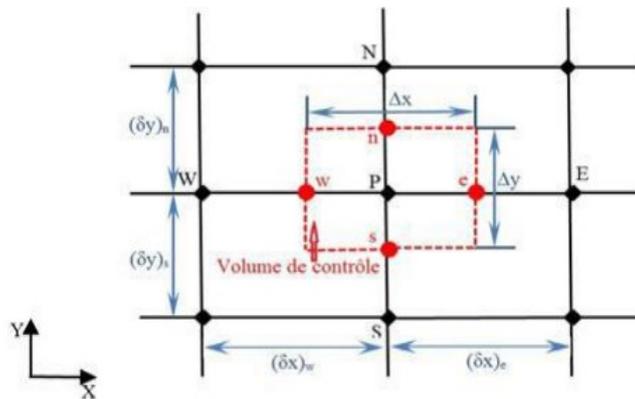


figure (27) : Volume de contrôle typique bidimensionnel.

Volume de contrôle typique :

Ce volume de contrôle est utilisé pour l'expression des bilans des grandeurs scalaires. Les faces de ce volume sont localisées au point e, w, n, s. Avec p le centre du volume de contrôle. E, W, N, S, sont les centres des volumes de contrôle adjacents.

Pour un nœud principal P, les points E, W, N et S sont les centres des volumes de contrôle adjacents, situés respectivement à l'Est, à l'Ouest, au Nord et au Sud du point P. Le volume de contrôle P est montré par les lignes discontinues, et ces faces sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction Y.

La subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection présente un nœud, où on trouve la variable P et les composantes u et v du vecteur de vitesse qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents qui se séparent par les incréments de distance (Δy , Δx , δ_{yn} , δ_{ys} , δ_{xw} , δ_{xe}) sont définis sur la (Figure 27). Les scalaires ϕ sont stockés au nœud central. Les composantes de vitesse u et v sont stockées dans des nœuds décalés (Figure 2_). L'emploi de tels maillages entrelacés permet de calculer les gradients de pression dans les équations de quantité de mouvement, sans interpolation des pressions et le calcul des flux convectifs

dans les équations sans interpolations des vitesses, cette technique nous permet d'éviter l'instabilité. Dans lequel des cellules de réseau supplémentaires montrent des solutions complètement différentes.

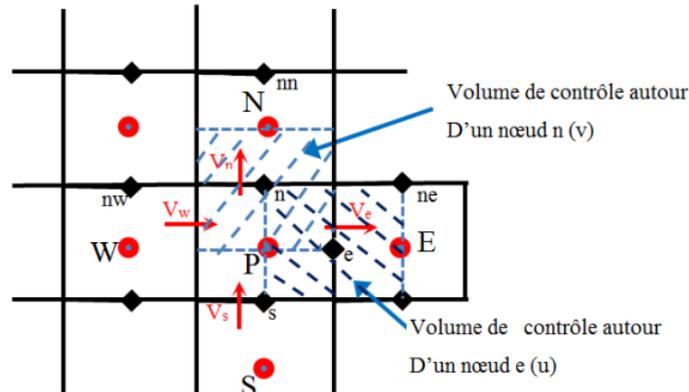


figure (28) : Volume de contrôle décalé pour u et v dans un maillage entrelacé.

II.3.2. Etapes de résolution avec la méthode des volumes finis

- Définir l'équation du phénomène.
- Discrétisation du domaine (subdivision du domaine en volumes élémentaires)
- Intégration de l'équation sur chaque volume de contrôle (théorème de Gauss)
- Traitement des conditions aux limites.
- Formation du système d'équation algébrique résultant et sa résolution.
- Présentation des résultats (comparaison avec la solution analytique ou à l'expérience).

➤ Avantages

- Masse, moment et énergie conservés sous forme discrétisée
- Conservation globale : retrouvée lorsqu'on somme les équations sur toutes les CVs
- Somme des intégrales de surface = 0
- Locale/Globale conservation peut être obtenue avec DF mais naturelle/directe dans formulation VF.
- Ne nécessite pas de transformation de coordonnées pour être appliqué sur des maillages irréguliers. [40]

II.3.3 : Équations gouvernantes :

Les équations pour le mouvement des fluides se basent sur la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Pour les problèmes de transfert de chaleur, l'équation d'énergie est clé. Si le fluide est compressible, une équation d'état thermodynamique est nécessaire. Parfois, pour un écoulement isotherme, on peut omettre l'équation de conservation de l'énergie. Les approches lagrangienne et eulérienne sont utilisées pour suivre le mouvement des particules. On applique le bilan sur volume de contrôle et la théorie du transport de Reynolds pour dériver les équations.

Conservation de continuité: L'équation de continuité dans un système fluide en mouvement stipule que la masse est conservée. En d'autres termes, la variation de masse dans un élément fluide pendant un intervalle de temps est égale à la somme des masses entrant et sortant de cet élément. Cela se traduit mathématiquement par une équation qui relie les vitesses d'entrée et de sortie du fluide avec sa densité et sa variation de volume.

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III-1})$$

Conservation de quantité de mouvement :

Pour un fluide incompressible, l'équation de Navier-Stokes se résume à : "Forces = Variation de la quantité de mouvement.

- Selon la coordonnée radiale :

$$v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.2})$$

- Selon la coordonnée axiale :

$$V \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_z \quad (\text{III.3})$$

Équation de conservation d'énergie :

L'équation d'énergie se résume à : "La variation totale d'énergie dans le système équivaut à la différence entre la chaleur ajoutée et le travail réalisé par le système sur son environnement."

$$\rho C_p \left(v \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.4})$$

III.1. Description du problème :

Ce projet porte sur une analyse numérique du transfert thermique dans les fours rotatifs, incluant la convection naturelle, forcée, la conduction et le rayonnement. L'objectif est de refroidir la zone de cuisson du four rotatif. La méthode des volumes finis a été employée avec les logiciels ANSYS WORKBENCH et ANSYS FLUENT. Le four étudié est celui de l'usine BENI SAF, groupe industriel des ciments d'Algérie-Gica-, dont les dimensions sont présentées dans Tableau (III.1):



figure (29) : four rotatif de l'usine BENI SAF .

Dimensions du four	Valeur
Longueur	90 m
Longueur de la partie cuisson	20 m
Diamètre intérieur	5 m
Epaisseur de la virole	25 mm
Epaisseur de Brique	220 mm
Epaisseur de Croutage	200 mm
Inclinaison	2.50°

Tableau(1) : Les dimensions du four rotatif d'usine BENI SAF.

Cette étude est réalisée avec un modèle mathématique (3D). Le domaine cylindrique est considéré comme un fluide. Le centre du four placé à 24.5 m de l'entrée du domaine de calcul et la longueur du domaine de calcul du centre du four à la limite de la sortie est égale à 45 m. L'étude est basée sur le transfert de chaleur à l'intérieur du four 1450 °C jusqu'à la paroi extérieure.

Notre but c'est de refroidir la virole du four rotatif avec air et déterminer la valeur de température dans la virole Dans un deuxième temps.

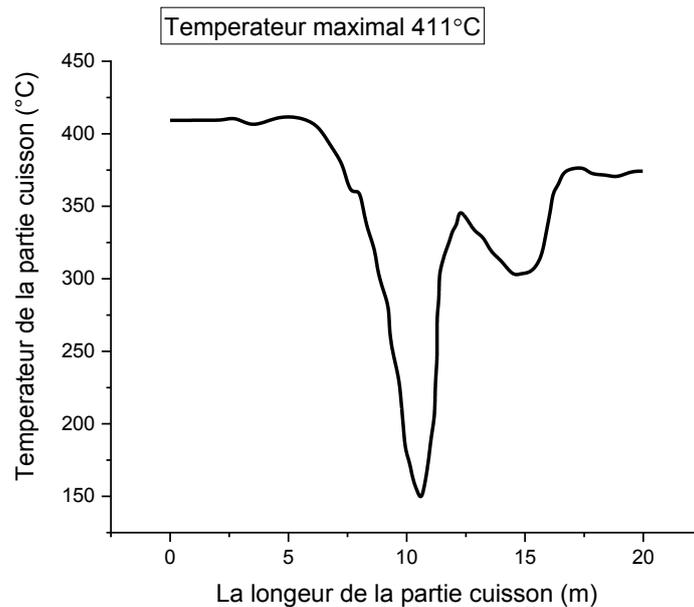


figure (30): profil de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d'usine (BENI SAF).

La Figure (III.4) illustre la température de la virole dans la zone de cuisson, obtenue à partir d'une caméra thermique recueillie dans la salle de contrôle de l'usine BENI SAF.

III.2 : Présentations du logiciel ANSYS :

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé dans la simulation numérique, basé à Canonsburg, en Pennsylvanie, aux États-Unis. L'entreprise développe, commercialise et supporte des logiciels de simulation utilisés pour prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Ses principaux produits reposent sur la méthode des éléments finis pour résoudre des modèles préalablement discrétisés.

En général, les logiciels de calcul par éléments finis sont coûteux et nécessitent des compétences avancées en calcul. Cet outil permet de réaliser des simulations mécaniques de structures avec des capacités principales telles que l'analyse statique, l'analyse modale, l'analyse harmonique (réponse forcée) et l'analyse temporelle. [42]

III.2 .1.Présentation du WORK-BENCH :

ANSYS Workbench est le cœur de l'environnement de simulation ANSYS. Il simplifie la saisie des données nécessaires pour les calculs. En utilisant les commandes APDL, les fonctions classiques d'ANSYS peuvent également être intégrées dans Mechanical. Des scripts permettent d'automatiser les tâches et les procédures de contrôle dans ANSYS Workbench.

ANSYS est reconnu pour son efficacité exceptionnelle au quotidien, avec une interface utilisateur cohérente, une technologie réseau complète, une connexion directe avec tous les principaux logiciels de CAO, et une large gamme de simulations physiques. ANSYS Workbench permet de prendre des décisions de conception plus informées en centralisant toutes les données de simulation en un seul endroit. [43]

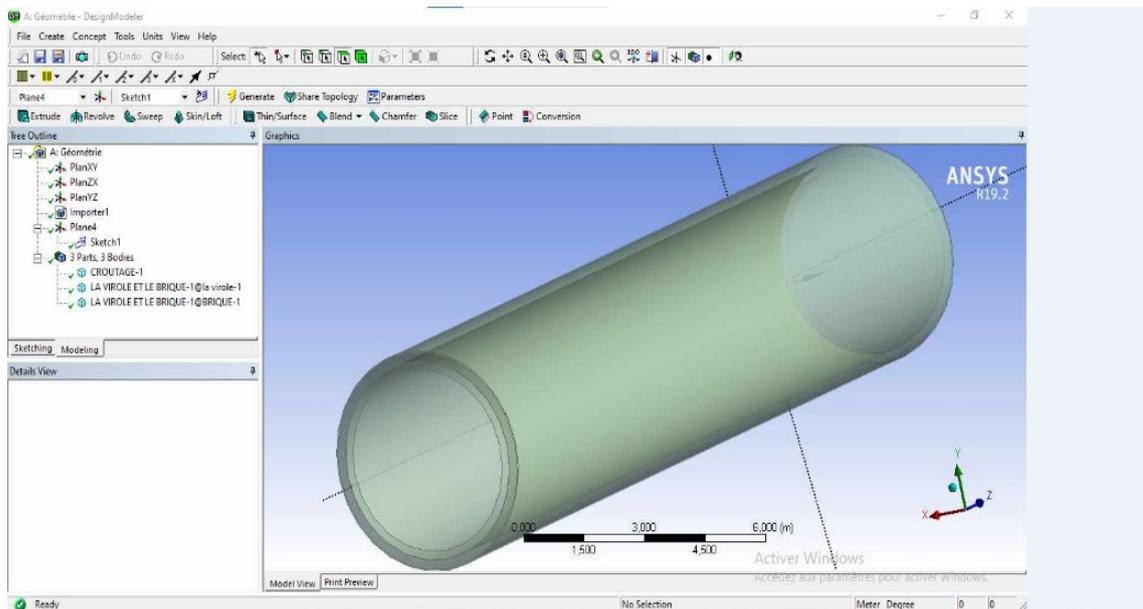


figure (31) : L'interface d'Ansys Workbench.

III.2.2. Présentation de l'ANSYS Fluent CFX :

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides (CFD). En tant que solveur, il ne propose pas de fonctionnalité de maillage; celui-ci doit être réalisé à l'aide d'un logiciel de maillage, comme ICEM CFD. ICEM CFD est utilisé pour la conception assistée par ordinateur (CAO) et la génération de maillages. Il permet de créer des maillages structurés, non structurés, multi-blocs et des réseaux hybrides avec diverses géométries de cellules.

Les maillages générés peuvent ensuite être exportés vers différents logiciels de CFD, tels que Fluent ou STAR-CCM+. ICEM CFD est principalement un outil de maillage et n'est pas conçu pour créer des géométries complexes, bien qu'il soit suffisant pour des géométries simples.

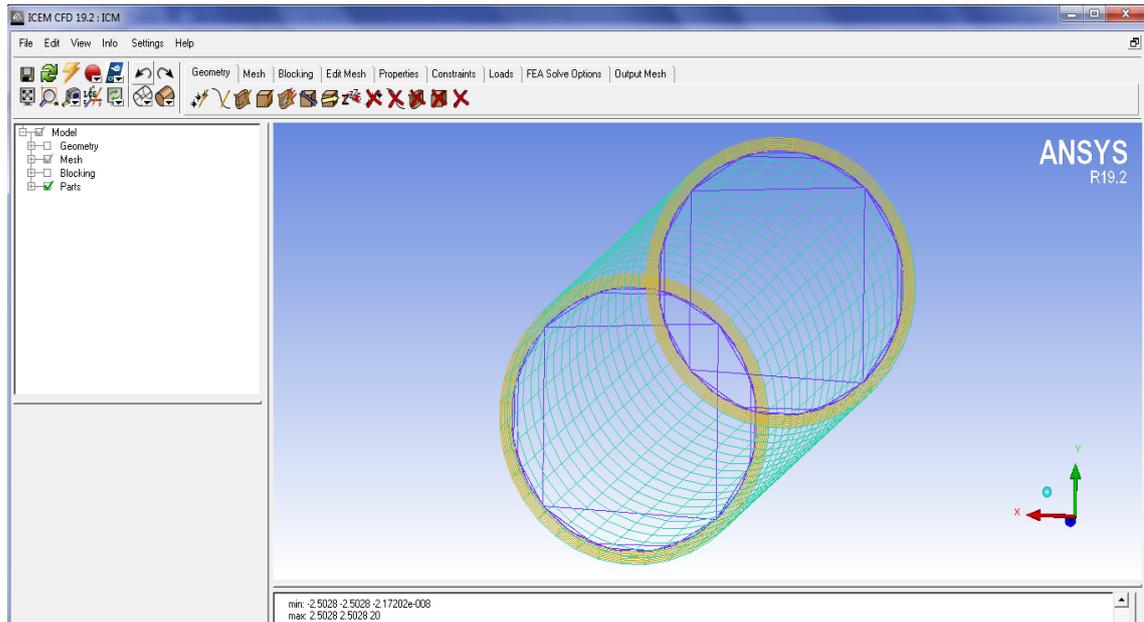


figure (32): L’interface d’Ansys Fluent CFX

L’analyse du comportement thermique d’un four rotatif de cimenterie est effectuée en utilisant les équations d’énergie dans ANSYS Workbench et la mécanique des fluides avec Fluent CFX.

Ce programme, performant et polyvalent, est utilisé pour résoudre des problèmes thermiques. Grâce à sa technologie avancée, il permet d’obtenir des solutions fiables et précises. Cependant, en raison de la complexité du modèle, les calculs prennent beaucoup de temps. Il est donc nécessaire de simplifier le modèle afin d’obtenir une solution suffisamment précise.

III.3. Modélisation dans ANSYS :

Nous concevons un modèle d’un four rotatif composé de trois couches distinctes : la virole, la brique réfractaire et le croutage. Chaque couche a des épaisseurs spécifiques. La virole, qui est la couche externe, a une épaisseur de 25 mm. La brique réfractaire, située entre la virole et le croutage, a une épaisseur de 220 mm. Enfin, le croutage, qui constitue la couche interne, a une épaisseur de 200 mm. En outre, l’intérieur du cylindre est considéré comme contenant un fluide, tel que du ciment ou du clinker. Ce fluide occupe environ 12 % de la section interne du four. Cette considération est cruciale pour modéliser les interactions thermiques et mécaniques entre les différentes couches et le fluide interne, permettant ainsi une simulation plus précise des conditions réelles de fonctionnement du four rotatif.

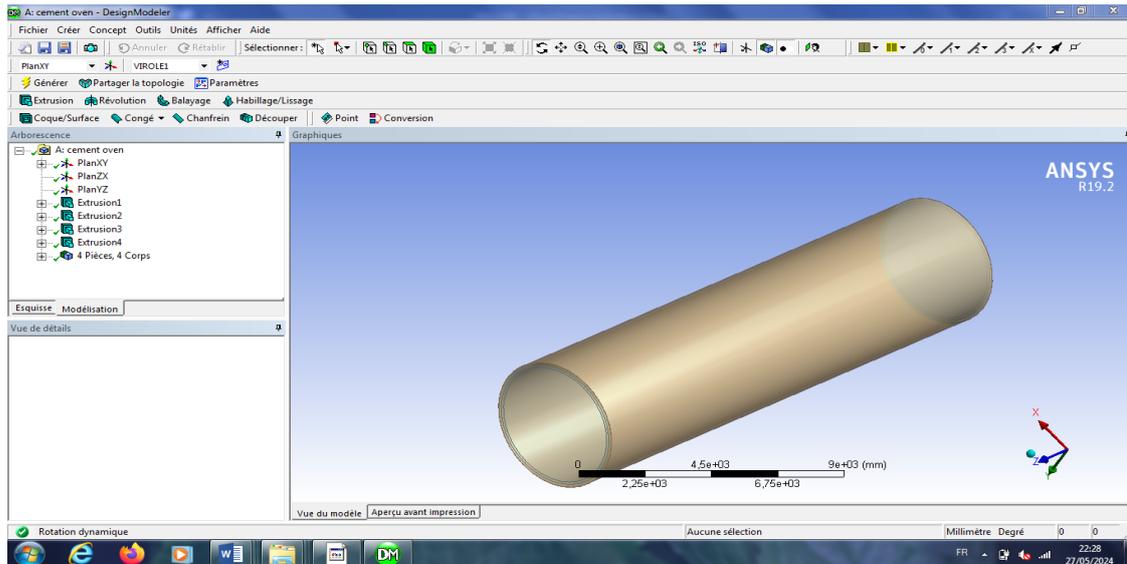


figure (33) : géométrie du four rotatif.

III.3.2. Maillage :

La réalisation des maillages constitue généralement l'étape la plus longue en termes de temps de travail humain dans les simulations numériques en ingénierie. Cette étape revêt une importance cruciale, car la qualité du maillage détermine la précision des résultats obtenus. Il est donc essentiel de concevoir des maillages soignés capables de capturer tous les phénomènes physiques recherchés. Les types de maillage se divisent en deux catégories principales. D'une part, nous avons les maillages triangulaires et tétraédriques, qui sont souvent utilisés pour leur flexibilité dans la représentation des géométries complexes. D'autre part, les maillages quadrangulaires et hexaédriques sont privilégiés pour leur capacité à offrir des solutions plus précises et stables dans des configurations régulières.

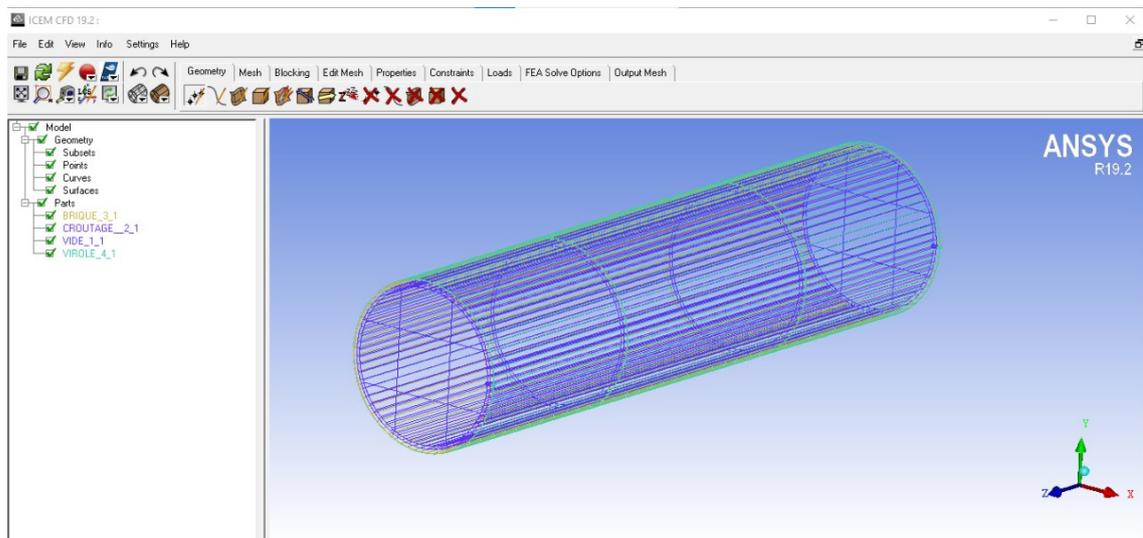


figure (34) : maillage quadratique.

III.3.3. Optimisation du maillage :

Pour déterminer la taille optimale et le nombre d'éléments dans les directions circonférentielle et longitudinale, nous avons réalisé plusieurs expériences en variant le nombre d'éléments et le nombre d'itérations. Nous avons constaté qu'un maillage trop fin entraîne une augmentation exponentielle du temps de calcul, tandis qu'un maillage trop grossier compromet la précision des résultats. Il existe toujours une plage où la précision des résultats est acceptable.

	Eléments	Nœuds
Maillage 1	160653	150000
Maillage 2	205732	200000
Maillage 3	301468	300000

Tableau(2) : Paramètre de maillage.

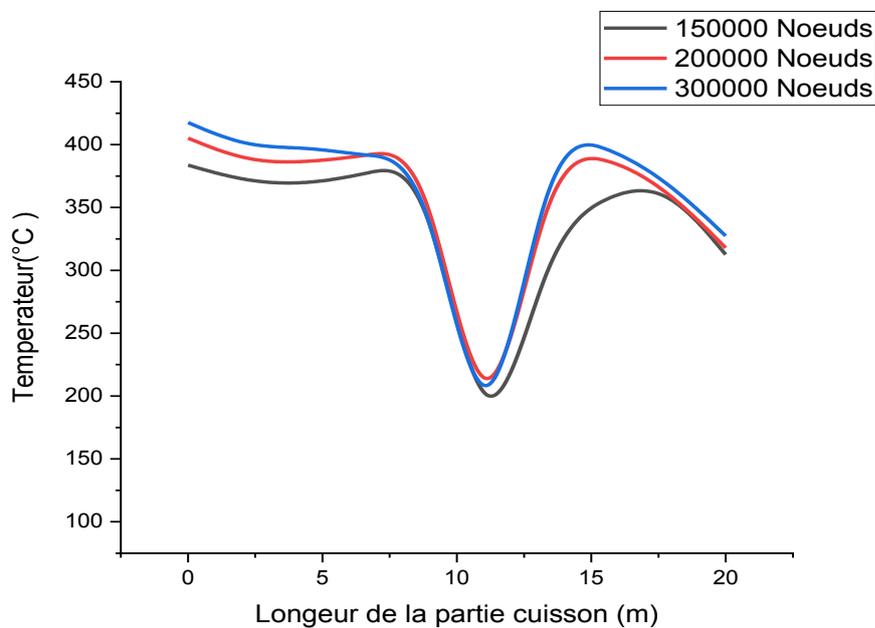


figure (35): Comparaison des différents maillages.

L'optimisation du maillage implique de choisir la grille qui converge le mieux, offrant de bons résultats tout en minimisant l'utilisation du temps CPU. Il est donc crucial d'optimiser correctement le maillage pour trouver un compromis satisfaisant entre cette étude et les ressources disponibles. Pour y parvenir, divers maillages ont été testés au cours de notre investigation (figures 35), classés en trois catégories selon le nombre de nœuds : 150000, 200000 et 300000 nœuds. Les résultats obtenus à partir de ces différents maillages montrent que la grille de 200 000 nœuds fournit les résultats les plus proches des conditions réelles observées en usine, comme cela sera détaillé dans le prochain chapitre.

Il est également important de noter que les résultats produits par les différentes grilles sont relativement proches les uns des autres. Par conséquent, il n'est pas

nécessaire d'utiliser des grilles plus denses que celle de 200 000 nœuds. Cette approche permet de simplifier le processus de calcul et d'accélérer les simulations, tout en réduisant l'utilisation de la mémoire.

Ainsi, en adoptant la grille de 200 000 nœuds, nous parvenons à un compromis optimal qui garantit la précision des résultats tout en optimisant les ressources informatiques. Cette optimisation est essentielle pour mener des simulations efficaces et réalistes dans des délais raisonnables.

III.3.4. Conditions aux limites :

La condition aux limites dans notre étude numérique selon les conditions réelles dans l'usine :

Caractéristique	Valeur
Vitesse d'injection d'air	20 m/s
Température d'air d'injection	20 C°
Température d'entrée de la partie cuisson	1350 C°
Température de sortie du de la partie cuisson	1450 C°
Vitesse de rotation du four	4 tr /min

Tableau(3) : Les conditions aux limites de la partie cuisson du four.

VI. Conclusion :

Ce chapitre a été dédié à la présentation des outils numériques utilisés pour résoudre notre problème, notamment ANSYS Fluent Workbench et CFX d'ANSYS. Nous avons abordé diverses méthodes de discrétisation numérique, telles que la méthode des volumes finis, et les étapes de la simulation. Une géométrie de la virole du four rotatif a été créée, suivie de l'application d'un maillage quadratique, optimisé pour garantir un choix précis du maillage et des résultats fiables et rapides. Les résultats obtenus et leur interprétation seront détaillés dans le prochain chapitre.

Chapitre VI : Résultats Et Discussion

I. Introduction :

La phase la plus cruciale de cette étude est la mise en lumière de notre simulation et l'interprétation des résultats obtenus. Dans un premier temps, il est essentiel de procéder à une validation. Ensuite, nous analyserons l'influence de divers paramètres de notre système, tels que la variation de la vitesse d'injection d'air, la température intérieure du four, la variation de vitesse de rotation de four. Pour ce travail, nous avons utilisé le logiciel de simulation ANSYS CFX.

II. Résultats et discussion :

Les résultats de la simulation numérique effectuée avec le logiciel ANSYS CFX sont présentés ci-après. Nous analysons la variation de la température intérieure du four, la variation de la température de la virole, ainsi que l'impact de la modification de la vitesse d'injection d'air.

Pour commencer, une validation est nécessaire afin de donner de la crédibilité à ce travail. La figure (36) compare les valeurs de température obtenues dans notre étude avec celles mesurées à l'usine BENI SAF, spécifiquement sur la virole (partie cuisson). Les deux courbes présentent des similitudes notables. Au début, la température diminue jusqu'à 148 °C à l'usine et 220 °C dans notre étude. Ensuite, elle augmente jusqu'à atteindre 304 °C à l'usine et 385 °C dans notre étude. Finalement, la température extérieure de la virole atteint 375 °C à l'usine, tandis qu'elle diminue jusqu'à 325 °C dans notre étude. Il est important de noter qu'il existe des différences entre les résultats de notre simulation et les mesures réelles de l'usine. La température extérieure maximale de la virole atteint 405 °C dans notre étude, contre 411 °C à l'usine, suivie d'une diminution de température dans les deux graphes. L'erreur maximale varie entre 10 % et 15 %, ce qui peut être attribué à plusieurs facteurs. Notre étude repose sur une simulation numérique théorique, tandis que les données de l'usine reflètent un phénomène réel. De plus, l'épaisseur du croûtage prise en compte dans notre simulation est une estimation précise, et l'état des briques réfractaires du four (neuves ou usées) peut également influencer les résultats. Ces différences soulignent l'importance de divers facteurs affectant le fonctionnement du four et la simulation elle-même.

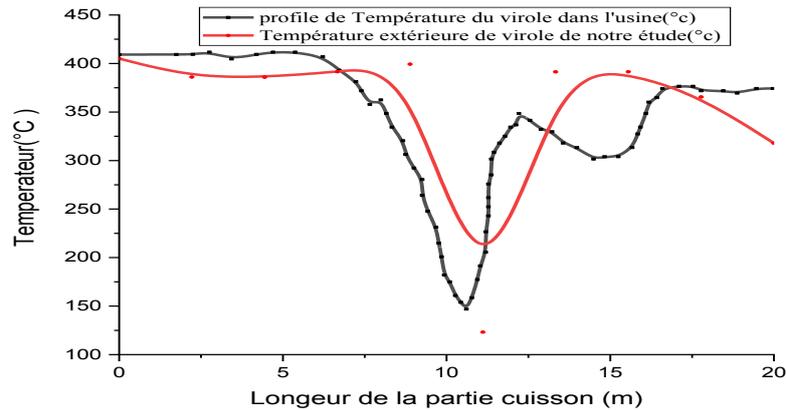


figure (36) : la validation des températures de la virole de notre étude par rapport celle du l'usine.

III. Etude de cas :

Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal est de déterminer l'effet de vitesse d'air de refroidissement sur la température de la virole d'un four rotatif, en prenant comme référence un cas réel observé dans une usine. Afin de garantir une simulation précise et réaliste, nous avons conservé un modèle de four rotatif assez semblable du cas réel dans l'usine.

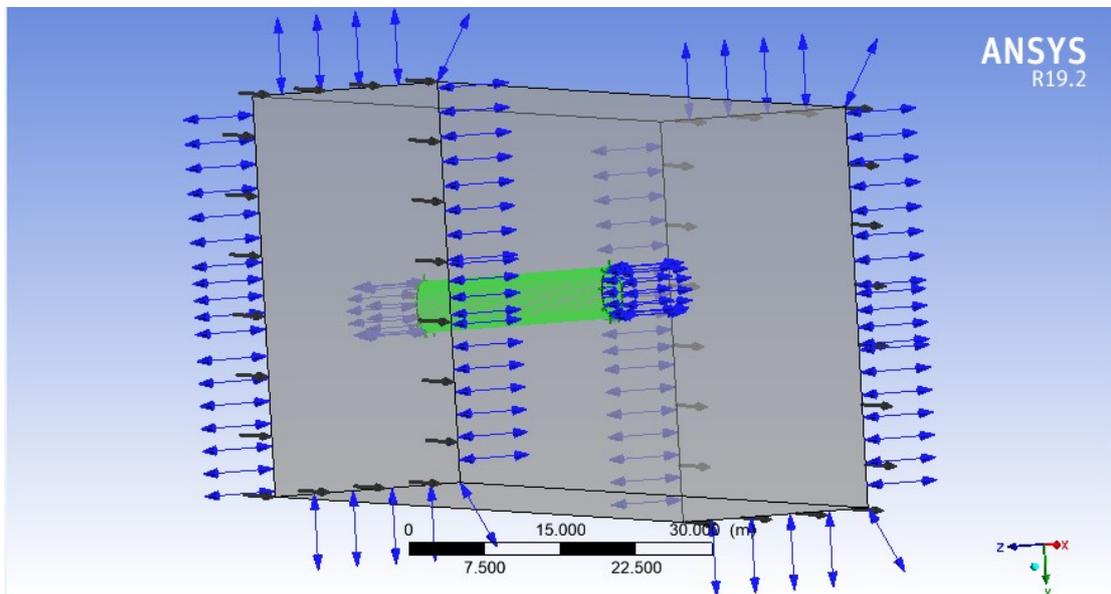


figure (37) : Configuration de four rotatif dans CFX-Pre.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse thermique de la virole, telle que représentée dans la figure (37). Pour assurer la fidélité de la simulation, les mêmes conditions aux limites que celles du modèle réel ont été appliquées. Cela permet de déduire avec précision l'impact de l'air injecté sur la température extérieure de la virole.

Les résultats de cette étude fournissent des indications précieuses sur la manière dont le refroidissement par air affecte les performances thermiques de la virole. En comparant les données de simulation avec les mesures réelles, nous pouvons identifier les variations de température et ajuster les paramètres du processus pour optimiser le fonctionnement du four. Cette approche permet de mieux comprendre les interactions thermiques et d'améliorer l'efficacité énergétique du système, tout en garantissant la qualité du produit final.

III.1. Contour de température (section du four) :

La figure (38) présente une analyse détaillée de la distribution de la température à l'intérieur d'un four rotatif, en se concentrant spécifiquement sur les différentes couches structurales telles que la brique réfractaire et la virole. Cette illustration est essentielle pour visualiser la manière dont la chaleur se propage et se répartit au sein du four, fournissant ainsi des informations cruciales sur les conditions thermiques auxquelles ces matériaux sont soumis. En examinant les données de plus près, on constate que la température au niveau de la paroi de brique réfractaire varie entre 700 °C et 880 °C. Cette plage de températures révèle l'intensité considérable de la chaleur que les briques réfractaires doivent supporter. Une telle information est vitale pour évaluer la performance et la durabilité de ces briques, car elles doivent résister à des conditions thermiques extrêmes tout en maintenant leur intégrité structurelle et leur capacité isolante. En outre, la température enregistrée sur la paroi de la virole, qui est la structure métallique extérieure du four, atteint environ 405°C. Cette température est un paramètre crucial pour évaluer l'impact de la chaleur sur la virole métallique. La virole joue un rôle essentiel en tant que support structurel du four, et sa capacité à résister à des températures élevées sans compromettre sa stabilité mécanique est un facteur déterminant pour la sécurité et l'efficacité du four rotatif.

En résumé, la distribution de la température à l'intérieur du four rotatif, telle qu'illustrée dans la figure (38), offre une perspective approfondie sur les défis thermiques auxquels sont confrontés les matériaux constituant le four. La compréhension de ces variations de température est indispensable pour améliorer la conception, la performance et la longévité du four, en garantissant que chaque composant peut supporter les conditions de fonctionnement rigoureuses.

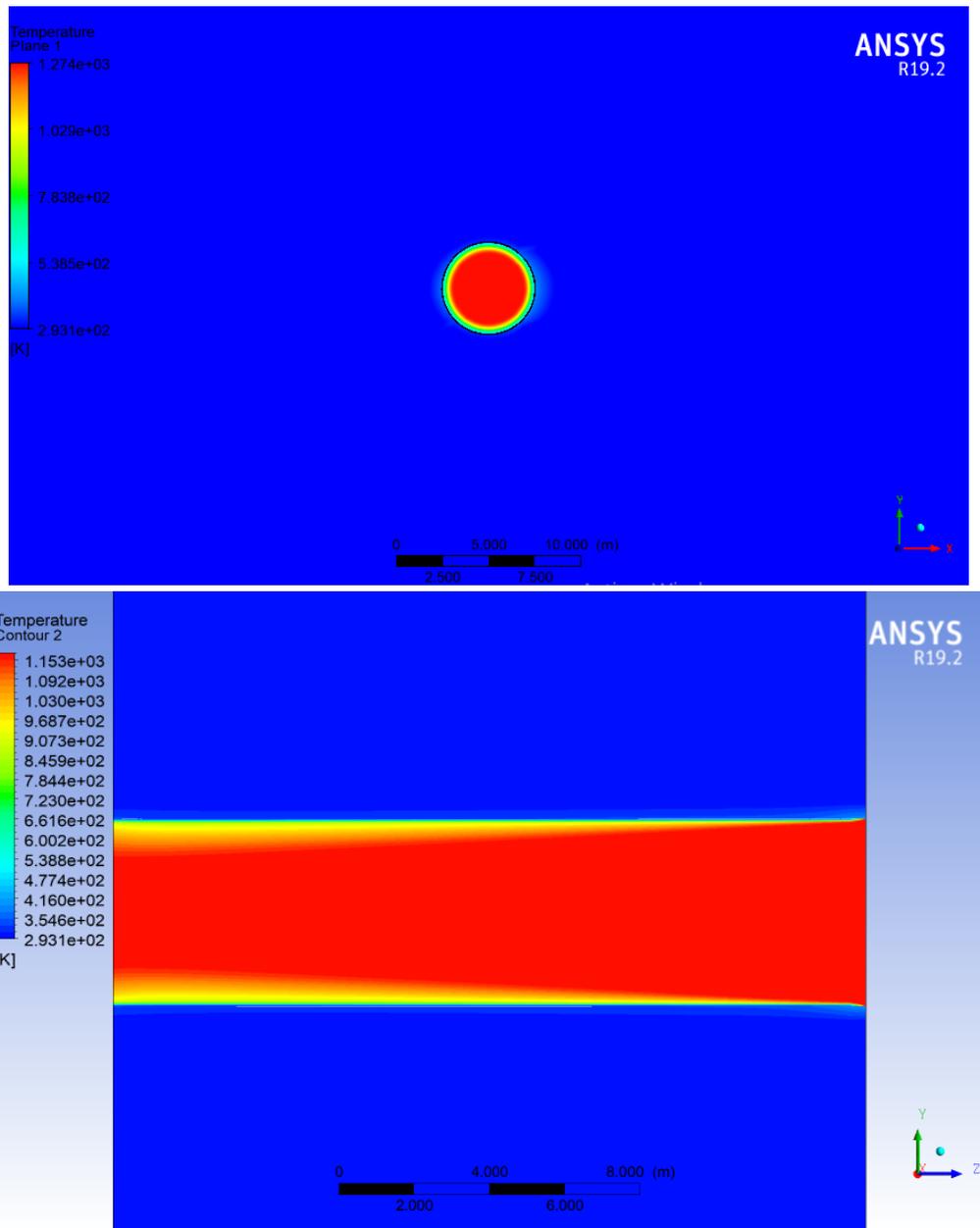


figure (38) : les contours des températures dans la section du four rotatif.

III.2. Contour des lignes de vitesse :

La figure (39) illustre la distribution des lignes de vitesse dans un four rotatif, mettant en évidence les interactions complexes entre les particules d'air injecté et les parois du four. L'observation principale montre que lorsque les particules d'air en injection entrent en contact avec la virole, il en résulte une diminution notable de la température. Les vitesses maximales atteignent $1.027 \cdot 10^2$ (m/s) à l'entrée de l'air, tandis que les vitesses minimales sont de $4.597 \cdot 10^{-1}$ (m/s) derrière la virole. Cette interaction thermique est cruciale pour comprendre les dynamiques internes du four et les effets de refroidissement induits par l'air injecté. En analysant plus en détail les points de séparation situés derrière la virole, on remarque que le contact

des particules d'air avec la paroi du four rotatif engendre la formation de vortex. Ces vortex apparaissent en raison de l'écoulement turbulent qui se produit lorsque l'air se sépare de la paroi de la virole. Ce phénomène de séparation crée des tourbillons qui perturbent l'écoulement laminaire, augmentant ainsi la turbulence et influençant les profils de vitesse et de température au sein du four.

Ces observations sur la distribution des lignes de vitesse et les interactions thermiques et dynamiques entre l'air injecté et les parois du four sont essentielles pour optimiser la conception et le fonctionnement du four rotatif. La compréhension des mécanismes de diminution de la température et de formation de vortex permet de mieux anticiper les zones de turbulence et de chaleur excessive, ce qui peut conduire à des améliorations dans le contrôle des processus thermiques et à une augmentation de l'efficacité globale du système.

En conclusion, la figure (39) offre une représentation détaillée des phénomènes aérodynamiques et thermiques au sein du four rotatif, soulignant l'importance des interactions entre l'air injecté et les parois du four. Cette analyse est fondamentale pour le développement de stratégies de gestion thermique plus efficaces, visant à améliorer la performance et la durabilité des fours rotatifs dans divers processus industriels.

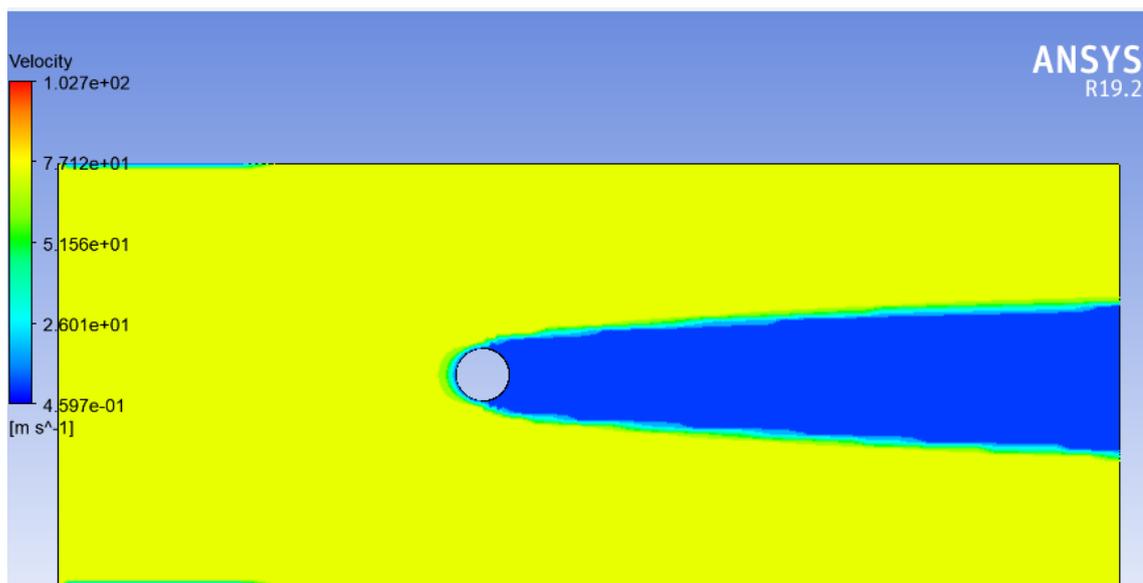


figure (39) : Contour des lignes de vitesse de four rotatif.

III.3. Contour de pression :

La figure (40) illustre la répartition de la pression d'un four rotatif, en se concentrant sur les différentes composantes telles que la brique réfractaire et la virole. Cette analyse permet de comprendre comment la pression varie autour des parois du four.

Il est observé que la pression atteint son maximum au point de stagnation, où elle s'élève à 66,16 Pa. À ce point précis, la pression est non seulement supérieure à la pression atmosphérique mais également à celle mesurée à l'intérieur du four. Cela

indique une accumulation significative de pression due à l'interaction dynamique des gaz à cet emplacement particulier.

À mesure que l'on s'éloigne du point de stagnation, la pression diminue progressivement. Aux points situés en haut et en bas du four, la pression devient presque nulle, signalant une zone de faible interaction dynamique. Par la suite, la pression augmente légèrement et tend à revenir à des niveaux équivalents à la pression atmosphérique.

Cette distribution de la pression est cruciale pour comprendre les contraintes mécaniques exercées sur les différentes parties du four rotatif. Les variations de pression peuvent affecter la performance des matériaux réfractaires et de la structure métallique, influençant ainsi la durabilité et l'efficacité du four.

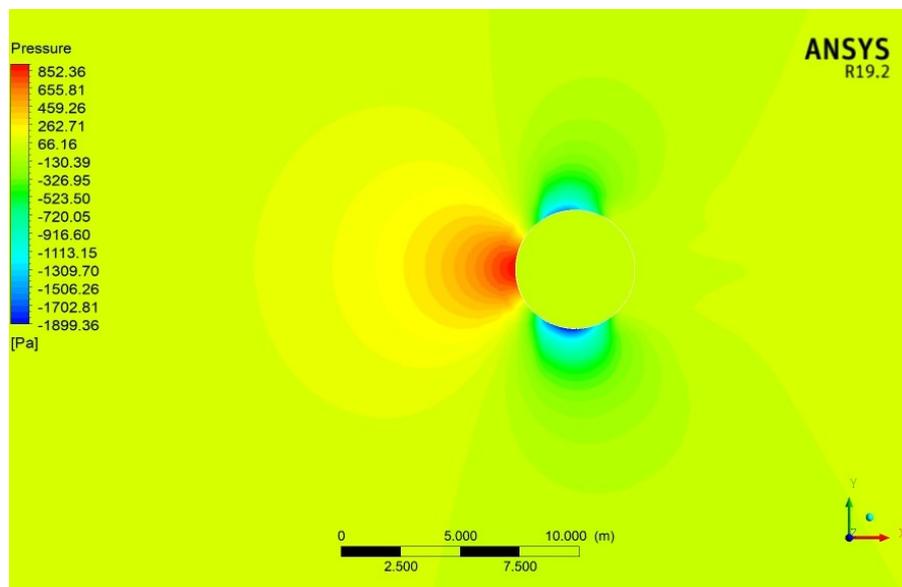


figure (40) : Contour de pression de four rotatif.

III.4. Variation de la vitesse d'injection d'air :

L'objectif de cette variation est de déterminer l'effet de la vitesse de l'air injecté par les ventilateurs sur le comportement thermique de la virole d'un four rotatif. Pour ce faire, quatre essais ont été réalisés, avec des vitesses d'air variant de 20 m/s à 80 m/s. Le but est de mesurer la température maximale atteinte par la virole en fonction de ces différentes vitesses d'injection d'air.

Le tableau (4) présente les résultats obtenus, illustrant l'évolution de la température extérieure de la virole en fonction de la vitesse de l'air injecté. Il est évident que la température diminue progressivement à mesure que la vitesse d'injection augmente.

Vitesse d'air d'injection (m/s)	20	30	40	80
Température extérieure de la virole (°C)	405	359	332	270

Tableau (4) : Température extérieure de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air.

Ces données montrent clairement que la température extérieure de la virole diminue de manière significative avec l'augmentation de la vitesse d'injection d'air. En particulier, on observe une réduction de 135 °C lorsque la vitesse de l'air passe de 20 m/s à 80 m/s.

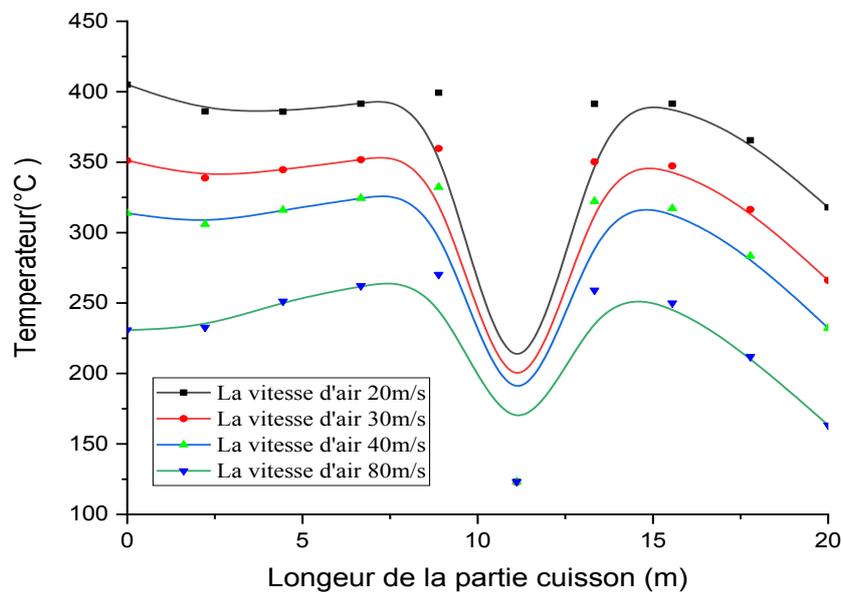


figure (41) : Evolution de la température extérieure de la virole en fonction de la vitesse d'air injecté.

La figure (41) illustre cette variation, montrant l'évolution de la température extérieure de la virole en fonction des différentes vitesses d'injection d'air. Les profils de température suivent une tendance similaire et une forme cohérente à travers les différents essais, ce qui démontre que l'augmentation de la vitesse de l'air injecté entraîne systématiquement une diminution de la température de la virole.

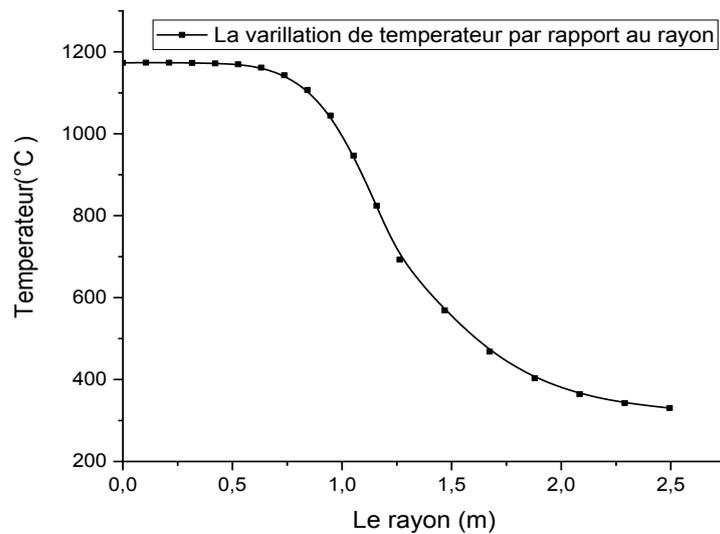


figure (42) : Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de la vitesse d'air injecté.

En parallèle, la figure (42) montre la variation de la température des couches intérieures du four en fonction de vitesse d'injection d'air. Les courbes de température des couches intérieures semblent s'emboîter, indiquant que les variations de la vitesse de l'air injecté n'affectent pas significativement la température des couches intérieures du four.

En résumé, cette étude révèle que l'augmentation de la vitesse de l'air injecté par les ventilateurs à un effet refroidissant notable sur la virole, réduisant ainsi sa température maximale. Cependant, ce changement de vitesse d'injection n'a pas d'impact significatif sur la température des couches intérieures du four. Ces observations sont cruciales pour optimiser le refroidissement de la virole et améliorer la performance thermique globale du four rotatif, tout en garantissant une gestion efficace de la chaleur pour prolonger la durée de vie des composants du four.

III.5. Variation de température intérieure du four :

Dans cette section, nous avons étudié l'effet de la variation de la température intérieure du four sur différentes mesures de température.

Température intérieure du four (C°)	1100	1200	1300	1400
Température extérieur de la virole (°C)	317	361	411	448

Tableau(5): Température extérieur de la virole en fonction de Température intérieur du four.

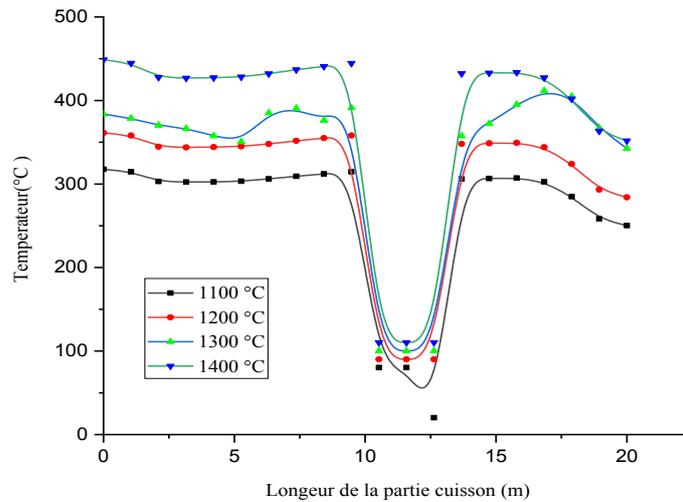


figure (43): Température extérieure de la virole en fonction de température intérieure du four.

La Figure (43) illustre la variation de la température extérieure maximale de la virole en fonction de la température de l'air chaud du brûleur. On peut observer que la température de la virole augmente de manière significative lorsque la température intérieure du four passe de 1100 °C à 1400 °C. En effet, cette augmentation est de 131 °C sur cet intervalle, indiquant une relation proportionnelle entre la température interne du four et la température extérieure de la virole.

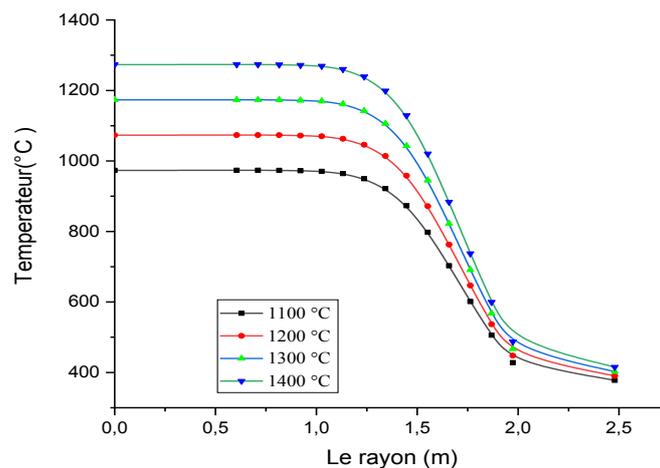


figure (44): Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de température intérieure du four.

La Figure (44) présente la variation de la température des couches intérieures du four en fonction de la température intérieure du four. Une tendance similaire à celle observée pour la virole est visible ici, la température des couches intérieures augmente avec la température interne du four. Plus précisément, il y a une augmentation de 288 °C lorsque la température intérieure du four passe de 1100 °C à 1400 °C.

Cette étude met en évidence l'importance de la régulation de la température intérieure du four, non seulement pour le contrôle de la température extérieure de la virole mais aussi pour la gestion thermique des couches intérieures du four. Une augmentation de la température interne a des répercussions directes et significatives sur l'ensemble des composantes du four, soulignant ainsi la nécessité d'un contrôle précis et efficace de la température pour optimiser les performances et la sécurité du four.

III.6. Variation de vitesse de rotation du four :

Dans cette section, nous avons étudié l'effet de la variation de la vitesse de rotation du four, allant de 2 tours/min jusqu'à 6 tours/min, sur la température extérieure de la virole ainsi que sur les couches intérieures du four.

Vitesse du rotation du four (tour/min)	2	3	4	5	6
Température extérieur de la virole (°C)	355	375	405	455	505

Tableau(6): Température extérieure de virole en fonction de la vitesse de rotation du four.

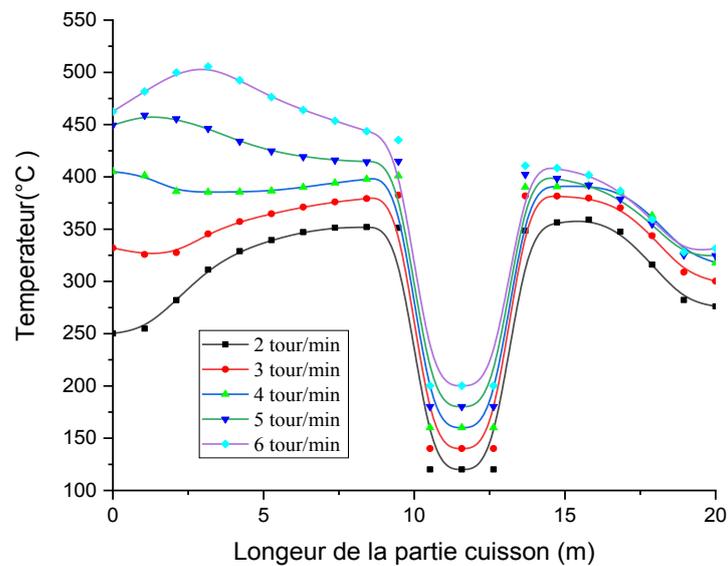


figure (45) : Température extérieure de la virole en fonction de vitesse de rotation du four.

La Figure (45) illustre la variation de la température extérieure maximale de la virole en fonction de la vitesse de rotation du four. Il est observé que la température augmente de manière significative avec l'augmentation de la vitesse de rotation. En effet, on remarque une augmentation de 150°C de la température de la virole lorsque la vitesse de rotation passe de 2 tours/min à 6 tours/min. Cette augmentation indique une corrélation directe entre la vitesse de rotation et l'élévation de la température extérieure, probablement due à une plus grande friction et à un transfert de chaleur plus intense à des vitesses de rotation plus élevées, outre le manque d'efficacité du refroidissement lorsque la vitesse de rotation augmente.

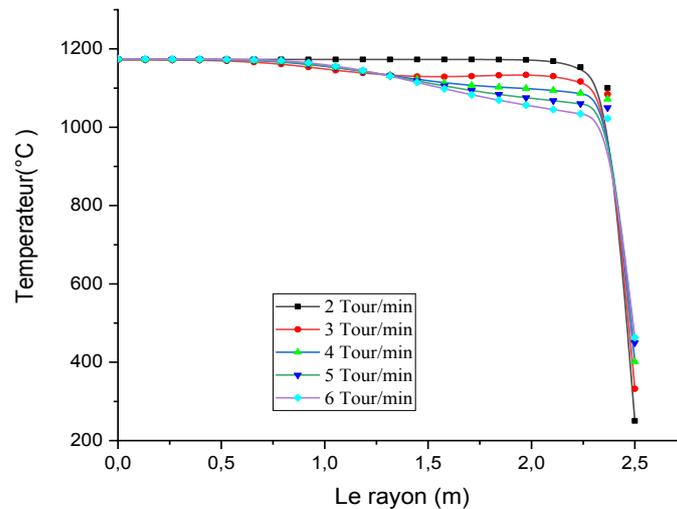


figure (46): Evolution de la température des couches intérieure du four en fonction de vitesse de rotation du four.

La Figure (46) présente la variation de la température des différentes couches intérieures du four en fonction de la vitesse de rotation du four. Les données indiquent que la variation de la vitesse de rotation a un impact notable sur la température, en particulier sur la couche de brique réfractaire.

On observe que la température de cette couche diminue de 123 °C lorsque la vitesse de rotation passe de 2 tours/min à 6 tours/min. Cette diminution significative met en évidence l'influence de la vitesse de rotation sur le comportement thermique interne du four, probablement en raison d'une meilleure distribution de la chaleur et d'une réduction des points chauds à des vitesses plus élevées.

En conclusion, la variation de la vitesse de rotation du four influence de manière significative non seulement la température extérieure de la virole, mais aussi la température des couches intérieures du four, particulièrement celle de la brique réfractaire. Cette augmentation de la température extérieure et la diminution de la température intérieure doivent être prises en compte pour optimiser les conditions de fonctionnement du four et assurer la durabilité des matériaux réfractaires utilisés.

IV. Conclusion :

L'augmentation de la vitesse d'injection d'air provoque une diminution de la température de la virole de 135 °C, mais cela n'a aucun effet significatif sur les couches intérieures du four. Ainsi, la température intérieure du four ne subit qu'une réduction marginale de 131 °C par rapport à la température de la virole et de 288 °C pour les couches intérieures. De plus, la vitesse de rotation du four influence considérablement la température de la virole et de la couche de brique réfractaire.

En particulier, la température de la virole augmente de 150 °C lorsque la vitesse de rotation passe de 2 tours/min à 6 tours/min.

Ces observations montrent que l'augmentation de la vitesse d'injection d'air a un effet refroidissant notable sur la virole sans affecter significativement les températures internes du four. D'un autre côté, la variation de la vitesse de rotation du four influence de manière opposée la température extérieure de la virole et celle des couches intérieures. Ces résultats sont essentiels pour optimiser le refroidissement de la virole et améliorer la performance thermique globale du four rotatif, tout en assurant une gestion efficace de la chaleur pour prolonger la durée de vie des composants du four.

Conclusion générale :

Cette étude a consisté en une modélisation et une simulation utilisant ANSYS (FLUENT) et CFX. Les géométries, conditions aux limites et conditions d'exploitation utilisées sont celles du modèle réel existant dans l'usine de cimenterie. Cela a permis de valider les résultats numériques. La validation s'est effectuée dans le cadre d'un stage pratique au sein de l'usine BENI SAF, du groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA). Les relevés de températures ont été effectués dans la salle de contrôle et de surveillance. Les écarts constatés sont dus aux différences entre le modèle numérique et le phénomène réel. Dans le quatrième chapitre, une nouvelle simulation a été réalisée en faisant varier plusieurs paramètres. Premièrement, en réduisant la vitesse d'injection d'air, on a observé une diminution de 135°C de la température extérieure de la virole, tandis que la température des couches internes du four n'a pas varié. Deuxièmement, en abaissant la température intérieure du four, la température extérieure de la virole a diminué de 131°C, et celle des couches internes du four a baissé de 288°C. Troisièmement, en augmentant la vitesse de rotation du four, la température de la virole a augmenté de 150°C, tandis que la température des couches internes a diminué de 123°C.

Annexe

References:

- [1]: Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [2]: <https://dspace.univbba.dz/bitstream/handle/123456789/802/memoire%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [3] : <https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/3067/1/M%C3%A9moire%20master2%20.pdf>
- [4] : <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/ciment.pdf>
- [5] : https://www.academia.edu/3678512/Cimenterie_fluent
- [6] : Safir m & Nemla a, Simulation numérique du refroidissement de la Virole d’un four rotatif à travers un jet d’eau, mémoire de mester, Université d’Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.2021.
- [7]: file:///C:/Users/Snow/Downloads/Music/avp%20anaba%20%20medicine_files/Beloufa_abberrahmane_taoui_oussama.pdf
- [8]: <https://dspace-api.univ-batna2.dz/server/api/core/bitstreams/81fd9720-b83f-4ef9-9a1b-366fd550daff/content>
- [9] : Thermal protection insulation in the lining of the rotary kilns, Modern engineering and innovative technologies Issue 16 / Part 1, <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-033>, DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-033
- [10]: « Impact of coating layers in rotary cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum », Thermal Science and Engineering Progress (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100429>
- [11]: « CFD Analysis of Temperature Drying Chamber at Rotary Dryer With Combined Energy », IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1155 (2019) 012037, doi:10.1088/1742-6596/1155/1/012037
- [12]: « Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns: experimental determination and modeling », Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier, 2018, 91, pp.197-213. 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024.
- [13]: Optimization design based on the thermal resistance analyses of heat recovery systems for rotary kilns, Applied Thermal Engineering Volume 112, 5 February 2017, Pages 1260-1270
- [14]: Characterization of high-alumina refractory bricks and modeling of hot rotary kiln behavior”, Engineering Failure Analysis 79 (2017) 852–864
- [15]: Optimization design of heat recovery systems on rotary kilns using genetic algorithms, Applied Energy 202 (2017) 153–168
- [16]: Design requirements and performance optimization of waste heat recovery systems for rotary kilns”, International Journal of Heat and Mass Transfer 93 (2016) 1–8

- [17]: Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler, *Energy Conversion and Management* 114 (2016) 110–121
- [18]: “Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered ORC (organic Rankine cycle),” *Applied Thermal Engineering* (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.053>
- [19]: Numerical Modelling of a Rotary Cement Kiln with External Shell Cooling Fans, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree in Master of Engineering Science, Graduate Program in Mechanical and Materials Engineering, The University of Western Ontario, 2016
- [20]: Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln, *Powder Technology* 287 (2016) 239–247
- [21]: Modeling of Rotary Kiln in Cement Industry, *Energy and Power Engineering*, 2016, 8, 23-33
- [22]: Analysis of temperature profile and % metallization in rotary kiln of sponge iron process through CFD, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 0 0 0 (2016) 1–9
- [23]: “Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2017) 263–279
- [24]: Numerical Modelling of a Rotary Cement Kiln with External Shell Cooling Fans, Graduate Program in Mechanical and Materials Engineering, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree in Master of Engineering Science, The University of Western Ontario, April 2016
- [25]: Forced convective heat transfer on a horizontal circular cylinder due to multiple impinging circular jets, *Applied Thermal Engineering*, 2016
- [26]: Numerical modeling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 102 (2016) 610–621
- [27]: “Modeling of Rotary Kiln in Cement Industry”, *Energy and Power Engineering*, 2016, 8, 23-33, <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2016.81003>
- [28]: Optimization of process conditions in a tubular rotary kiln with applying TG/DSC technique and mathematical modeling
J Therm Anal Calorim (2015) 122:1029–1040, DOI 10.1007/s10973-015-4755-1
- [29]: Modèle d’échange d’énergie et de matière dans un four rotatif, incluant la combustion, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 18 N°1 (2015) 143 – 152
- [30]: Kiln shell cooling by water evaporation, controlled by infrared temperature measurement, cement international, processing performance application, Issue No.: 2/2015, pp. 62 – 69

- [31]: Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry”, Applied Thermal Engineering 66 (2014) 435-444
- [32]: “CFD Modeling of Meat and Bone Meal Combustion in a Rotary Cement Kiln”, International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 4, No. 4, August 2014
- [33]: Mathematic simulation of heat transfer and operating optimization in alumina rotary kiln, J. Cent. South Univ. (2013) 20: 2775–2780, DOI: 10.1007/s1177101317960
- [34]:https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2673/1/HAIMOUD.Noussiba-Noura_LAID.Sarra.pdf
- [35]: Safir m & Nemla a, Simulation numérique du refroidissement de la Virole d’un four rotatif à travers un jet d’eau,mémoire de mester, Université d’Oran 2Mohamed Ben Ahmed.2021.
- [37]: M.Gradeck(a), A.Kouachi(a), J.L.Borean(b), P.Gardin(b), M.Lebouché(a) , «Heat transfer from a hot moving cylinder impinged by a planar sub cooled water jet»
a / LEMTA, Nancy University – CNRS, 2 avenue de la forêt de haye 54504, Vandoeuvre lès Nancy, France
b / AM Research, voie romaine 57283, Maizières lès Metz, France
- [38]: W.M.Abed, A.J.Shareef, A.A.Najeeb, «Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Concentric Annulus between Outer Cylinder and Inner Flat Tube», (Anbar Journal for Engineering Sciences), University of Anbar /Engineering College - Mechanical Engineering Dept. Received on 11/5/2010 Accepted on: 8/12/2010
- [39]: S.Deliang, W.L.Vargas, J.J. McCarthy, «Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases», Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15261, USA.
- [36]:] H.Liu (a), H.Yin (a), Ming Zhang(b), M.Xie (a), Xi Xi (a), «Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln».
a/ School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
b/ Ansteel Engineering Technology Corporation Limited, Anshan 114021, China
- [37] :<file:///C:/Users/Snow/Downloads/SimulationNumeriqueAvecANSYSWorkbench.pdf>
- [38]:https://www.researchgate.net/publication/361403862_Introduction_a_la_CFD_Computational_Fluid_Dynamics
- [39]:file:///C:/Users/Snow/Downloads/Music/avp%20anaba%20%20medicine_files/22M%C3%A9thode%20des%20diff%C3%A9rences%20finies.pdf

[40]:file:///C:/Users/Snow/Downloads/Music/avp%20anaba%20%20medcine_files/m%
C3%A9moire%20de%20fin%20d%C3%A9tude%20master%20voulume%20fine.pdf

[41]:https://ds.univoran2.dz:8443/bitstream/123456789/2749/1/These%20%20%20ATT
OU%20Youcef.pdf

[42]: W.Kunyu, L.Jinbo, W.Peili, C.Lin, «Experimental and numerical studies on the
air-side flow and heat transfer characteristics of a novel heat exchanger», Applied
Thermal Engineering 123 (2017) 830–844.

[43]: M.Gradeck(a), A.Kouachi(a), J.L.Borean(b), P.Gardin(b), M.Lebouché(a) , «Heat
transfer from a hot moving cylinder impinged by a planar sub cooled water jet»

a / LEMTA, Nancy University – CNRS, 2 avenue de la forêt de haye 54504,
Vandoeuvre lès Nancy, France