



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

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Électromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Electromécanique**

**Spécialité : Electromécanique Industriel**

### Thème

# Simulation numérique de refroidissement d'une virole d'un four rotatif

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom: BOUCHENTOUF      Prénom: Ikram-Mimouna

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUHAMRI Nouredine	MCB	Université d'Oran 2	Président
BOUHAFS Mohamed	MCB	Université d'Oran 2	Encadreur
ADJLOUAA Abd el-aziz	MAA	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2019/2020

# *Remerciement*

Cinq belles années viennent de se terminer, c'est un soulagement et à la fois un manque ... En tout cas, elles auront été très enrichissantes au niveau professionnel mais aussi au niveau personnel.

Dans un premier temps, je souhaite remercier chaleureusement mon encadrant, Mr Mohamed Bouhafs de m'avoir accompagné et encouragé avec beaucoup de patience au quotidien dans mon travail. Il m'est difficile d'exprimer tout ce que je lui dois en quelques mots. Ce travail n'aurait certainement pas abouti sans son soutien pédagogique et ses conseils précieux.

Je souhaite remercier mon jury de mémoire pour avoir accepté de poser un regard critique sur mon travail, en commençant par Mr ADJELOUA Aziz qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de mémoire, merci à Mr BOUHAMRI pour leur travail de rapporteur, pour le temps qu'ils y ont consacré.

Je tiens également à remercier tous les professeurs de l'IGCMO de m'avoir aidé à réaliser ce travail, ainsi que les ingénieurs de Lafarge oggaz sig-mascara pour l'excellent accueil ainsi que leur soutien au niveau pratique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma famille. Pour commencer, je remercie mes parents, mon frère et ma sœur. Je tiens à remercier très sincèrement mes tentes pour leur soutien moral. Merci à toutes et à tous pour votre appui et pour votre aide dans la réalisation de mes rêves et de mes aspirations professionnelles.

Merci à mes chers amis pour ces années passées à vos côtés.

*Merci à vous...*

Dédicace

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A ma très chère **Mère**, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. a la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable **Mère**.

A mon très cher **Père**, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A Ma sœur **Kawther** et son fils **Safwan**.

A mon frère **Mohamed**.

A mon oncle **Houari** et son soutien durant toute ma vie.

A l'ingénieur **Djeffal Houari** de sonatrach et ses aides.

A Mr **Khatcha Benouda** et Mr **Kéfif Hbib** et tous les ingénieurs de **Lafarge**.

A **Saliha** qui m'a soutenue dans toute la période de cinq ans.

A mes amis **Khaoula, Imène, Amina** et **Djalil** pour leurs efforts.

A tous mes amis de promo.

A tous mes amis de l'institut.

***Ikram BIM***

## **Résumé :**

*Cette étude a pour objet la modélisation et la simulation numérique du refroidissement d'une virole d'un four rotatif dans ANSYS Workbench. Le 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. Une solution pour améliorer le refroidissement de la virole et alors proposé. En effet l'ajout des ailettes à la virole a permis une diminution considérable de la température de 98°C. Aussi on a proposé de mettre place un système de refroidissement de la virole par régulation avec l'eau.*

## **Abstract :**

*The purpose of this study is the modelling and the numerical simulation of the cooling of a shell of a rotary kiln in ASYS Workbench. The model exists in real life in the factory: the geometry and the boundary conditions as well as the operating conditions were used to validate the numerical calculations. The results of the numerical simulation are in good agreement with those measured in the factory. A solution to improve the cooling of the shell and then proposed. Indeed, the addition of the fins to the ferrule allowed a considerable decrease in temperature of 98 ° C. It has also been proposed to set up a system for cooling the shell by regulation with water.*

## **ملخص :**

*النموذج ANSYS Workbench الغرض من هذه الدراسة هو النمذجة والمحاكاة العددية لتبريد غلاف الفرن الدوار في موجود في الحياة الواقعية في المصنع: تم استخدام الهندسة وشروط الحدود بالإضافة إلى ظروف التشغيل للتحقق من الحسابات الرقمية. تتوافق نتائج المحاكاة العددية مع تلك التي تم قياسها في المصنع. حل لتحسين تبريد القشرة ثم مقترح. في الواقع، أدت إضافة الزعانف إلى الطويق إلى انخفاض كبير في درجة الحرارة بمقدار 98 درجة مئوية، كما تم اقتراح إنشاء نظام لتبريد الغلاف عن طريق التنظيم بالمياه.*

# Sommaire

---

**Remerciments**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Sommaire**

**Listes de figures**

**Liste de tableaux**

**Nomenclature**

**Introduction générale**

**Chapitre I : Généralités sur les fours rotatifs :**

I.1 Introduction : .....	2
I.2 L’historique et l’évolution du four rotatif : .....	2
I.3 Le ciment : .....	2
I.3.1 Différents procédés de fabrication du ciment : .....	2
I.3.2 Processus de production de ciment : .....	3
I.4 Définition de four rotatif : .....	4
I.5 Four rotatif de cimenterie et son fonctionnement : .....	5
I.6 Les caractéristiques du four rotatif de cimenter : .....	6
I.6.1 Les éléments intérieure principaux dans les Fours Rotatifs de cimenter : ..	6
I.6.1.1 Briquetage dans le four rotatif de cimenterie : .....	6
I.6.1.2 Bruleur de four rotatif : .....	8
I.6.1.3 Croûtage : .....	10
I.6.2 Les éléments extérieurs principaux dans les Fours Rotatifs de cimenter : ..	10
I.6.2.2 Le galet : .....	11
I.6.2.3 Bandages : .....	12
I.6.2.4 La virole : .....	13

# Sommaire

---

I.7 Le Système d'Entraînement du four :.....	15
I.8 système de butée :.....	16
I.7 Conclusion :.....	16

## Chapitre II : transfert du chaleurs dans les fours rotatifs

II.1 Introduction :.....	17
II.2 Pertes de chaleur dans la virole :.....	17
II.3 Transfert de chaleur dans le four rotatif :.....	18
II.3.1 Transfert de chaleur par conduction dans le four :.....	18
II.3.2 Transfert de chaleur par convection :.....	18
II.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement :.....	18
II.4 Modèle mathématique.....	19
II.5 Bilan énergétique.....	19
II.6 Flux de chaleur :.....	21
II.7 Définition d'une ailette :.....	22
II.8 Recherche bibliographie :.....	24
II.9 Conclusion :.....	33

## Chapitre III : Méthode numérique

III.1 Introduction :.....	35
III.2 Méthode des différences finies :.....	35
III.3 Méthode des éléments finis :.....	35
III.4 La méthode des volumes fini.....	36
III.4.1 principe de la méthode des volumes finis.....	36
III.4.2 Équations gouvernantes :.....	36
•Conservation de quantité de mouvement.....	37
•Équation de conservation d'énergie.....	37
•Principales méthodes d'approches pour la turbulence [57] :.....	37
•Simulation numérique directe (DNS).....	37
•simulation des grandes échelles (LES).....	38
•Équations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, R.A.N.S).....	38
•Choix du modèle de turbulence.....	38

# Sommaire

---

•Le modèle $k - \varepsilon$ .....	38
•Modèle $k - \varepsilon$ standard .....	39
•Le modèle $k-\omega$ standard .....	39
III.5 Description du problème :.....	39
III.5.3 Modélisation dans ANSYS :.....	41
III.6 Conclusion :.....	45

## Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction : .....	46
IV.2 Résultats et discussion :.....	46
IV.3. La validation :.....	46
IV.4 Description de résultats : .....	46
IV.4.1 Contour de température (section du four) :.....	47
IV.4.2 Contour des lignes de courant : .....	47
IV.4.3 Contour de pression :.....	48
IV.4.4 Variation des paramètre (vitesse et température) dans une virole lisse.....	49
IV.5 Virole muni d'ailettes : .....	51
IV.6 Distribution de température : .....	52
IV.6.1 Distribution des lignes de courant .....	53
IV.6.4 Variation de température intérieur du four : .....	55
IV.6.5 Variation de température intérieur du four : .....	56
IV.7.1 La température de la virole avec les ailettes :.....	56
IV.8 Conclusion :.....	57

## Conclusion générale

Figure (I.1): le premier four était utilisé pour grillage du sulfure .....	2
Figure(I.2): Procédé de fabrication du ciment.....	3
Figure (I.3) : Four rotatif.....	4
Figure (I.4) : Four rotatif de cimenterie.....	5
Figure (I.5) : Les éléments intérieure dans les fours rotatifs de cimenter.....	6
Figure (I.6) : briquetage dans le four rotatif de cimenterie.....	6
Figure (I.7) : Les zones de briquetage de four rotatif de cimenterie.....	7
Figure(I.8): La flamme bruleur de four rotatif.....	8
Figure (I.9) : Bruleur de four rotatif.....	9
Figure(I.10) : différentes zones du four rotatif.....	10
Figure(I.11) : Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie.....	10
Figure (I.12) : Station des galets.....	11
Figure (I.13) : Le bandage.....	12
Figure (I.14) : montage d'une virole d'un four rotatif.....	13
Figure (I.15) : Épaisseurs de viroles.....	13
Figure (I.16): Virole, bandage, galet de butée et galet.....	14
Figure (I.17) : système d'entraînement du four.....	15
Figure (I.18) : Galet pousseur (la buté).....	16
Figure (II.1) : Caméra pyrométrique.....	17
Figure (II.2) : principaux phénomènes mise en jeu dans les fours tournants.....	18
Figure (II.3) : les quantités de chaleur intérieure du four.....	21
Figure (II.4) : Hypothèses simplificatrices d'ailette.....	22
Figure (III.1) : Discrétisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel.....	36
Figure (III.2) : FOUR ROTATIF d'usine (LA FARGE OGGAZ –sig-MASCAR).....	39
Figure (III.3) : profile de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d'usine (Lafarge).....	40
Figure (III.4) : définition du domaine étudié dans Workbench.....	42
Figure (III.5) : géométrie.....	42
Figure (III.6) : maillage quadratique.....	43
Figure (III.7) : Conditions aux limites du modèle dans ANSYS.....	44
Figure (III.8) : lancement de calcule.....	45
Figure (IV.2) : la validation des températures de la virole de notre étude par port celle du l'usine.....	46



Figure (IV.3) : Contour de température.....	47
Figure (IV.4) : Contour des lignes de courant.....	48
Figure (IV.5) : Contour de pression.....	49
Figure (IV.6) : Evolution de la température de la virole en fonction de la vitesse d'air chaud.....	50
Figure (IV.7) : Température de la virole en fonction de température intérieur du four .....	51
Figure (IV.8) : Température de la virole en fonction de la température d'air ambiant.....	52
Figure (IV.9) : four avec 72 ailettes.....	53
Figure (IV.10) : contour de température de virole avec les ailettes.....	53
Figure (IV.10): Contour des lignes de courant de la virole avec les ailettes.....	54
Figure (IV.11) : la température de la virole avec les ailettes en fonction de la vitesse d'air chaud.....	55
Figure (IV.12) : la variation de la température de virole avec les ailettes en fonction de température d'air ambiant.....	56
Figure (IV.13) : variation de température de la virole en fonction de la température d'air ambiant.....	57
Figure (IV.14) : La comparaison entre la température de la virole et la température de la virole avec les ailettes.....	58

Tableau III.1 : Les dimensions du four rotatif d'usine (Lafarge).....	40
Tableau III.2 : Paramètre de maillage. ....	43
Tableau III.3 : Les conditions aux limites de la partie cuisson du four.....	44
Tableau IV.1 : Température de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air.....	49
Tableau IV.2 : Température de la virole en fonction de Température intérieur du four.....	50
Tableau IV.3 : Température de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air chaud.....	55
Tableau IV.4 : la variation de la température de virole avec les ailettes en fonction température intérieure du four.....	56

## Nomenclature

---

T	Température	K
Q	quantité de chaleur	J
H	Enthalpie	J
A	Surface	m <sup>2</sup>
L	longueur	m
u, v, w	Vitesse	m.s <sup>-1</sup>
K	Conductivité thermique	W.Km <sup>-1</sup>
C <sub>p</sub>	Capacité thermique massique	J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>
F	Kg Fe2O3/Kg CaO	-
S	Kg SiO2/Kg CaO	-
h	coefficient de convection	W.m <sup>-2</sup> .k <sup>-1</sup>
r	rayon	m
r <sub>1</sub>	rayon intérieur du four 1.975	m
r <sub>2</sub>	rayon extérieur du four 2.175	m
D	diamètre	m
P	pression	Pa
p	angle sous-tendus par la surface du solide 3π/2	-
p	périmètre	m
t	temps	s
R	constante des gaz parfaits 8.314	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
C	Calcium oxide CaO	-
h <sub>o</sub>	fraction of radiation 0.0757	-
α	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
f	Coefficient de conduction	W.m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup>

## Nomenclature

---

### Symboles grecs

$\Phi$	Flux de chaleur	W
$\beta$	Coefficient de transfert de chaleur	W.K <sup>-1</sup>
$\tau$	Constante de temps	
$\theta$	Température adimensionnelle	-
$\sigma$		
$\varphi$	Densité de flux thermique	W.m <sup>-2</sup>
$\rho$	Masse volumique	Kg.m <sup>3</sup>

### 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	ailette
i	initiale
r	radiative
b	rupture

## Nomenclature

---

### Nombres adimensionnels

Re            Nombre de Reynolds

Gr            Grashof

Pr            nombre de Prandtl

### Opérateur mathématique

$\partial$             Dérivée partielle

$\Delta$             variation

# Introduction Générale

Le ciment en Algérie est devenu très demandé et utilisé ces dernières années, Le processus de fabrication du ciment comprend plusieurs les opérations suivantes :

Le calcaire (carbonate de calcium), est extrait par minage du front de taille, ajoutés dans le concasseur dans des proportions bien déterminées, donne après sortie du concasseur, homogénéisation et broyage, la farine, produit fin prêt pour la cuisson dans le four rotatif la matière sortant du refroidisseur, est transporté jusqu'au hangar au silo du stockage après d'ajoutant d'autre composants. Enfin le ciment obtenu est transporté vers les silos de stockage.

Le four rotatif est l'élément le plus important pour fabrication de ciment donc il ne peut y avoir aucun problème.

Dans le présent travail, nous étudions le refroidissement de la virole d'un four rotatif et le mécanisme de transfert de chaleur dans le four rotatif en considérant les phénomènes de transfert rencontrés à l'intérieur et à l'extérieure de four rotatif à savoir la conduction et la convection. Les calculs par simulation, deviennent un outil indispensable à l'étude des phénomènes physiques complexes, dont les transferts thermiques en font partie. La présente étude a été réalisée avec le solveur ANSYS (FLUENT)-Workbench validée avec des mesures réelles au niveau de l'entreprise (LAFARGE OGGAZ sig-mascara) pendant le stage pratique.

L'objectif est de contribuer à l'étude de l'amélioration du refroidissement de la virole du four. Alors, nous avons étudié le cas de la cimenterie de (LAFARGE OGGAZ), des solutions ont été donc proposées pour cette usine.

Le présent mémoire se structure comme suit:

Le premier chapitre porte sur des généralités des fours rotatifs de cimenterie. Le deuxième chapitre est consacré au transfert thermique dans le four rotatif. Dans le troisième chapitre la simulation numérique. On rassemble dans le chapitre quatre la validation de notre programme de calcul ainsi que les principaux résultats numériques de cette étude. Les commentaires, interprétations et analyses des divers résultats de cette étude sont également présentés.

Une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est dressée en fin du mémoire. Quelques recommandations et perspectives pour des études futures sont également présentées.

# CHAPITRE I :

## Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie



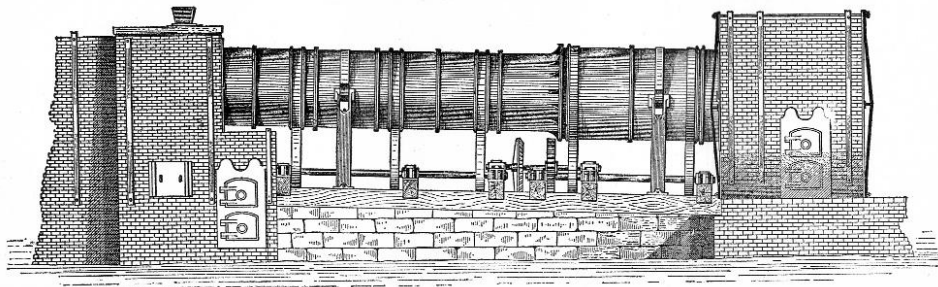
### I.1 Introduction :

Les fours rotatifs sont souvent considérés comme le cœur des usines de fabrication de ciment. Ils sont utilisés dans la production du clinker dans l'industrie de la cimenterie, la fabrication de la chaux, la fabrication des charbons.

### I.2 L'historique et l'évolution du four rotatif :

En 1847 jusqu'à 1931 Thomas A. Edison l'inventeur américain, fut un pionnier dans le développement du four rotatif grâce à la cimenterie Edison Portland Il travaillait dans New Jersey, où il présentait les premiers fours longs utilisés dans l'industrie 46 mètres de longueur.

1914 le recours au four rotatif pour diminuer la teneur en soufre par grillage partiel du sulfure de cuivre, Le four à réverbération a été réalisé en ÉTATS-UNIS, ce four avait un diamètre de 2 à 2,5 mètres et de 5 à 8 mètres de longueur, posé horizontalement. Il est indiqué dans la figure (I.1).



**Figure (I.1): le premier four était utilisé pour grillage du sulfure.**

Et c'est en 1953, qu'une nouvelle invention a vu le jour pour réduire la consommation thermique des fours. Il s'agit des fours HUMBILDT avec préchauffeurs à suspension gazeuse. Dans ce type de four, les gaz chauds provenant de l'aval du four transmettent leur chaleur à une farine qui descend dans une série de cyclone disposés l'un au dessus l'autre à l'amont du four appelé four à 04 étages. [18]

### I.3 Le ciment :

Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, c'est un liant hydraulique des agrégats (gravier) qui durcit avec le temps. Il en existe plusieurs types dont les plus répandus sont : ciment blanc, gris, alumineux « Prise mer » et spécial, il est fabriqué à partir du clinker. [7]

#### I.3.1 Différents procédés de fabrication du ciment : [2]

Il existe quatre procédés pour fabriquer le ciment :

- Fabrication par voie sèche,
- Fabrication par Semi-sèche,
- Fabrication par semi humide,
- Fabrication par humide.

### I.3.2 Processus de production de ciment :

La production de ciment, illustrée schématiquement à la figure, comprend trois étapes fondamentales :

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

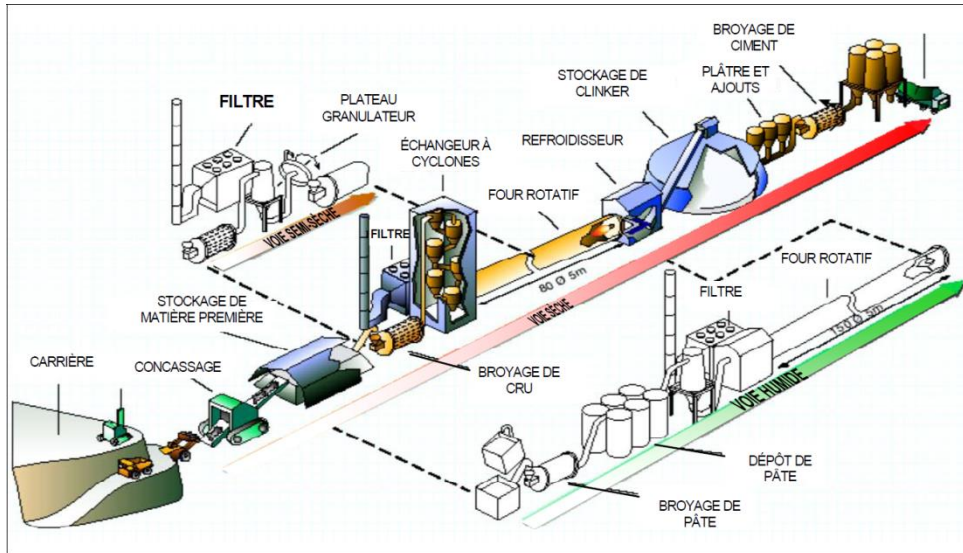


Figure (I.2) : Procédé de fabrication du ciment.

- **Étape 1 :**

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (carbonate de calcium, silice, alumine et minerai de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des carrières par extraction ou dynamitage. Ces minéraux naturels sont ensuite broyés mécaniquement. À ce stade, d'autres minéraux sont ajoutés pour corriger la composition chimique du ciment. Ces minéraux sont des déchets ou des sous-produits d'autres industries, comme des cendres de papier. Le broyage permet de produire une fine poudre, appelée « cru de ciment », qui est ensuite préchauffée, puis placée dans un four où elle est soumise à d'autres procédés.

- **Étape 2:**

Le four est au cœur du procédé de fabrication du ciment. Une fois dans le four, le cru de ciment est chauffé à environ 1450 degrés Celsius (°C) - ce qui correspond à peu près à la température de la lave en fusion. À cette température, des réactions chimiques se produisent et entraînent la formation du clinker, substance qui contient des silicates de calcium hydrauliques. Pour chauffer des matières à une température aussi élevée, il faut produire une flamme de 2000 °C à l'aide de carburants fossiles et de déchets. Le four est incliné de trois degrés par rapport à l'horizontale, ce qui permet à la matière de le traverser en 20 à 30 minutes. À sa sortie du four, le clinker est refroidi, puis entreposé, avant d'être broyé afin de produire le ciment [3].

- **Étape 3 :**

Une petite quantité de plâtre (de trois à cinq pour cent) est ajoutée au clinker pour réguler le durcissement du ciment. Ce mélange est ensuite moulu très finement pour obtenir du « ciment pur ». Pendant cette phase, d'autres minéraux, appelés « adjuvants », pourraient être ajoutés en plus du plâtre. Ces adjuvants d'origine naturelle ou industrielle sont dosés pour conférer au ciment des propriétés précises : perméabilité réduite, résistance accrue aux sulfates et aux environnements agressifs, maniabilité améliorée, meilleure qualité des finis, etc. Enfin, le ciment est entreposé dans des silos avant d'être expédié en vrac ou en sacs aux chantiers où il sera utilisé. [7]

#### **I.4 Définition de four rotatif : [19]**

Les fours rotatifs sont, dans l'industrie de processus, parmi les unités dont le fonctionnement est bien établi mais qui reste pourtant parmi les moins compris ; ils peuvent être employés pour 3 raisons distinctes : chauffage, réaction et séchage de matériaux solides, et dans beaucoup de cas, ils sont employés pour réaliser une combinaison de ces objectifs.

Dans la conception des fours, il y a quatre 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.

Le transfert thermique est le plus important parmi ces aspects, parce que dans beaucoup de cas, c'est le transfert thermique qui limite la performance du four rotatif et ceci est reflété par le nombre de papiers publiés sur les modèles de transfert thermique dans des fours.



**Figure (I.3) : Four rotatif.**



Ils sont utilisés pour transporter des processus tels que :

- Calcination,
- Désorption thermique,
- Combustion biologique,
- Frittage/Induration,
- Réglage de la chaleur.

### **I.5 Four rotatif de cimenterie et son fonctionnement :**

Le four rotatif est un cylindre en acier long supporté par des stations de roulement dont la station amont est motrice, animé d'une vitesse de rotation variable pouvant comprises entre 1,8 et 3,5 tr/min. Ce cylindre appelé aussi virole est revêtu de l'intérieur de briques réfractaires. Il présente une inclinaison de 3.5% dans le sens de l'écoulement de la matière, figure ...qui combinée avec la rotation fait que la matière puisse progresser par la gravité, vers le brûleur .il fonctionne comme un dispositif d'échange de chaleur, les fours rotatifs de cimenterie sont largement utilisés pour convertir les matières premières (farine brute) en clinker de ciment.

La production de ciment est un processus physique et chimique combiné à haute intensité énergétique qui implique le changement de la matière première en ciment pour l'application dans des structures de support à haute résistance de liaison et autres les travaux d'infrastructure. Une fois que la farine brute est transformée en clinker à partir du four, elle est ensuite broyée dans un moulin pour produire du ciment.

Les températures de four rotatif de cimenterie sont généralement de 1300-1500°C. [15]



**Figure (I.4) : Four rotatif de cimenterie.**

### I.6 Les caractéristiques du four rotatif de cimenter :

Le four de cimenter a défini par la longueur, le diamètre et le nombre d'appui.

Il se compose à des éléments intérieurs et extérieurs:

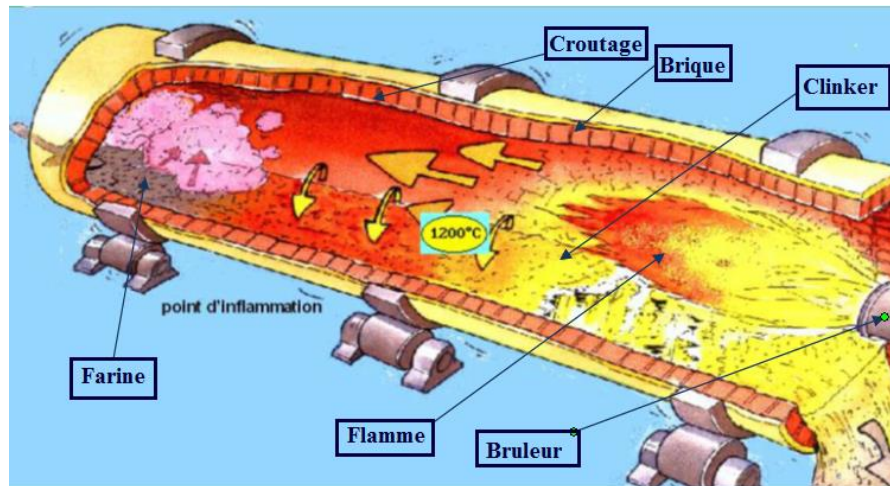


Figure (I.5) : Les éléments intérieure dans les fours rotatifs de cimenter.

### I.6.1 Les éléments intérieure principaux dans les Fours Rotatifs de cimenter :

#### I.6.1.1 Briquetage dans le four rotatif de cimenterie :

Le four doit toujours être entouré uniquement de briques. Les réfractaires sont des matériaux céramiques capables de résister les températures élevées sans détérioration. La hauteur des briques, qui dépend du diamètre du four, varie à partir de 200 mm et plus. [19]

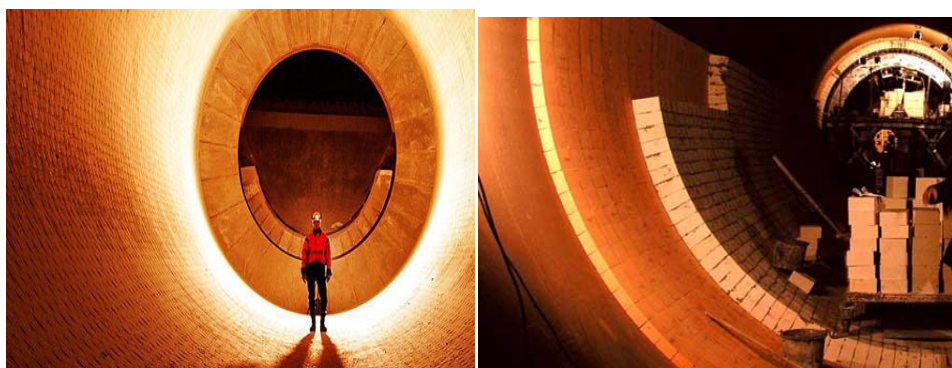


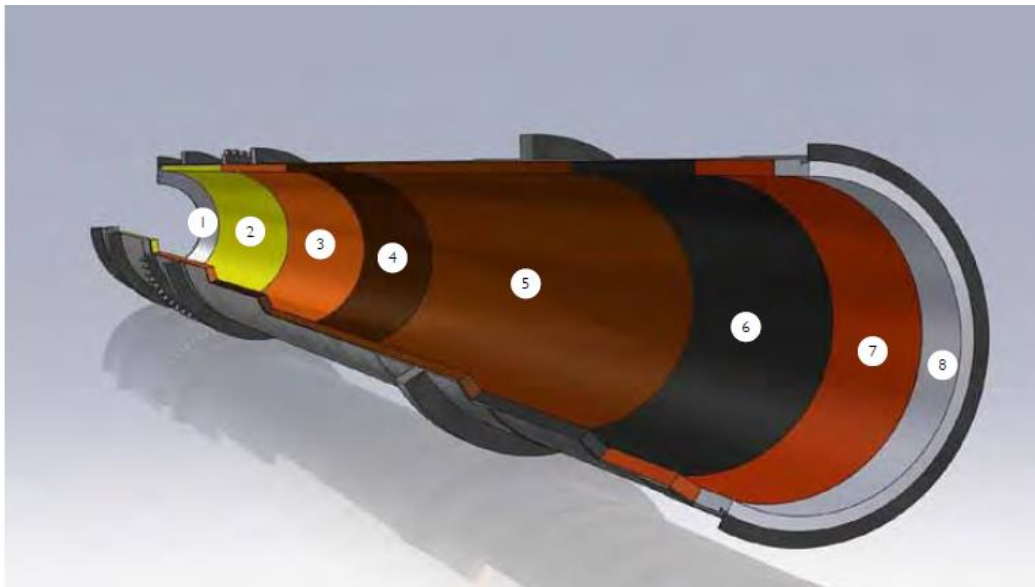
Figure (I.6) : briquetage dans le four rotatif de cimenterie.

- **Le rôle de briquetage de four rotatif de cimenterie :**

Le briquetage a plusieurs rôles, dont je cite :

- Le réfractaire sert à isoler et à protéger la virole du four des hautes températures à l'intérieur, sans les réfractaires l'acier au carbone de la virole serait détruite par la chaleur.
- Pour protéger la carcasse du four contre l'abrasion .Le clinker de ciment est très abrasif et sans réfractaires la virole serait endommagée par l'abrasion.
- Pour minimiser les pertes de chaleur à travers la virole du four : Une partie de la chaleur fournie au système du four est perdue sous forme de radiation à travers la virole en acier. Les réfractaires réduisent les pertes de chaleur en raison de leur faible conductivité thermique. [4]

- **Les différentes zones de briquetage du four rotatif : [4]**



**Figure (I.7) : Les zones de briquetage de four rotatif de cimenterie.**

- ❖ **Cône d'entrée 1 :**

La farine crue peut rapidement détériorer les réfractaires qui ne sont pas résistants, et la variation de température peut provoquer la condensation de vapeurs dans le revêtement réfractaire.

- ❖ **Zone d'entrée 2 :**

Le brique de cette zone est plus résistant et la température est comprise entre 850-900°C.

- ❖ **Zone de sécurité 3 :**

Le principe de critère du briquetage dans cette zone est contre l'abrasion, la température est comprise entre 1200-1300°C.

**❖ Zone de transition supérieure 4 :**

Dans cette zone le revêtement du four devient plus fragile, lorsque la phase liquide commence à apparaître dans le brut, la température est comprise entre 1300-1400°C.

**❖ Zone de cuisson 5 :**

La zone de cuisson permet d'obtenir le clinker, mais le brique devient faible et friable en raison de la fatigue thermomécanique car la température de cette zone est plus élevée, elle est comprise entre 1300-1600°C.

**❖ Zone de transition inférieure (aval) 6 :**

L'ovalisation de la virole du four provoque des contraintes mécaniques Cela peut conduire à l'écrasement et le déplacement des réfractaires et, ultimement, peut provoquer une torsion catastrophique de la doublure de brique. Ainsi le clinker "poussiéreux » très abrasifs provoquent une forte usure par abrasion des réfractaires, la température est comprise entre 1300-1400°C.

**❖ Zone de refroidissement et de sortie 7-8 :**

Le réfractaire de briques d'origine dans cette zone doivent être souples, hautement et résistant à l'abrasion car l'écoulement du clinker peut provoquer une (usure) détérioration de réfractaires et les segments en acier, la température est comprise entre 1000°C-1200°C.

**I.6.1.2 Brûleur de four rotatif :**

Le brûleur est l'une des parties les plus importantes d'un four rotatif car il détermine le flux d'air, la température la distribution, la consommation d'énergie et le réfractaire, et même la durée de vie de four. [10]



**Figure(I.8): La flamme bruleur de four rotatif.**



Le but d'un brûleur est de Préparation de la combustion en mélangeant l'air et le combustible dans le four. Le mélange intensif du combustible et de l'air permet une combustion rapide et complète. Le tuyau du brûleur contrôle la flamme : pour une bonne dispersion de la chaleur dans la zone de frittage et pour protéger le réfractaire et le revêtement.

Le procédé physique de bruleur est de mélanger de combustible et d'agent oxydant, réactions de combustion et évolution de la chaleur, chauffage des deux réactifs à la température d'allumage, La chaleur dégagée par la flamme ou les produits de combustion au lit de matière ou à l'environnement. [24]



**Figure (I.9) : Bruleur de four rotatif.**

➤ **Types de bruleur :**

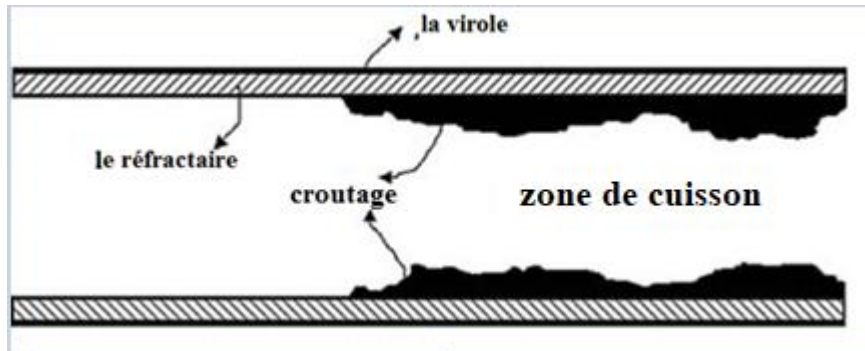
On distingue deux types de bruleur pour un mélange combustible-comburant :

- Les brûleurs à pré-mélange : dans ce type de bruleur le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four. Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange
- Les brûleurs à flamme de diffusion : ase procédé le mélange entre le combustible et le comburant se fait à la sortie du brûleur ou au nez du brûleur. Ces brûleurs concernent les combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. Ils permettent, en agissant sur les vitesses et les écoulements, d'obtenir des formes de flamme très variées. [11]



**I.6.1.3 Croûtage :**

Le croûtage dans la zone de combustion, est une masse de clinker ou de particules de poussière de clinker, étant passé d'un état liquide à un état solide. La figure (II.9) montre les différentes zones du four. [11]



Figure(I.10) : différentes zones du four rotatif.

**I.6.2 Les éléments extérieurs principaux dans les Fours Rotatifs de cimenter :**

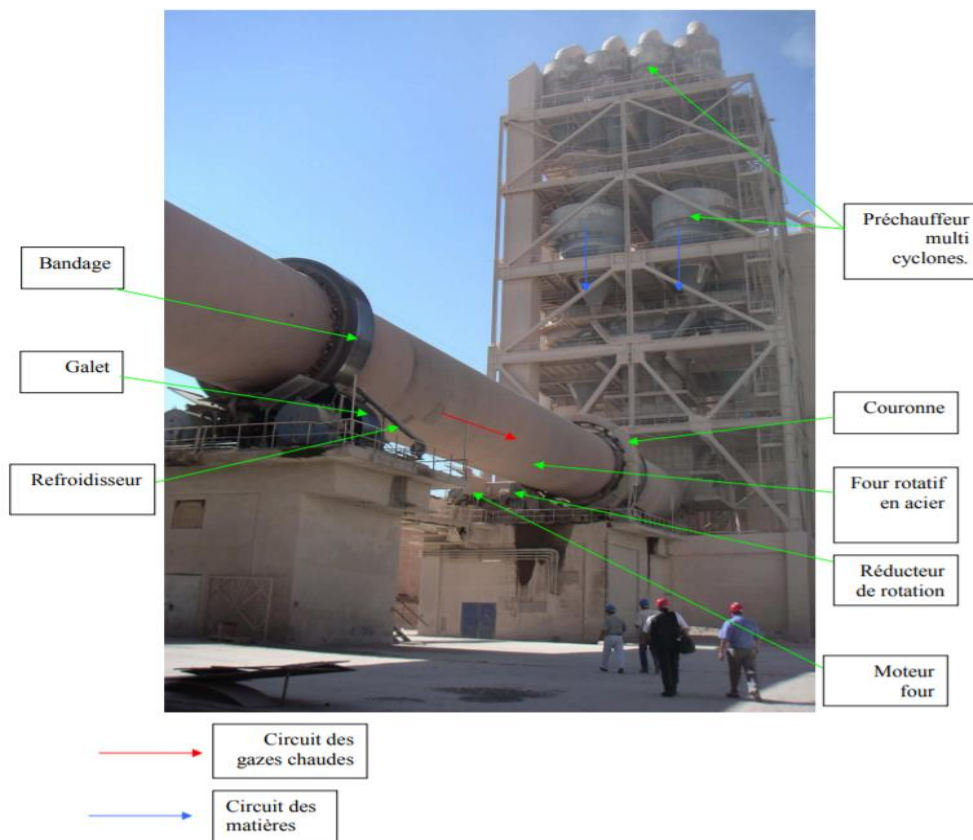


Figure (I.11) : Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie.

Le four rotatif consiste des éléments extérieurs très importantes comme : galet, bandage, virole.

### I.6.2.2 Le galet :

Le galet est conçu pour supporter les charges axiales des fours rotatifs, contrôler le mouvement axial et contrer la pente du four et assurer une utilisation uniforme de la surface de contact entre le bandage du four.

Les galets sont des formes cylindriques réalisés par un acier moulé, ils sont exécutés en deux pièces, un cylindre plein dans le quel est emmanché un axe (fusée de galet). Cet emmanchement est réalisé avec serrage, ou l'ajustage doit être compris entre 0,07 et 0,1%. Des valeurs plus élevée s'impliquent le risque de déplacement relatif de l'arbre par rapport au galet dont la conséquence inévitable est la cassure de l'arbre.

Un galet bien réglé est un galet qui est aussi parallèle que possible avec un minimum d'inclinaison à l'axe de rotation de la virole.

Le respect de l'ajustement, évite les tensions par effet de nœud, qui induisent des contraintes tellement importantes que le cas sure peut se produire, au niveau du flanc du galet.

Les galets de four sont fixés par des paliers lisses ou paliers à coussin et en alliages de bronze ou de métal blanc (antifricition). La bonne tenue du palier lisse, est conditionnée par une lubrification adéquate qui assurant la présence d'un film d'huile qu'est refroidie par un système de refroidissement à eau.

Ils permettent de minimiser le frottement par un faible coefficient de frottement de surface, ils sont de même nature que les bandages avec lesquels ils sont en contact, ce qui permet d'avoir une usure uniforme. [1], [21]



Figure (I.12) : Station des galets.

### I.6.2.3 Bandages :

Le bandage est conçu pour supporter une charge définie fabriqué en acier Coulé ou forgé avec ou sans surface du poussé (forme de la buté) qui entourent la virole et La soutiennent suivant le diamètre du four.

Le bandage protège la virole du four de l'usure, de minimiser le frottement entre le four et ses paliers tout en conservant la forme cylindrique de la virole pour éviter les fissurations et la détérioration des briques réfractaires. Le bandage permet aussi de diminuer le flux de chaleur transmis de la virole aux galets supports .Ils se déforment même à cause de :

- La charge du four (briquetage + matière + virole).
- La pression de contact du galet.

Au niveau des bandages, la virole est renforcée (tôle jusqu'à un à 100mm d'épaisseur) pour limiter les déformations dues à la pression des galets.

La largeur de bandage et de galet est calculée pour assurer la répartition de la charge et éviter :

- la déformation locale du bandage et du galet.
- les fissures du bandage ou du galet.
- l'ovalisation plastique sous la pression. [8]



Figure (I.13) : Le bandage.

#### ➤ Les types de positionnement radial du bandage :

Deux techniques différentes sont utilisées pour le positionnement radial du bandage, selon qu'il est du type « flottant » ou « cranté ».Le choix entre bandage flottant et bandage cranté résulte d'un compromis entre :

- le risque de frettage ;
- la réduction de l'ovalisation. [12]

**I.6.2.4 La virole :**

La virole est l'enveloppe de four rotatif de 4,5 m de diamètre et 75 m de longueur, elle se compose de plusieurs tronçons de différentes tailles, ces tronçons sont assemblés par soudage d'une manière à ne pas avoir un alignement des soudures longitudinales, ils sont fabriqués à partir de tôles en acier doux de qualité E 24.2 ou A42 CP, les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. Les tôles d'une largeur de 2200 mm environ sont arrondies au diamètre intérieur du four ; les demi-viroles ainsi obtenues sont ensuite soudées suivant leurs deux génératrices. [12]

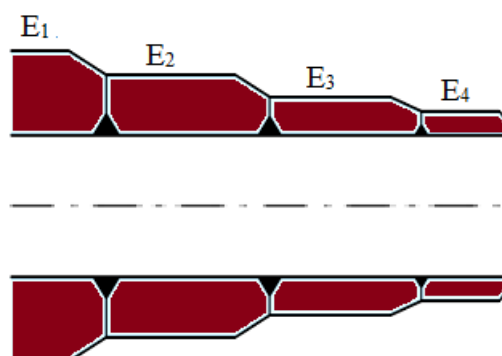


**Figure (I.14) : montage d'une virole d'un four rotatif**

➤ **Catégories d'épaisseur de virole : [12]**

On distingue trois catégories de viroles en fonction de leur position sur l'axe du four :

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



**Figure (I.15) : Épaisseurs de viroles.**



Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

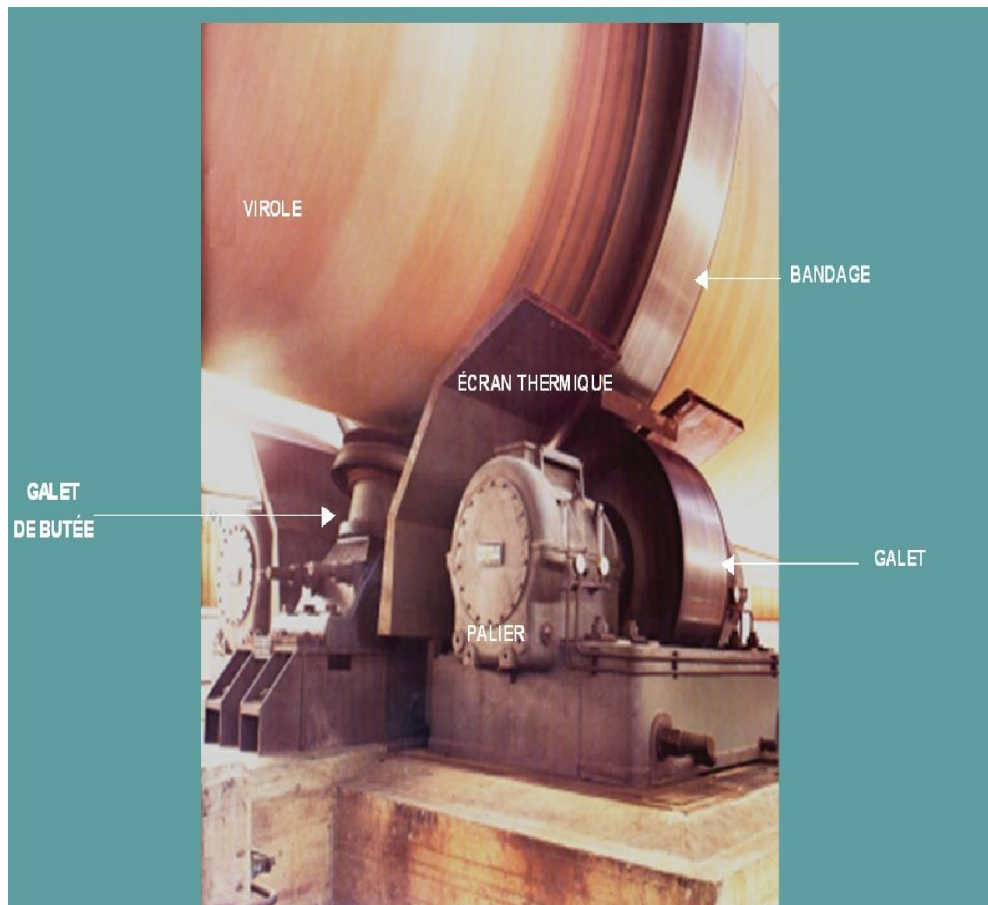
- Contrainte pour une virole courante :  $\leq 2$  da N/mm<sup>2</sup> ;
- Contrainte pour une virole intermédiaire ou porteuse :  $\leq 1.5$  da N/mm<sup>2</sup> ;
- Variation de contrainte au changement d'épaisseur des viroles :  $\leq 0.8$  da N/mm<sup>2</sup>
- Flèche :  $10^{-4}$  de la portée.

➤ **Le choix des épaisseurs de viroles celle du bandage :**

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

La virole est libre en rotation à l'intérieur du bandage car la température de la virole est plus élevée que celle du bandage. Donc la dilatation thermique de la virole étant plus importante. Le jeu est nécessaire pour absorber cette différence.

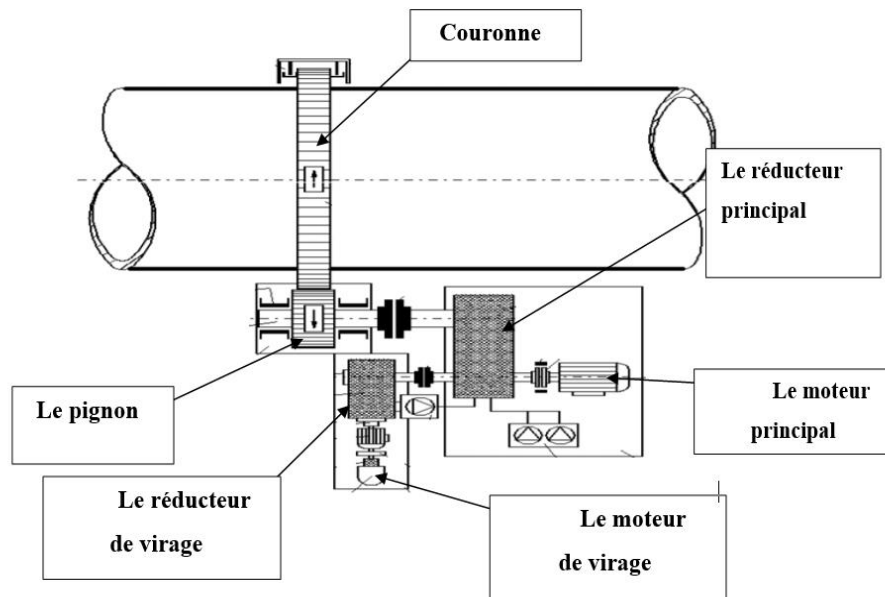
Le bandage ne sont pas montés directement sur la virole mais sur des cales libres, liée sa la virole par des butées soudées Le mouvement (montée/descente) de four répartir l'usure sur toute la surface du galet, sinon le bondage finirait par creuser un sillon dans le galet qu'il ne pourrait plus quitter. [12]



**Figure (I.16): Virole, bandage, galet de butée et galet.**

### I.7 Le Système d'Entraînement du four :

Le système d'entraînement a le rôle de tourner le four.



**Figure (I.17) : système d'entraînement du four.**

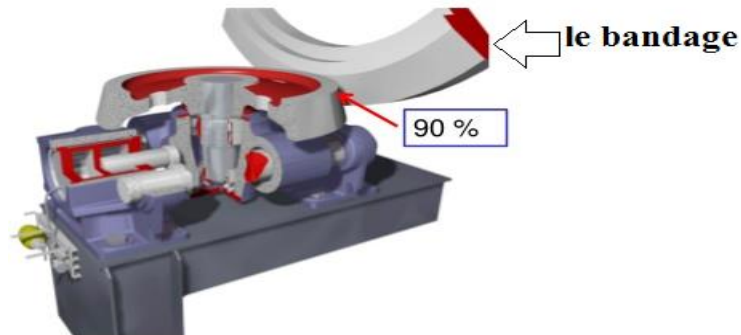
Le moteur du four rotatif tourne 1000 t/m entraîne la rotation du réducteur à 13 t/m, ce dernier est engrené à la couronne qui fait tourner le four à 1,4 tours /minute, donc on peut distinguer trois étages de vitesse, le premier est à grande vitesse, le deuxième est à moyenne vitesse qui est le réducteur,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

La couronne d'entraînement est l'élément le plus sensible du four et une pièce très coûteuse avec une durée de 1 an de fabrication.

Le pignon du réducteur est engrené à la couronne du four toute les engrenages sont plongés dans l'huile de refroidissement. Le four se déplace horizontalement en appuyant sur trois galets. Le groupe de poussé composé 80% de système hydraulique de la butée : pompe d'huile, vérins, et un disque horizontale situé sous le four rotatif, il monte environ 15 centimètres dans 24 heures, et il descend dans 8 heures, cela pour l'usure uniforme de bandage, et aussi pour répondre à la dilatation du four à cause de la grande chaleur qui est à l'intérieur de ce dernier, on lui oblige de rester entre les deux fin de courses. La puissance consommée par le moteur pour faire tourner le four est 380kW. [7]

**I.8 système de butée :**

Le four a une pente de 3% à 4%. Cette inclinaison a favorisé le four de glisser vers la sortie de la matière du four où se trouve le dispositif de retenue hydraulique appelle « La butée du four ». La butée conçue pour reprendre une partie importante de la charge axiale du four atteint jusqu'à 90%. Le reste de la charge axial reprenait par les stations de galets du four, lors les galets sont correctement réglés, ils repèrent du 10% à 50% de la charge axial du four. [7]



**Figure (I.18) : Galet pousseur (la buté).**

**I.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons vu la procédure de la production du ciment et les éléments les plus importants et leur rôle dans le four rotatif. Ce dernier est l'élément central du procédé de production du ciment. Il est le siège des réactions chimiques et opère sous des conditions de pression et de température très élevée. D'où l'intérêt d'une étude thermique sur le four rotatif. Le chapitre suivant nous verrons le transfert de chaleur dans le four rotatif.

# CHAPITRE II :

## Transfert de chaleur dans les fours rotatifs



### II.1 Introduction :

Les mécanismes de transfert de chaleur dans les fours rotatifs sont la conduction, la convection et le rayonnement, ces derniers varient en fonction de la température. Les modes de ce transfert sont classés en trois catégories, correspondant à trois zones, l'extérieur, l'intérieur et à travers le four mur. Chaque mode peut englober un ou plusieurs mécanismes de transfert de chaleur.

### II.2 Pertes de chaleur dans la virole :

Les pertes de chaleur des viroles jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des fours rotatifs. Pour certaines applications telles que les fours à ciment, les scanners de température des viroles peuvent être une façon de contrôler le processus.

Les pertes de chaleur à travers la virole nous indiquent ce qui se passe à l'intérieur du four. Même si le four est équipé de caméras, la défaillance du réfractaire ne peut être détectée que par une augmentation de la température de la virole à l'endroit de la défaillance. Certains fours à ciment modernes sont équipés de scanners de température qui scannent en permanence la virole et enregistrent le profil de la température en temps réel. Toutes les causes qui ont un effet sur les changements de température à l'intérieur du four : par exemple, augmentation du débit d'alimentation, faible débit de carburant, modification du débit d'air, et ainsi de suite permettent de modifier le profil de température des viroles.

L'inconvénient dans l'utilisation de la paroi de la virole pour le contrôle du four est que le revêtement réfractaire a une grande masse thermique et son temps de réponse aux changements de température à l'intérieur du four est lent. C'est la raison pour laquelle certains opérateurs préfèrent utiliser la température de la paroi intérieure comme point de contrôle en pointant les caméras équipées de capteurs de température [26].



Figure (II.1) : Caméra pyrométrique.

### II.3 Transfert de chaleur dans le four rotatif :

Le transfert de chaleur dans le four consiste trois modes :

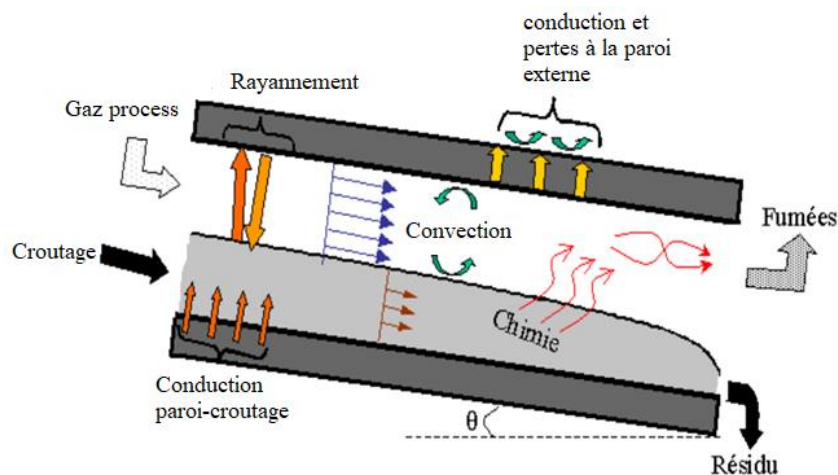


Figure (II.2) : principaux phénomènes mise en jeu dans les fours tournants.

#### II.3.1 Transfert de chaleur par conduction dans le four :

Dans les matériaux solides comme les parois réfractaires ou la virole d'un four rotatif, les molécules possèdent une énergie interne rigide, qui forme une structure en treillis. Les molécules ne migrent pas à l'intérieur du réseau, elles possèdent une énergie interne sous diverses formes, comme l'énergie vibratoire et l'énergie cinétique de rotation, qui sont proportionnelles à la température locale.

La vitesse du transfert d'énergie dépend du gradient de la température et des modes d'interaction moléculaire présents dans ce matériau particulier (conductivité thermique), d'où la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur est définie par :

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

#### II.3.2 Transfert de chaleur par convection :

Comme mentionné précédemment, le transfert de chaleur par convection se produit entre un solide et un fluide en mouvement adjacent [26]. Le taux de transfert de chaleur entre une surface à la température  $T_p$  et un fluide à la température  $T_f$  peuvent être calculés à partir de la loi de Newton sur le refroidissement, qui est mathématiquement énoncée comme :

$$\Phi = hA (T_p - T_f) \quad (\text{II.2})$$

#### II.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement :

Les transferts de chaleur par rayonnement thermique sont liés aux ondes caractéristiques, ces échanges dépendent fortement du niveau de la température et la direction de l'émission.

Le rayonnement est un mode d'échange de chaleur par émission et absorption de radiation électromagnétique. La détermination des flux de chaleur échangés par rayonnement nécessite la connaissance des propriétés radiatives, et plus particulièrement les émissivités, des solides, de la paroi du tambour et des gaz ainsi que le modèle de rayonnement [27].

#### II.4 Modèle mathématique

Divers processus se déroulant dans le four rotatif à ciment qui est devant être pris en compte de manière adéquate lors de l'élaboration de son modèle mathématique. Le clinker est obtenu par la combustion de matières premières dans un four rotatif dont l'énergie nécessaire à la calcination et à d'autres réactions ainsi qu'à la formation de la masse fondue est fournie par le chaud gaz. Plusieurs réactions chimiques ont lieu dans le lit solide et la formation de la masse fondue provoque un revêtement interne à la surface de la réfractaire dans la zone de combustion. Le système est non linéaire en raison au transfert complexe de chaleur/masse.

#### II.5 Bilan énergétique

La température moyenne globale de la paroi du four a été utilisée dans le modèle mathématique. Les équations suivantes écrites respectivement pour gaz, solide et mur.

- **Pour gaz :**

$$A_g C_{pg} \rho_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = \beta_1 (T_w - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + Q_{comb} \quad (\text{II.3})$$

- **Pour Solide :**

$$A_s C_{ps} \rho_s v_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \beta_2 (T_w - T_g) + \beta_3 (T_w - T_s) + A_s Q_c \quad (\text{II.4})$$

- **Pour le mur :**

$$\beta_1 (T_w - T_g) + \beta_3 (T_w - T_s) + \beta_4 (T_a - T_w) = 0 \quad (\text{II.5})$$

- **La chaleur de la réaction :**

$$Q_c = \frac{\rho_s}{1+A_1+F_i+S_i} [-\Delta h_\varepsilon K_1 \varepsilon - \Delta h_w R_w - \Delta h_\beta K_\beta A(C)^2 - \Delta h_\alpha K_\alpha C \beta] \quad (\text{II.6})$$

( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ) sont des fonctions non linéaires des températures, des coefficients de transfert de chaleur par convection et rayonnement, et de la géométrie qui peut être calculée par les équations (5)-(8).

Coefficient de transfert de chaleur entre les gaz et la paroi intérieure est la suivante :

$$\beta_1 = 1.7307 r_1 p [f_1 + 1.73 \times 10^{-9} (1 - h_0) \varepsilon_g \varepsilon_s (T_g^2 + T_w^2) (T_g + T_w)] \quad (\text{II.7})$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre les gaz et le solide est suit :

$$\beta_2 = 3.4314r_1 \sin\left(\frac{p}{2}\right) [f_2 + 1.73 \times 10^{-9}(1 - h_0)\mathcal{E}_g\mathcal{E}_s(T_g^2 + T_s^2)(T_g + T_s)] \quad (\text{II.8})$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi et le solide est de suit :

$$\beta_3 = r_1(2\pi - p)[f_3 + 1.73 \times 10^{-9}h\mathcal{E}_w\mathcal{E}_s(T_s^2 + T_w^2)(T_s + T_w)] \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi extérieure et la température ambiante est le suivant :

$$\beta_4 = 2\pi f_4 r_2 \quad (\text{II.10})$$

Le transfert de chaleur entre la virole et l'environnement (air extérieur), Il s'agissait d'une description approximative du coefficient de transfert de chaleur entre la surface de virole et l'environnement. Afin d'augmenter la précision du modèle, le coefficient de transfert de chaleur de l'enveloppe extérieure a été supposé être la somme de convective  $h_{cvsh \rightarrow a}$  et  $h_{rch \rightarrow a}$  radiative coefficients de transfert de chaleur données par respectivement :

$$h_{cvsh \rightarrow a} = \frac{0.11k_a pr^{0.36}}{D} (0.5Re_w^2 + Re^2 + Gr)^{0.35} \quad (\text{II.11})$$

$$h_{rch \rightarrow a} = C\mathcal{E}_{sh}\sigma T_{sh}^3 \quad (\text{II.12})$$

Où se trouve le "C" de l'équation (10) :

$$C = \left\{ 1 + \frac{T_a}{T_{sh}} + \left(\frac{T_a}{T_{sh}}\right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{sh}}\right)^3 \right\} \quad (\text{II.13})$$

Comme l'équation (II.8),  $h_{cvsh \rightarrow a}$  dépend sur la température, car Pr, Re et Gr peuvent être fortement affectés par les conditions environnementales [27].

Pour améliorer le modèle, au début, la température de la virole sur toute la longueur du four doit être enregistrée par le scanner de température. Ensuite, les groupes sans dimension de l'équation (II.9) ont été calculés selon la température du film (valeur moyenne des températures de l'enveloppe et de l'air) sur toute la longueur du four.

Ainsi, la valeur de  $h_{cvsh \rightarrow a}$  a pu être calculée dans chaque section longitudinale le long du four. Parce que la température de la coque varie avec le temps, cette variation a instantanément affecté le modèle, de sorte que le phénomène de transfert de chaleur dans le modèle était plutôt un modèle quasi-dynamique.

Cette approche a permis compte tenu des variations du coefficient de transfert de chaleur convective, qui dépendent à la fois du temps et de la distance longitudinale.

**II.6 Flux de chaleur :**

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures [27]. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\Phi = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} \tag{II.14}$$

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface (A) par unité de temps.

Le flux de chaleur en coordonnées cylindriques (sans production de chaleur) est :

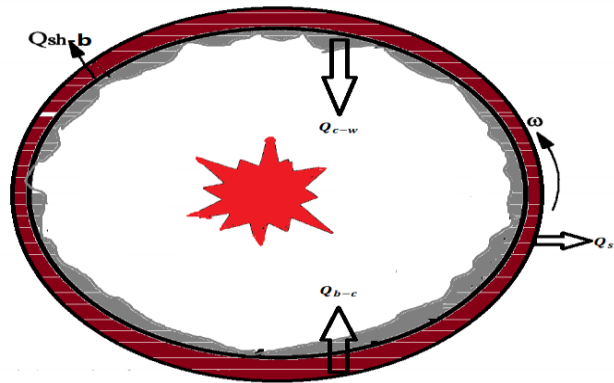
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{II.15}$$

Avec les hypothèses suivantes, l'équation (II.15) peut être simplifiée comme suit :

Hypothèses :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \tag{II.16}$$

- (1) Le transfert de chaleur à travers les couches de la paroi du four était régulier l'État.
- (2) Le flux de chaleur par conduction dans la direction z a été négligé.
- (3) Dans chaque segment longitudinal, la température de paroi en - La direction a été mise en bloc.



**Figure (II.3) : les quantités de chaleur intérieure du four.**

Appliquant les conditions limites ci-dessus et l'équation (II.16), on obtient les équations suivantes :

$$Q_{c-w} = \frac{2\pi\Delta Z k_c (T_w - T_c)}{\ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \tag{II.17}$$

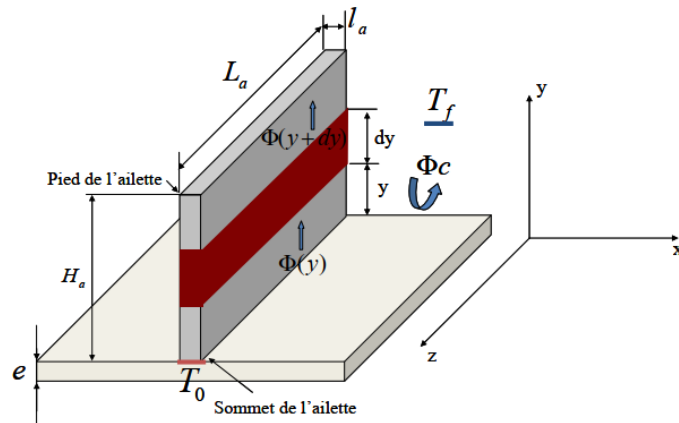
$$Q_{b-c} = \frac{2\pi\Delta Z k_b (T_c - T_b)}{\ln\left(\frac{r_b}{r_c}\right)} \tag{II.18}$$

$$Q_{sh-b} = \frac{2\pi\Delta Z k_{sh}(T_b - T_{sh})}{\ln\left(\frac{r_{sh}}{r_b}\right)} \quad (\text{II.19})$$

$$Q_{sh} = 2\pi\Delta Z r_{sh} h_{sh-a}(T_{sh} - T_a) \quad (\text{II.20})$$

**II.7 Définition d'une ailette :**

Une ailette est un dispositif thermique visant à augmenter la surface de contact avec un fluide extérieur pour augmenter les échanges convectifs, Ainsi, plus la surface d'échange est grande, plus l'échange de chaleur est amélioré. Une technique pour augmenter cette surface d'échange est la réalisation d'ailettes [28].



**Figure (II.4) : Hypothèses simplificatrices d'ailette.**

Le champ de température à la surface de l'ailette étant à l'évidence multidimensionnelle (la température dépend de plusieurs variables d'espace), le flux thermique perdu par l'ailette  $\Phi_a$ , s'obtient l'ailette en utilisant la relation (II.21) :

$$\Phi_a' = h d A (T_p - T_f) \quad (\text{II.21})$$

L'évaluation de cette intégrale nécessite de résoudre un problème de conduction thermique multidimensionnel. Dans la plupart des cas, il est possible de supposer que la température dans l'ailette est quasi-uniforme sur une section droite de l'ailette. Nous supposons alors que la température ne dépend que de la direction y depuis le pied de l'ailette [28].

- Détermination du champ de température :  
Le flux de chaleur  $\Phi(y)$  transmis par conduction à l'abscisse y s'exprime par la loi de Fourier :

$$\Phi(y) = -K_{ax} \left. \frac{dT}{dy} \right|_y \quad (\text{II.22})$$

Avec :

Le flux de chaleur  $\Phi(y+dy)$  transmis par conduction à l'abscisse  $y+dy$  s'exprime de la même manière :

$$\Phi(y + dy) = -KA_{a'} \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y + dy} \quad (\text{II.23})$$

- Le flux de chaleur  $\Phi$  :

C transmis par convection à la périphérie de l'ailette entre  $y$  et  $y+dy$  s'exprime grâce à l'équation suivante :

$$\Phi_c = hp_{a'} dy |T(y) - T_f| \quad (\text{II.24})$$

Avec :

La conservation du flux de chaleur en régime stationnaire permet d'écrire l'équation suivante :

$$\Phi(y) = \Phi(y + dy) + \Phi_c \quad (\text{II.25})$$

$$-KA \left. \frac{dT}{dy} \right|_y = h \cdot P_{a'} dy (T_y) - T_f - KA_{a'} \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y + dy} \quad (\text{II.26})$$

- Four avec ailettes :

La conduction unidimensionnelle en régime permanent entre la virole et l'ailette en acier :

$$\varphi A = kA((T_{vA} - T_{Aa'})/LA) \quad (\text{II.27})$$

La convection d'ailette avec, l'atmosphère vers l'air à température ambiante :

$$\varphi a' = ha(T_{Aa'} - T_{a'}) \quad (\text{II.28})$$

**II.8 Recherche bibliographie :**

M. Mirhosseini et al. (2019) ont étudié un absorbeur en forme d'arc est conçu et la distribution de température le long de la circonférence de l'absorbeur est obtenue numériquement. Dans les situations où la chaleur est libre, la métrique pour la conception d'un système thermoélectrique est d'atteindre la puissance maximale de sortie. Afin d'atteindre la puissance régionale optimale à partir de la conception paramétrique, la longueur de l'absorbeur est divisée en plusieurs sections. De plus, en évaluant les résultats, on peut déterminer dans cette étude la puissance de sortie maximale appariée dans chaque section par rapport au facteur de remplissage et à la longueur de pied. Les résultats montrent que des facteurs de remplissage faibles entre 0,05 et 0,2 peuvent fournir relativement la même puissance maximale que des facteurs de remplissage élevés. En outre, une évaluation économique est effectuée pour trouver la conception optimale du dispositif TEG pour la production d'électricité la plus élevée et le coût d'investissement le plus bas [29].

W.-N. Wu et al. (2019) ont proposé des méthodes pour évaluer la perte de chaleur à travers la coque du four et ses facteurs d'influence, en utilisant un four à ciment industriel en Chine comme cas d'étude. Le calcul montre que la perte de chaleur journalière à travers la coquille du four dans la zone de calcination du four étudié est d'environ 140 GJ, et les pertes de chaleur par rayonnement et convection sont comparables, représentant 54 % et 46 %. Sachant que la calcination du clinker de ciment dans un four rotatif est un processus énergivore. Ainsi, la récupération de chaleur à partir de la surface de la coquille du four est un moyen potentiel d'améliorer l'efficacité énergétique pour rendre la production de ciment plus propre et plus durable. A cet effet, cinq variables de fonctionnement principales qui influent grandement sur la perte de chaleur sont identifiées conjointement par le coefficient de corrélation Random, Forest et Pearson. Finalement, les résultats de ces travaux aideront les managers à se sensibiliser à l'amélioration de l'efficacité énergétique du système de four, les stratégies sont conçues de manière appropriée pour réduire la perte de chaleur par la coquille du four [30].

Hyun-Do Yun et al. (2019) ont présenté une étude sur la caractérisation des mortiers de ciment qui contient des matériaux à changement de phase (PCM) afin de contrôler le développement de la chaleur d'hydratation et ils ont examiné les caractéristiques et les propriétés microstructurales du mortier de ciment avec des PCM comme le débit, la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Cette étude portait sur deux types de MCP et jusqu'à 15 % de ciment ajouté aux mélanges de mortier de ciment. Les deux types de MCP utilisés dans cette étude sont le MCP avec baryum (MCP-Ba) et le MCP avec strontium (MCP-Sr). Les résultats expérimentaux indiquent que l'augmentation de la température incrémentale et le temps maximum de libération de la température de PCM jusqu'à 5% d'ajout sont retardés. Les deux PCM-Ba et PCM-Sr sont efficaces pour réduire le développement de la chaleur d'hydratation [31].



A. Gallo, et al. (2019) ont élaboré un four rotatif à l'échelle d'un laboratoire a été construit et testé à l'aide d'un simulateur solaire à haut flux de 7 kW à l'Université d'Antofagasta. Il a été conçu pour traiter des matières particulaires de nature différente et peut atteindre des températures supérieures à 800 °C selon différentes stratégies d'exploitation. Le carbure de silicium a été sélectionné pour des essais initiaux parce qu'il est inerte, supporte des températures élevées (jusqu'à 1600 °C) et il a été proposé comme vecteur de stockage thermique dans plusieurs recherches sur l'énergie solaire concentrée. Au cours de cette expérience, les particules ont montré une augmentation rapide de leur température et ont dépassé 700 °C en moins de trois minutes après le chargement. Un modèle numérique transitoire unidimensionnel a également été développé pour effectuer l'analyse thermique du four et l'estimation de la température des particules et de l'efficacité du système. Les résultats numériques ont montré une bonne concordance avec les données expérimentales et les pertes thermiques ont pu être quantifiées en détail. Par conséquent, le modèle a également été utilisé pour prédire le comportement thermique d'un four solaire rotatif fonctionnant en mode discontinu [32].

W.-J. Du et al. (2018) ont proposé un nouveau système de récupération de chaleur installé sur le four rotatif. Les mesures expérimentales sont effectuées pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur et les performances de débit de fluide des neuf échangeurs de récupération de chaleur. Dans ce but, une plateforme expérimentale est conçue pour étudier les caractéristiques opérationnelles du système. Ainsi, les résultats des mesures montrent que les températures de sortie des échangeurs de récupération de chaleur varient principalement à mesure que les températures d'entrée augmentent alors que les expériences montrent qu'on a une certaine hystérésis. Sachant que lorsque le débit massique d'entrée varie de 0 à 6 kg/s, les échangeurs de récupération de chaleur avec tuyaux enroulés pourraient effectivement améliorer la performance de récupération de chaleur par rapport au type radiant. Ensuite, les performances de récupération de chaleur de trois différents types d'échangeurs de récupération de chaleur dans le système sont étudiées pour obtenir les surfaces de transfert de chaleur avec une meilleure efficacité thermique sur les fours rotatifs. Finalement, les mesures expérimentales indiquent que la performance de récupération de chaleur de l'échangeur de récupération de chaleur avec deux couches de tuyaux enroulés est meilleure que les autres [33].

C. Gu et al. (2018) ont proposé un modèle mathématique sur le transfert de chaleur et de masse afin d'étudier les caractéristiques de séchage des particules de biomasse. Ils ont comparé expérimentalement des particules de biomasse filamenteuses dans des conditions sélectionnées à des simulations et la faisabilité de modèles mathématiques qui a été vérifiée. De plus, le transfert de chaleur et de masse entre le flux de particules de biomasse filamenteuse humide et le flux de gaz a été décrit en termes de températures de tambour rotatif, de vitesses de flux de gaz et de températures de gaz. L'objectif était d'obtenir plus d'informations sur la température, la teneur en humidité et

le taux d'évaporation de l'humidité des particules de biomasse filamenteuses humides dans un four rotatif pendant les processus de séchage. Ainsi, les résultats de la simulation ont indiqué que la température du tambour pouvait avoir une incidence considérable sur les comportements de séchage des particules. Aussi, la température et la teneur en humidité des particules ont été légèrement influencées par les propriétés du débit de gaz. Les résultats montrent que les modèles proposés offrent des méthodes efficaces pour étudier les caractéristiques de séchage des particules de biomasse filamenteuses humides [34].

A.S. Bongo Njeng et al. (2018) ont effectué une série d'expériences sur un four rotatif à échelle pilote à chauffage indirect. Ces expériences visaient à enregistrer les profils de température du gaz de franc-bord, le vrac de particules solides et la paroi, ainsi que l'énergie fournie pour le chauffage, dans une gamme de conditions de fonctionnement pendant l'écoulement des solides. Sur la base de ces données, le coefficient expérimental de mur-solide de transfert de chaleur a été déterminé au moyen d'un bilan énergétique. Un modèle a été proposé fondé sur une analyse dimensionnelle pour calculer le coefficient de transfert de chaleur entre le mur et le solide pour les températures de chauffage basses à moyennes (100 à 500 °C). Les résultats expérimentaux et calculés concordent. Les résultats expérimentaux sont également comparés aux prévisions de certains modèles existants [35].

P.J. Witt et al. (2018) ont donné une nouvelle approche hiérarchique générique en combinant séquentiellement les simulations 2D Discrete Element Method (DEM) des coupes du lit et les modèles 3D de calcul dynamique des fluides (CFD) en deux phases de l'ensemble du four, englobant à la fois le lit et le franc-bord gazeux. Ainsi, des simulations DEM ont été utilisées pour calculer les vitesses moyennes des solides dans un lit pour diverses vitesses de rotation et tailles de particules, et elles ont ensuite été utilisées pour étalonner et valider le modèle rhéologique des solides utilisé dans le modèle CFD subséquent. Il a été démontré qu'un frottement Coulombique modifié pour le lit du modèle CFD donnait un accord satisfaisant avec les résultats du lit DEM sur une gamme de vitesses de rotation. De même, des simulations de mélange thermique réalisées à l'aide du modèle 2D DEM pour le lit granulaire ont été utilisées pour valider un modèle CFD de transfert de chaleur après étalonnage du terme diffusif à petite échelle. La capacité du modèle CFD obtenu a été démontrée par une simulation 3D du lit d'un grand four rotatif [36].

K. Wang et al. (2017) ont proposé et étudié expérimentalement et numériquement d'un nouvel échangeur de chaleur utilisant des batteries de tubes disposés de façon tournée à une certaine orientation. Il est utilisé dans un système de récupération de chaleur résiduelle dans les cimenteries. Les caractéristiques de transfert de chaleur et de débit de l'échangeur de chaleur sont analysées. Une étude numérique 2-D est menée en utilisant la simulation CFD. Ainsi, un modèle de l'échangeur de chaleur est construit et simulé. Les conditions aux limites sont définies par une température d'entrée de 300°C

et une température constante de la paroi du tube de 150°C, avec une vitesse d'entrée allant de 2 m/s à 7 m/s. Les résultats simulés sont comparés aux données expérimentales et un bon accord est obtenu avec les résultats de corrélation pour une disposition alignée tournée à une certaine orientation. Les résultats numériques indiquent que les batteries de tubes disposés de façon tournée à une certaine orientation sont plus performées que les deux autres agencements [37].

A. Agrawal, P.S. Ghoshdastidar (2017) a présenté un modèle de calcul de transfert de chaleur d'un four rotatif utilisé pour la production de dioxyde de titane rutil par calcination de dioxyde de titane hydraté pâteux. Les travaux détaillent la modélisation de plusieurs réactions chimiques survenant dans la région du lit solide ainsi que la convection turbulente du gaz, l'échange de chaleur de rayonnement entre le gaz chaud, la paroi réfractaire et la surface solide, et la conduction dans la paroi réfractaire. Des techniques de différence finies sont utilisées et les conditions thermiques stationnaires sont supposées. Le four est divisé en segments axiaux de longueur égale. La solution est de type va et viens de l'entrée solide à la sortie solide. La direction du flux de gaz est opposée à celle des solides. Le bilan massique de chaque espèce dans la charge solide, et le bilan massique et énergétique du solide et du gaz dans un segment axial sont utilisés pour obtenir les températures des solides et des gaz, et la concentration des espèces à la sortie de ce segment. Les données de sortie comprennent la distribution de la température de la paroi réfractaire, les profils de température des solides axiaux et des gaz, le profil de composition des solides axiaux, la longueur requise pour le séchage de la charge solide et la longueur totale du four nécessaire pour obtenir une conversion de 98 % de l'anatase  $\text{TiO}_2$  en rutil  $\text{TiO}_2$ . Une étude paramétrique détaillée portant sur les paramètres de contrôle, tels que le pourcentage de contenu en eau (par rapport aux solides secs), le débit de solides, le débit de gaz, l'angle d'inclinaison du four et la vitesse de rotation du four, a permis d'obtenir une bonne connaissance physique du rutil-Procédé de production  $\text{TiO}_2$  dans un four rotatif [38].

Khalid Idrissi Janati et al. (2017) ont proposé l'étude du comportement mécanique et de la déformabilité des viroles sous l'effet de la chaleur, pour le four rotatif d'une cimenterie dans le cadre de la maintenance préventive. Ainsi, le modèle est validé par les éléments finis, qui simule le comportement élastoplastique du four. Au premier lieu, l'étude prend en compte des mesures expérimentales pour les distorsions du four en présence de chaleur. A cet effet, l'étude utilise la méthode des éléments finis numériques pour simuler la virole et la paroi réfractaire en utilisant le logiciel PATRAN-NASTRAN. Enfin pour une meilleure approche en réalité du comportement du four, l'étude compare entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par la simulation numérique par méthode des éléments finis sur trois zones critiques du four rotatif à ciment, Suite aux problèmes des briques réfractaires recouvrant les fours à ciment exposés à des dommages dus aux phénomènes d'Ovalité, ces dommages peuvent être à leur tour provoqués par la corrosion de la coquille du four et le coût sera autant que prévu [39].

C. Csernyei, A.G. Straatman (2016) ont développé un modèle de four unidimensionnel utilisant des éléments de modèles existants, puis relié le modèle à l'environnement via un modèle de résistance composite et un modèle de convection forcée qui permet d'inclure correctement les effets des ventilateurs de refroidissement de la coque. Aussi, la conductivité thermique à travers la coque du four est traitée comme un paramètre d'étalonnage permettant de générer un profil de température de coque. Ainsi, les équations de transfert de chaleur et de chimie sont implémentées dans le logiciel Matlab R2014a pour produire des solutions unidimensionnelles des distributions de température et des fractions de masse d'espèces observées dans un four à ciment rotatif. Une étude de validation est effectuée par rapport à un modèle unidimensionnel existant qui présente des résultats quantitatifs et qualitatifs raisonnables des profils de température et des extrants des espèces. Ensuite, les données scannées sur la température de la coque sont ensuite comparées aux résultats du modèle en considérant uniquement la convection libre et la convection forcée des ventilateurs de refroidissement de la coque du four en fonctionnement. Une erreur de  $\geq 20\%$  a été constatée lorsque les effets de la convection forcée sur la coque du four sont négligés [40].

Christopher M. (2016) a décrit le processus utilisé pour l'analyse computationnelle du transfert de chaleur convective à partir de multiples grands jets qui empiètent sur un grand cylindre, et un modèle unidimensionnel de la chimie et du transfert de chaleur dans un four à ciment rotatif. Ainsi, les formulations de modèles unidimensionnels développés ont été combinées pour former le modèle. Il a conclu que la corrélation développée était exacte dans un intervalle de 26 %, tandis que le modèle unidimensionnel représentait raisonnablement bien les profils de température et les fractions de masse des espèces. De plus, l'inclusion de la convection forcée dans le modèle de résistance au four a entraîné une diminution de la température de la coquille par rapport à la seule convection libre [41].

Luo, Li, Cai, Zhou, Tang, Zhai, and Zhang (2015) ont proposé un nouveau système thermoélectrique de récupération de la chaleur résiduelle pour réduire les pertes de chaleur des fours rotatifs à ciment. Ce système est configuré comme un ensemble d'unités de production thermoélectrique disposées longitudinalement sur une coque coaxiale secondaire avec le four rotatif. Ainsi, un modèle mathématique a été élaboré pour l'estimation de la performance de la récupération de la chaleur résiduelle. Les résultats de la simulation montrent qu'avec un four rotatif à ciment  $\phi$  4,8 x 72 m à titre d'exemple, une production d'électricité d'environ 211 kW peut-en économiser 3283 kW d'énergie en perte de chaleur en utilisant un système de récupération d'énergie thermique hybride  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Par rapport au four sans système de récupération thermoélectrique, plus de 32,85% de la chaleur résiduelle est économisée de la surface du four. La contribution de la production thermoélectrique est d'environ 2%. Sachant que le four rotatif à ciment est l'équipement crucial utilisé pour la production de ciment.

Environ 10 à 15 % de l'énergie consommée dans la production du clinker de ciment est directement dissipée dans l'atmosphère à travers la surface externe du four rotatif [42].

R. Bouakkaz et al.(2015) ont étudié le transfert de chaleur par convection forcée au-delà d'un cylindre circulaire rotatif avec une vitesse de rotation non dimensionnelle constante  $\alpha$  variant de 0 à 6 pour des nombres de Reynolds de 20 à 200 et un nombre de Prandtl de 0,7. Cette étude se concentre sur les caractéristiques de flux et de transfert de chaleur libres autour d'un cylindre circulaire rotatif dans le régime laminaire 2-D pour différents taux de rotation avec le cylindre soumis à une température de paroi constante. La carte de transition de flux trouvée par des chercheurs antérieurs est montrée dans l'étude pour un plus large éventail de nombres de Reynolds et de taux de rotation. A cet effet, les calculs numériques sont effectués en utilisant le logiciel FLUENT par la méthode à volume fini. La rotation atténue l'instabilité secondaire et augmente le nombre critique de Reynolds pour l'apparition de cette instabilité. Ainsi, des résultats dans le temps moyen (coefficients de portance et de traînée et nombre de Nusselt) ont été obtenus et comparés avec les données de la littérature. Un bon accord a été obtenu pour les valeurs locales et moyennes [43].

JANATI K. I. et al. (2015) ont présenté un travail qui a pour objectif l'étude de la tenue mécanique et de la déformabilité des viroles à chaud d'un four rotatif pour les cimenteries. Ainsi, ils ont réalisé à chaud une campagne de mesures expérimentales des déformations du four, ensuite ils ont simulé par la méthode des éléments finis de la virole et du mur réfractaire en utilisant le logiciel PATRAN/NASTRAN. Afin de valider le modèle élément finis qui simule le comportement élasto-plastique du four en service. Cette étude est basée sur le cas réel représenté par le four rotatif N°2 d'une cimenterie relevant d'un grand groupe industriel installé au Maroc. Pour une meilleure approche de la réalité du comportement du four, les résultats obtenus par la MEF sont comparés à ceux obtenues par les essais expérimentaux [44].

XiaoYanSong et al. (2014) ont utilisé le logiciel des éléments finis FLUENT afin d'analyser le four rotatif, l'effet de gaz-solides du four rotatif. Le four et le four rotatif du champ de température du gaz sont calculés puis importés dans le logiciel ANSYS comme condition initiale pour compléter la reconstruction du champ de température et utiliser la méthode d'interpolation des nœuds pour effectuer l'analyse des contraintes thermiques. Grâce à l'analyse de simulation conjointe des deux logiciels FLUENT et ANSYS, l'analyse du processus de combustion du four rotatif, le transfert de chaleur et la réponse mécanique de la structure peuvent être mis en œuvre dans les mêmes conditions, rendre les résultats de la simulation du four rotatif davantage liés aux conditions de fonctionnement pratiques. Ainsi, Le logiciel d'éléments finis FLUENT est utilisé pour simuler et analyser le processus de combustion dans le four rotatif et les effets du gaz-solides lesquels les problèmes posés sont résolus en s'appuyant sur le langage paramétrique des éléments finis pour charger les conditions limites du four rotatif. Les résultats du calcul du champ de température des gaz de combustion et des

différentes parties du four rotatif, y compris la couronne, le cylindre, le réfractaire et les briques, montrent que la température de l'ensemble du four varie entre 485K ~ 1610K. Aussi, La méthode d'interpolation des nœuds est appliquée pour traiter le champ de température généré par CFD. Ensuite, le champ de température traitée est importé dans ANSYS pour l'analyse des contraintes thermiques. De ce fait, il est possible de simuler plus précisément la distribution des contraintes thermiques des briques réfractaires du four rotatif [45].

Vijayan. S. N, Sendhilkumar. S, (2014) ont élaboré de manière lucide les facteurs vitaux affectant les performances du four rotatif pour diverses applications. Ainsi que, pour toutes les applications, l'angle d'inclinaison et la température du processus qui jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement du four. En effet, l'efficacité opérationnelle du four est basée sur divers paramètres tels que l'angle d'inclinaison, la température, la vitesse de rotation, le débit du matériau et le débit de décharge [46].

L. Le Guen et al. (2013) ont analysé le transfert de chaleur à partir d'appareils expérimentaux installés dans un réacteur à tambour rotatif à grande échelle appliqué à la production de matériaux bitumineux. L'équipement comprenant des sondes thermiques in-situ et une visualisation externe par thermographie infrarouge donne lieu à l'évaluation longitudinale des températures internes et externes. L'évaluation des coefficients de transfert de chaleur par une méthode inverse est résolue afin d'effectuer une analyse de la nageoire du mécanisme convectif à l'intérieur du tambour rotatif baffled (ou vols). Les résultats ont été discutés et comparés avec les principaux résultats de la littérature dans cette étude [47].

Montadher A. Muhammed (2012) a réalisé une étude afin de déterminer numériquement les dommages survenant dans la brique de revêtement en raison de l'ovalité et également de faire des recommandations afin de réduire les phénomènes d'ovalité et les pertes des cimenteries. De ce fait, les coûts de la corrosion du revêtement comprennent le temps d'arrêt du four, retrait de la doublure endommagée, coût de la nouvelle doublure de brique de remplacement, production réduite (environ 1000 à 1400 tonnes de clinker / jour) et dangers pour la sécurité. Enfin, l'ovalité se produit surtout sur les pneus ou aux points de tension le long de la coque du four. Ainsi, l'ovalité de la coque doit être maintenue entre  $6 \text{ cm} \pm 1$  et si l'ovalité de la coque dépasse cette limite, cela aura un effet néfaste sur la durée de vie du revêtement de la brique [48].

A.C. Caputo et al. (2011) ont donné une alternative aux méthodes traditionnelles de récupération d'énergie, la possibilité de récupérer la chaleur rayonnante perdue à travers la surface du four a été proposée dans la littérature. Pour ce faire, il peut entourer le four d'une coquille externe secondaire servant d'échangeur de chaleur pour un fluide de transfert. A cet effet, un modèle mathématique a été conçu pour le dimensionnement et l'estimation des performances d'un échangeur de chaleur récupérant la chaleur résiduelle de la surface externe des fours rotatifs est développée. L'équipement a été



configuré comme un ensemble de tubes de transport d'eau sous pression disposés dans un plan longitudinal sur la surface d'une enveloppe extérieure cylindrique coaxiale avec le four rotatif. Un exemple d'application de modèle est utilisé pour discuter du processus de transfert de chaleur en cause et de son impact sur la conception de l'équipement. Un modèle économique a également été développé pour déterminer la taille optimale de l'équipement [49].

S.B. Paramane, A. Sharma (2010) ont étudié numériquement l'écoulement libre et le transfert de chaleur par convection forcée à travers un cylindre rotatif, dissipant un flux de chaleur uniforme, pour des nombres de Reynolds de 20 à 160 et un nombre de Prandtl de 0,7. Une formule de chaleur transitoire basée sur le volume fini est proposée dans cette étude. Pour  $Re = 100$ , les raisons du début/de la suppression de l'excrétion du vortex à une vitesse de rotation critique sont étudiées en utilisant la dynamique de la vorticité. Enfin, une corélation de transfert de chaleur est proposée dans le régime d'écoulement laminaire 2D. La rotation du cylindre est une technique efficace de réduction du nombre de Nusselt ou d'amélioration de la température de la surface du cylindre [50].

I. A. S. LARSSON et al. (2009) ont étudié le processus de granulation grille-four et en particulier sur le four rotatif, avec l'objectif d'obtenir une meilleure compréhension de son aérodynamique. A cet effet, ils ont élaboré un modèle simplifié à échelle réduite d'un four à échelle réelle et ils ont effectué une analyse numérique et expérimentale du champ d'écoulement. Les conclusions sont que les simulations en régime permanent peuvent être utilisées pour obtenir un aperçu des principales caractéristiques du champ d'écoulement [51].

S. Mittal and B. Kumar (2003) ont analysé l'écoulement au-delà d'un cylindre, tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et placé dans un flux uniforme ( $Re = 200$ ) pour différents taux de rotation ( $0 \leq \alpha \leq 5$ ). Dans cette étude, la méthode d'éléments finis stabilisés est utilisée pour résoudre les incompressibles équations de Navier-Stokes dans la formulation des variables primitives. D'autre part, le flux est extrêmement complexe est associé à des instabilités bidimensionnelles et tridimensionnelles. Pour non-zéro la voie de vortex est déviée loin de la ligne centrale. Le sillage devient plus étroit et le nombre de Strouhal pour l'excrétion du vortex diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Ainsi, l'excrétion du vortex cesse au-delà de  $\alpha \sim 1.9$ . Cependant, il faut beaucoup de temps pour que le flux se développe vers la solution finale après un démarrage impulsif. C'est pour cette raison que certains chercheurs, dans le passé, ont conclu de leurs simulations que le débit à  $\alpha = 3,25$  est associé à l'excrétion du vortex. En revanche, les résultats actuels montrent que le débit atteint un état stable pour  $\alpha = 3,25$ .   des vitesses de rotation élevées, on constate que l'élévation des flux purement bidimensionnels peut être très importante. Les valeurs du coefficient de portance obtenues dans la présente étude dépassent la limite maximale basée sur les arguments de Prandtl. La distribution de la vorticité autour du cylindre passe par

certains changements intéressants avec l'augmentation de  $\alpha$ . Les solutions sont également calculées pour divers en laissant tomber les termes instables des équations gouvernantes. La stabilité de ces solutions est analysée en effectuant une analyse de stabilité linéaire globale et non linéaire. La mise en œuvre de la formulation est validée en localisant la bifurcation pour le flux au-delà d'un cylindre non rotatif. Les résultats sont en très bon accord avec ceux d'autres études [52].

Y. YANG et al. (1999) ont décrit le flux de gaz et le comportement de mélange dans un incinérateur industriel à four rotatif pour l'élimination des déchets dangereux, en utilisant un code général CFD de logiciel PHOENICS. Les résultats indiquent que le débit de gaz et le mélange à l'intérieur du four sont très compliqués. A cet effet, le flux de gaz tridimensionnel aidera à mieux comprendre la distribution hétérogène de la température à l'intérieur du four. Notons qu'ultérieurement le transfert de chaleur à l'intérieur du four sera inclus. Ainsi, les prévisions numériques fourniront des renseignements utiles pour améliorer le contrôle du processus [53].

Varun SHARMA et Amit Kumar DHIMAN ont étudié le transfert de chaleur par convection forcée pour des valeurs variables du nombre de Prandtl sur un long cylindre circulaire rotatif non confiné pour la vitesse de rotation variable ( $\alpha = 0 - 5$ ) dans la gamme de nombres de Reynolds 1 - 35 et la gamme de nombres de Prandtl 0,7 - 100 dans le régime d'écoulement régulier. A cet effet, les calculs numériques sont effectués en utilisant une méthode de volume fini basée sur le solveur CFD du logiciel FLUENT. Les modèles isothermes sont présentés pour des valeurs variables du nombre de Prandtl et de la vitesse de rotation dans le régime régulier. La variation des nombres Nusselt locaux et moyens avec le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl. Ainsi, le nombre moyen de Nusselt diminue avec la valeur croissante du taux de rotation pour la valeur fixe des nombres de Reynolds et de Prandtl. Avec la valeur croissante du nombre de Prandtl, le nombre moyen de Nusselt augmente pour la valeur fixe du taux de rotation et le nombre de Reynolds ; cependant, les valeurs plus grandes des nombres de Prandtl montrent une grande réduction de la valeur du nombre moyen de Nusselt avec une vitesse de rotation croissante [54].

S. Wirtz, et al. Ont élaboré une étude des simulations CFD d'un four rotatif à l'échelle industrielle pour la production de clinker de cimenterie. Pendant le fonctionnement du four, l'épaisseur de la couche de revêtement est inconnue, mais le profil de température systématiquement mesuré le long de la coque du four est un indicateur de l'épaisseur de la couche locale. Par conséquent, une première estimation de l'épaisseur initialement inconnue de la couche de revêtement est calculée par un modèle unidimensionnel de transfert de chaleur, basé sur le profil de température le long de la coque du four, et introduit dans les simulations CFD. Ainsi, une approche de modélisation adaptative est nécessaire pour décrire la région de revêtement solide dans les simulations CFD. Une méthode est présentée pour représenter la géométrie de la couche de revêtement comme une région bloquée pour l'impulsion et étendue pour le rayonnement. Les résultats sont



comparés à l'approche conventionnelle où la couche de revêtement est représentée par un maillage CFD hautement résolu suivant le contour de la paroi. De ce fait, Deux profils de température génériques de la coque du four sont supposés et utilisés pour simuler le profil de revêtement correspondant dans le four. Les résultats montrent que l'approche de blocage utilisée est appropriée pour modéliser le profil de limite solide supplémentaire dans le four. Les zones de revêtement ont un impact significatif sur les conditions de processus dans le four, surtout si les couches de revêtement sont situées vers l'extrémité du brûleur du four [55].

### **II.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a vu le phénomène du transfert thermique existant dans le four rotatif et l'influence de température sur la virole et le brique. Le bilan thermique du four rotatif contient les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) entre solide-paroi et gaz.

Pour étudier le phénomène thermique dans le four rotatif on fait simulation numérique utilisons le logiciel ANSYS FLUENT.

# CHAPITRE III :

## Méthode Numérique

### III.1 Introduction :

La CFD est l'une des branches de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et des algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes que posent les écoulements de fluide. La connaissance requise de la dynamique des fluides pour analyser et évaluer les résultats est importante. Les prédictions obtenues à l'aide de la CFD (Computational Fluid Dynamics) sont largement validées par des données expérimentales, présentant une grande fiabilité dans l'exactitude des résultats.

Il existe plusieurs méthodes numériques dans la mécanique des fluides et chaque méthode a ces avantages et ces inconvénients spécifiques.

- Méthode des différences finies.
- Méthode des éléments finis.
- Méthode des volumes finis.

### III.2 Méthode des différences finies :

Une discrétisation par méthode des différences finies est basée sur la forme différentielle de l'EDP (Équations aux Dérivées Partielles) à résoudre.

Chaque dérivée est remplacée par une formule de différence approximative (qui peut généralement être dérivée d'une extension de la série Taylor). Le domaine de calcul est divisé en cellules hexaédriques (la grille) et la solution sera obtenue à chaque point nodal. Cette méthode est plus facile à comprendre lorsque la grille physique est cartésienne.

La discrétisation se traduit par un système d'équations de la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, nous avons une représentation discrète de la solution [56].

### III.3 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis subdivise le domaine en sous-domaines avec certaines formes, par exemple des formes triangulaires, avec un certain nombre d'inconnues aux nœuds qui dépendent de la fonction de forme sélectionnée. La fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible.

Cette méthode se décompose en deux étapes :

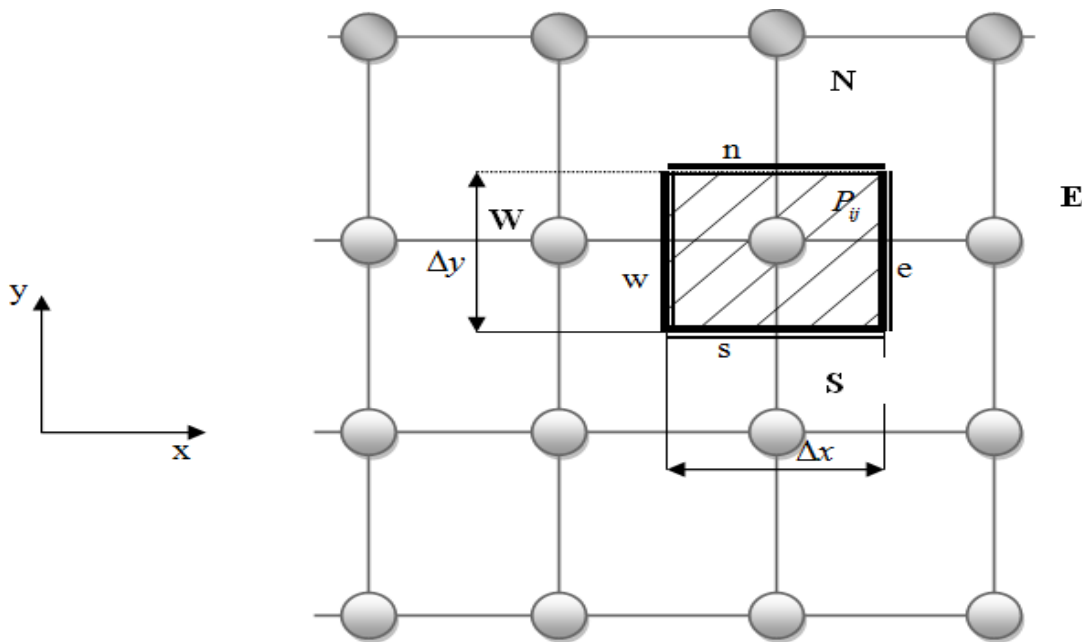
- approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines (fonctions d'interpolation).
- utilisation de la méthode des résidus pondérés qui permet de construire une formulation intégrale à partir des équations aux dérivées partielles [56].

### III.4 La méthode des volumes fini

#### III.4.1 principe de la méthode des volumes finis

la méthode des volumes finis implique les étapes suivantes:

- Décomposition du domaine du problème en volumes de contrôle.
- Formulation d'équations d'équilibre intégral pour chaque volume de contrôle.
- Approximation des intégrales par intégration numérique.
- Approximation des valeurs de fonction et des dérivées par interpolation avec valeurs nodales.
- Assemblage et solution du système algébrique discret.



**Figure (III.1) : Discrétisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel**

Où :

E: Nœud « East »; W: Nœud « West »; N : Nœud «North »; S : Nœud « South »; P: Nœud considéré ; w : interface « West » du volume de contrôle (VC) ; e: interface « East » du VC ; n: interface « North » du volume de contrôle (VC) ; s: interface « South » du volume de contrôle (VC) ;  $\Delta x$  : largeur du VC étudié ;  $\Delta y$  : longueur du VC étudié [56].

#### III.4.2 Équations gouvernantes :

Les équations gouvernantes sont présentées sous la forme différentielle, qui a été dérivée en considérant un volume de contrôle fixe infiniment petit. Ces équations de conservation (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont des équations aux dérivées partielles non linéaires, les analyses différentielles des écoulements de fluides et de

transfert de chaleur ne peuvent être résolues numériquement qu'en utilisant un code CFD (par exemple ANSYS FLUENT ou ANSYS CFX,....).

- **Conservation de la masse**

L'équation de conservation de la masse représente le taux de variation de masse dans un élément fluide .Elle est égale au débit net de la masse dans l'élément fluide exprimée par:

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

- **Conservation de quantité de mouvement**

L'équation de conservation de quantité de mouvement sans forces de volume est donnée par la relation suivante :

➤ Selon la coordonnée radiale :

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

➤ Selon la coordonnée axiale :

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

- **Équation de conservation d'énergie**

Pour un écoulement compressible, l'équation de conservation de l'énergie donnée par l'expression suivante :

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

- **Principales méthodes d'approches pour la turbulence [57] :**

Les principales approches pour étudier numériquement la turbulence sont :

La D.N.S : Simulation Numérique Directe ( Direct Numerical Simulation).

La L.E.S : Simulation des grandes échelles (ou structures) (Large Eddy Simulation)

La R.A.N.S : Équations de Navier Stokes Moyennées (Reynold Averaged Navier Stokes).

- **Simulation numérique directe (DNS)**

La simulation numérique directe (DNS) résout toutes les fluctuations spatiales et temporelles sans nécessiter de modélisation, mais elle est extrêmement coûteuse en termes de calculs et se limite à des géométries simples.

- **simulation des grandes échelles (LES)**

La simulation des grandes échelles (LES) a été initialement proposée pour simuler les écoulements atmosphériques dans les années 1960. Avec le développement des machines de calcul, cette méthode est devenue la plus prometteuse et efficace pour simuler les écoulements turbulents notamment les écoulements d'ingénierie complexes.

- **Équations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, R.A.N.S)**

La résolution numérique des équations de Navier stokes moyennées (RANS) considère uniquement les équations de transport pour les quantités moyennées, en modélisant toutes les échelles de la turbulence. Cette approche, qui ne résout que les variables moyennées, réduit les efforts de calcul. Vu la complexité de la turbulence, il est peu probable qu'un modèle RANS serait capable de capter toutes les échelles de la turbulence. Ainsi, dans les modèles RANS on a souvent recours au traitement de ces problèmes par les méthodes statistiques.

- **Choix du modèle de turbulence :**

Le choix du modèle de turbulence dépend de considérations telles que la physique englobée dans les écoulements, le niveau de précision requis, les ressources de calcul disponibles et la quantité de temps disponible pour la simulation. Pour faire le choix le plus approprié du modèle pour l'application, il faut comprendre les capacités et les limites des différentes options.

ANSYS Fluent fournit les choix suivants de modèles de turbulence :

Le modèle ( $k - \varepsilon$ )

Les modèles ( $k - \omega$ )

Les modèles de Transition SST [58]

- **Modèles du premier ordre :**

- Modèle de turbulence à zéro équation de transport
- Modèle de turbulence à une équation de transport : le modèle *Spalart-Allmaras*
- Modèles de turbulence a deux équations: le modèle ( $k - \varepsilon$ ) Standard et ses variantes (RNG , Realizable , les modèles ( $k - \omega$ ) Standard et SST)

- **Modèles du deuxième ordre :**

- Modèle de turbulence aux tenseurs de Reynolds: le modèle RSM (Reynolds Stress Model)

- **Le modèle  $k - \varepsilon$**

Il s'agit d'un modèle à deux équations dans les modèles RANS, ce qui signifie que deux équations de transport doivent être résolues, une pour l'énergie cinétique turbulente  $k$  et une pour la dissipation turbulente  $\varepsilon$  qui représente le taux de dissipation de  $k$ .

Le modèle  $k - \varepsilon$  est le modèle de turbulence le plus utilisé. Il peut résoudre un large éventail de flux pertinents pour l'industrie sans modifier les constantes du modèle.

- **Modèle  $k - \varepsilon$  standard**

Le modèle standard  $k - \varepsilon$  est un modèle qui est basé sur la résolution des équations de transport de l'énergie cinétique turbulente  $k$  et de son taux de dissipation  $\varepsilon$ . L'écoulement est supposé entièrement turbulent et les effets de la viscosité moléculaire sont :

- **Le modèle  $k-\omega$  standard**

Le modèle  $k-\omega$  est adopté pour l'estimation de la viscosité turbulente  $\mu_t$ .

- **Le modèle  $k-\omega$  SST :**

Le modèle  $k-\omega$  SST est décrit à travers un ensemble d'équations de transport qui comprennent des termes pour la génération, la diffusivité effective et la dissipation de  $k$  et  $\omega$ , ainsi qu'un terme de diffusion croisée qui réunit les modèles  $k-\omega$  et  $k-\varepsilon$ .

### III.5 Description du problème :

Une étude numérique réelle sur le transfert thermique dans les fours rotatifs : convection naturelle, convection forcé, conduction et rayonnement est faite dans ce projet. Cette étude a un but de déduire la température de la virole nous avons utilisé la méthode des volumes finis dans logiciel (ANSYS FLUENT).

Le four étudié dans ce projet d'usine (LA FARGE OGGAZ –sig MASCARA) figure (III.2) avec dimensions présentés dans le tableau (III.1), phénomène que j'ai vécu dans mon stage pratique.



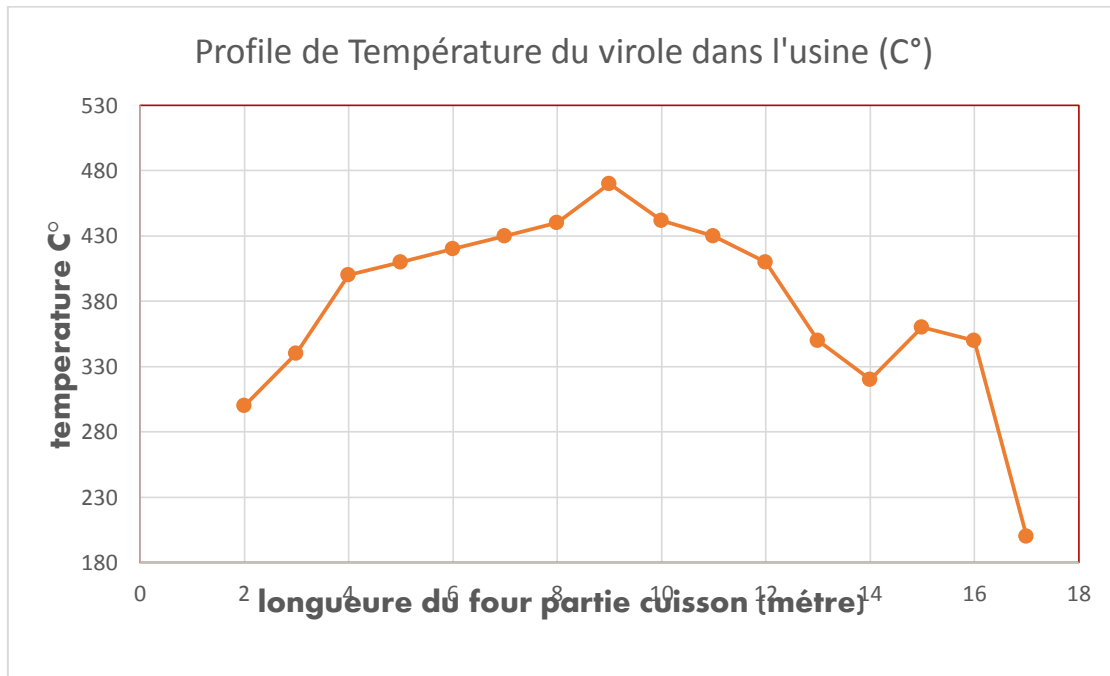
Figure (III.2) : FOUR ROTATIF d'usine (LA FARGE OGGAZ –sig MASCARA)

Dimensions du four	valeur
Longueur	80 m
Longueur de la partie cuisson	17 m
Diamètre	5 m
Epaisseur de virole	30 mm
Epaisseur de brique	220 mm
Inclinaison	2.29°

**Tableau (III.1) : Les dimensions du four rotatif d'usine (lafarge).**

Cette étude est réalisée avec un modèle mathématique (3D). Le domaine cube est considéré comme un fluide. Le centre du four placé à 20 (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 40 (m).

L'étude est basée sur le transfert de chaleur à l'intérieur du four 1350 C° jusqu'à la paroi extérieure. Notre but c'est déterminer les valeurs de température de la virole qui correspond à chaque vitesse d'injection d'air chaud du bruleur, vitesse d'injection d'air imposées et température d'entrée de la partie cuisson.



**Figure (III.3) : profile de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d'usine (lafarge).**



### III.5.1 Mise en œuvre de la simulation dans ANSYS :

- **Présentations du logiciel ANSYS :**

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps). Les industriels conçoivent des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Généralement, les logiciels de calcul par éléments finis sont très peu abordables et nécessitent d'importantes connaissances en calcul. L'interface Workbench d'ANSYS qui englobe les différents niveaux de l'outil de simulation et les différents modules a été conçue pour être utilisée sans avoir nécessairement une formation basée sur les éléments finis :

- L'interface est très intuitive offrant une prise en main très rapide du logiciel.
- L'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage facilitent la préparation du modèle.

### III.5.2 Les avantages de la simulation numérique :

- La simulation numérique permet la réduction du temps de la conception (design) et du développement d'un projet donné.
- En simulation numérique l'obtention de toutes les variables dans la totalité du domaine de calcul est réalisée avec un minimum d'efforts.
- La conduite d'une étude numérique devient de plus en plus économique et abordable grâce aux moyens de calculs contrairement aux études expérimentales indispensables mais parfois très coûteuses.
- L'investigation numérique est de moins consommatrice d'énergie puisque les calculateurs deviennent de plus en plus rapides et les méthodes de calcul plus élaborées et efficaces.

### III.5.3 Modélisation dans ANSYS :

L'analyse du problème du comportement thermique d'un four rotatif de cimenterie, Est faite par des équations d'énergie dans ANSYS est mécanique des fluides (FLUENT). Ce programme à rendement élevé et d'usage universel de mécanique de fluides qui a été appliqué pour résoudre des problèmes thermiques [59]. Et sa technologie avancée permet de réaliser des solutions fiables et précises.

Ce modèle est tellement complexe qu'il prend beaucoup de temps. il faut simplifier le modèle pour obtenir une solution assez précise. L'ensemble Virole et brique réfractaire sera modélisé...

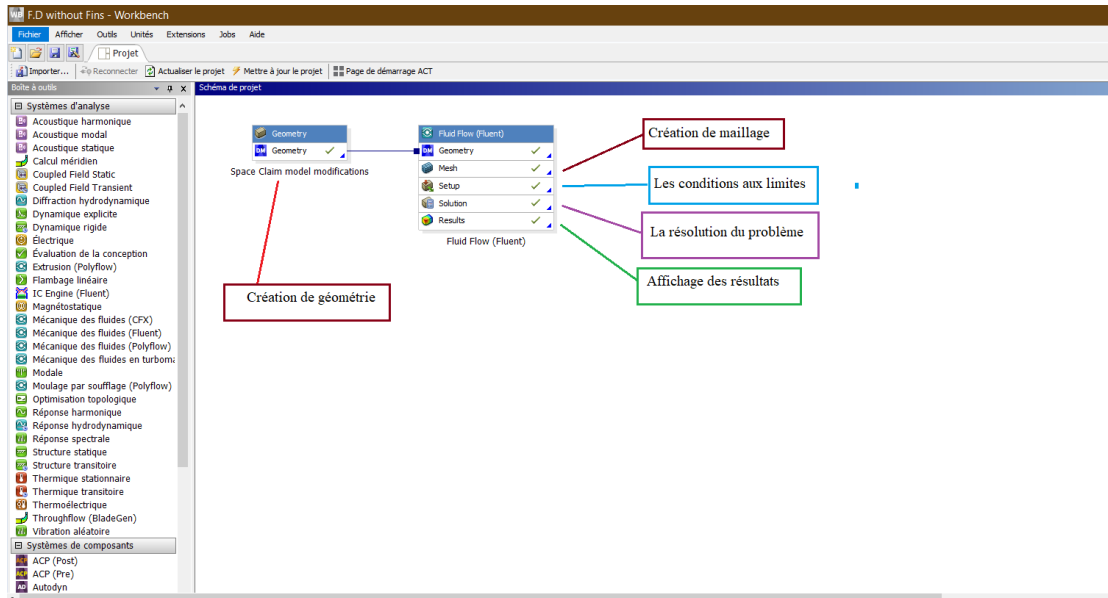


Figure (III.4) : définition du domaine étudié dans Workbench.

1- Création de géométrie :

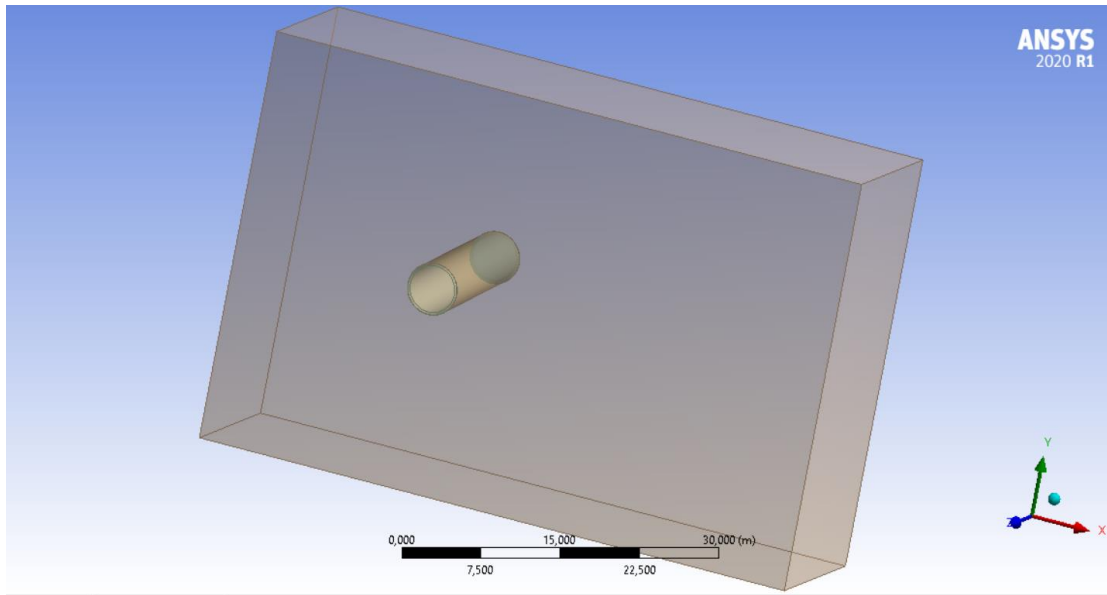


Figure (III.5) : géométrie

2- Préparation de maillage :

Le maillage n’influence pas uniquement la précision de solution, mais aussi la convergence et sur la machine de calcul. Le choix de type de maillage se fait en fonction de la géométrie et du problème physique à résoudre.

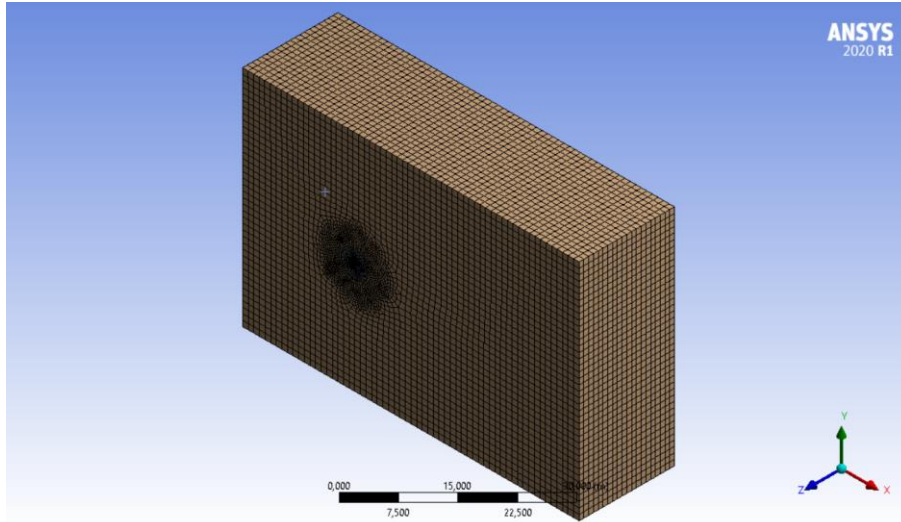


Figure (III.6) : maillage quadratique.

➤ Optimisation du maillage :

La qualité des résultats de simulation est très liée au modèle utilisé. Le choix du modèle est subordonné au type d’information que nous voulons obtenir à partir de la simulation.

Nombre des éléments	Nombre des nœuds
98678	100400
198145	210110
203011	301896

Tableau III.2 : Paramètre de maillage.

➤ Trois sensibilités de maillage ont été effectuées, nous avons adopté le maillage uniforme raffiné près de la paroi de four rotatif. Les 3 maillages ont les mêmes résultats sauf la déférence dans la durée du temps de calcul ...donc on a choisi 98678 éléments car la durée est petite.

3- Conditions aux limites :

La condition aux limites dans notre étude numérique selon les conditions réelles dans l’entreprise :

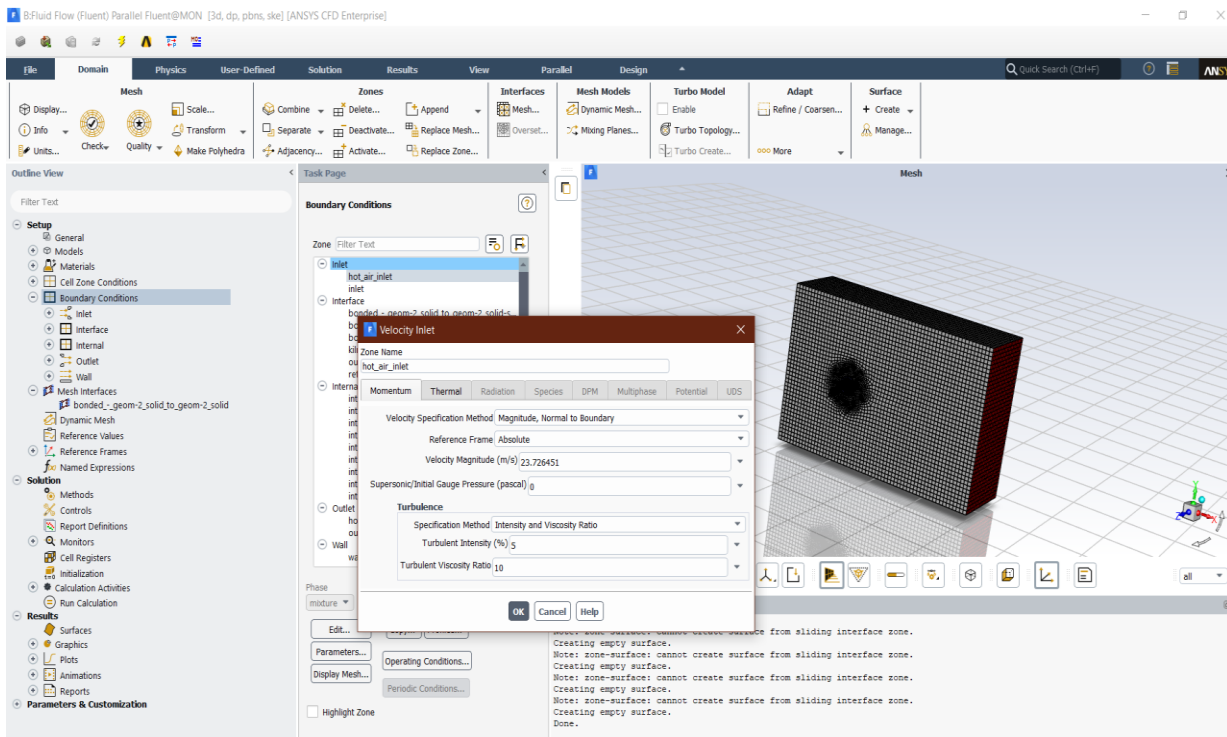
➤ Les conditions aux limites de la partie cuisson du four (17 m) :

Les conditions aux limites de la partie cuisson sont :

Caractéristique	valeur
Vitesse d'injection d'air	5 m/s
Température d'air d'injection	18 C°
Température d'entrée de la partie cuisson	1350 C°
Température de sortie du de la partie cuisson	1450 C°
Vitesse d'injection d'air chaud du bruleur à l'entrée de matière du four	23.47 m/s
Vitesse de rotation du four	4 tr /min

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

L'interface de conditions aux limites dans l'ANSYS (fluent) :



**Figure (II.7) : Conditions aux limites du modèle dans ANSYS.**

4-lancement de calcul :

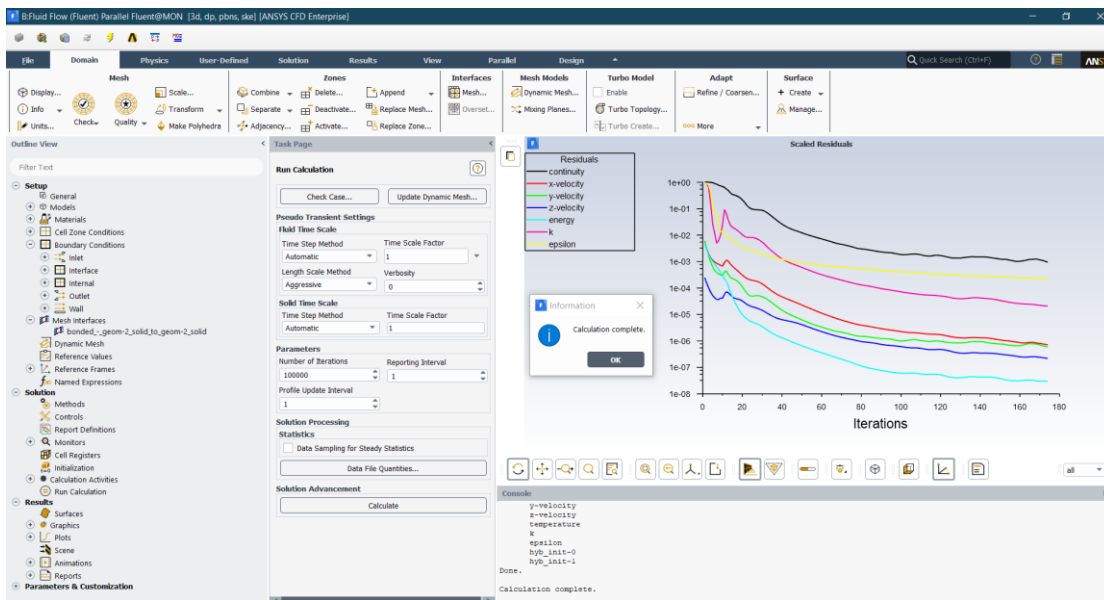


Figure (II.8) : lancement de calcul.

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des outils numériques utilisés pour la résolution de notre problème à savoir workbench ANSYS Fluent. Les différentes méthodes numériques de discrétisation telle que la méthode des volumes finis, ainsi que, la modélisation de la turbulence et les étapes de faire la simulation. Les résultats et leurs interprétations seront détaillés dans le chapitre suivant.

# CHAPITRE VI :

## Résultats et discussion

### IV.1 Introduction :

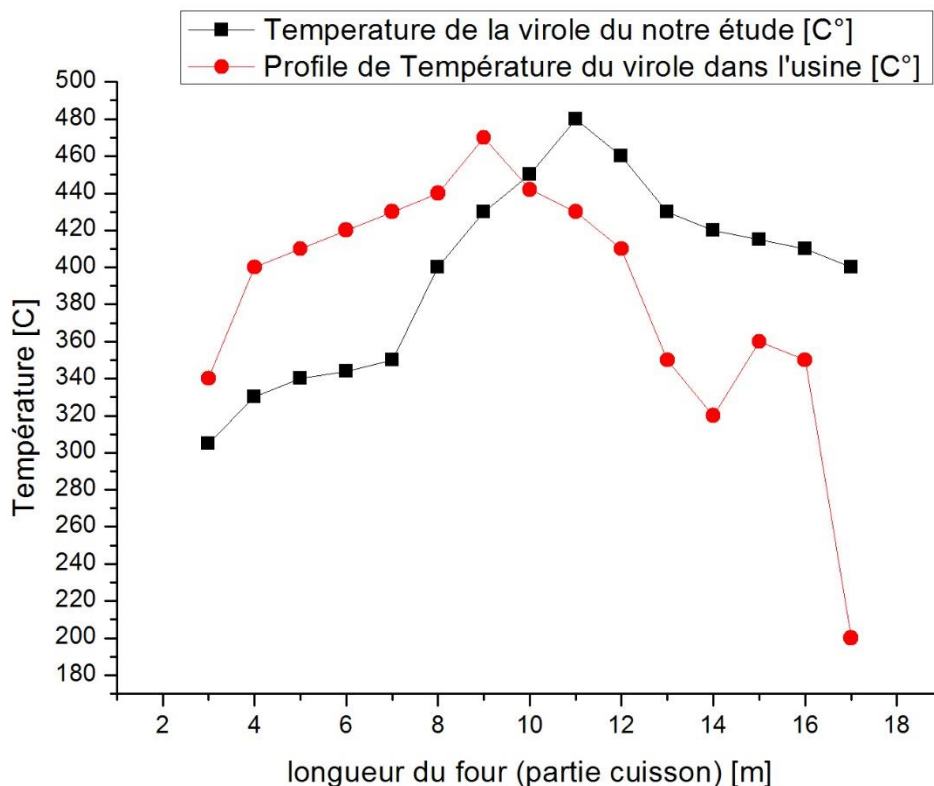
Ce chapitre est consacré pour la présentation de notre cas d'étude qui consiste à déterminer la valeur de température dans la virole. Dans un deuxième temps, la même virole sera reproduite avec les mêmes conditions aux limites en ajoutant des ailettes à la surface pour déduire l'effet de ces ailettes. Dans ce travail, on a utilisé le code de calcul ANSYS FLUENT.

### IV.2 Résultats et discussion :

Les résultats obtenus par la simulation numérique réalisée sous le logiciel ANSYS CFD sont représentés. La variation de température intérieur du four, la variation de température ambiante, l'effet de variation de vitesse du bruleur (air chaud) sont discutés.

### IV.3. La validation :

Comme première étape, on passe par une validation pour donner une crédibilité à ce travail. La figure VI.1 montre les valeurs de températures de notre étude comparée par rapport les valeurs de températures de salle de commande de l'usine OGGAZ (LAFARGE-sig mascara).



**Figure (IV.1) : la validation des températures de la virole de notre étude par rapport celle de l'usine.**

### IV.4 Description de résultats :

Il y a une convergence de comparaison entre le résultat de notre étude et le profil de température de l'usine. On remarque aussi il y a une augmentation de température de notre

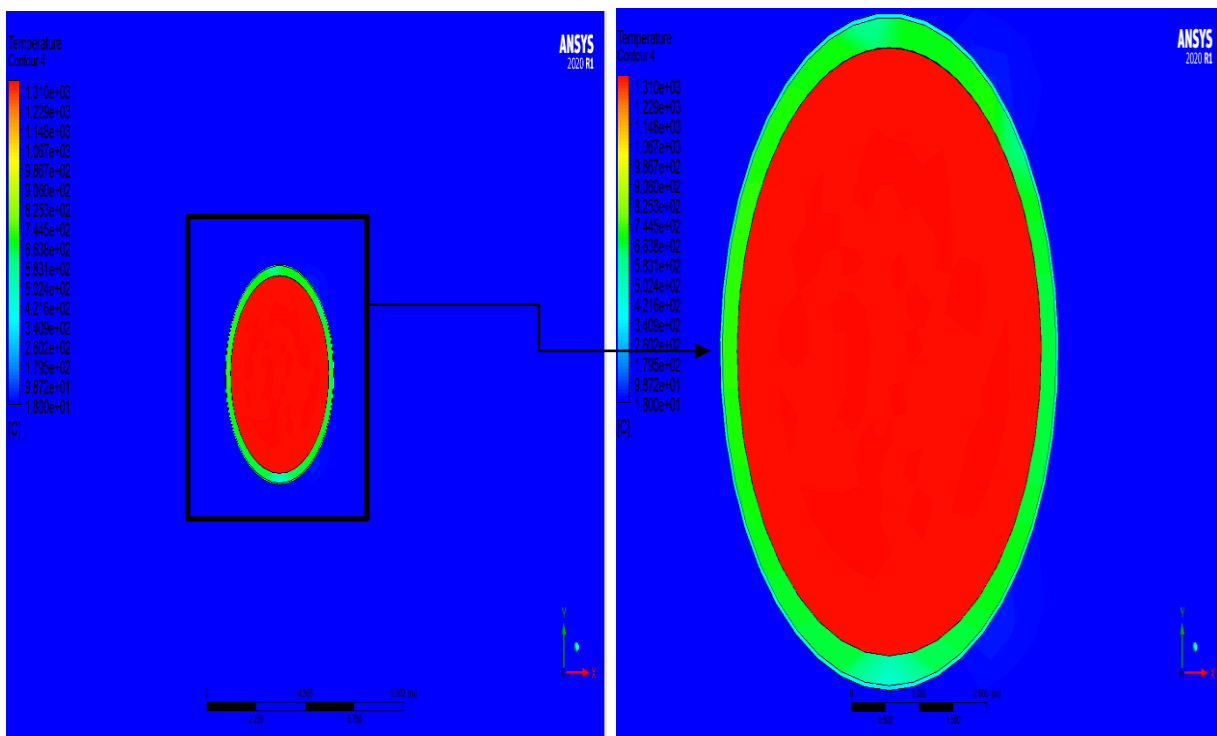


étude jusqu'à 480 (C°) celle de température de l'usine jusqu'à 470 (C°) et après une diminution de température des deux graphes.

Il existe de 10% à 15% d'erreurs maximale à notre étude par apport la validation car notre étude c'est simulation numérique et l'autre c'est un phénomène réel.

#### IV.4.1 Contour de température (section du four) :

Figure IV.2 montre la distribution de température à l'intérieur et à la couche de brique ainsi à la couche de virole du four du four rotatif. On constate que la température est maximale à l'intérieur, elle atteint 1350(C°) et la paroi de brique atteint de 700(C°) jusqu'à 800(C°), et la paroi de virole atteint environ(C°).



#### IV.4.2 Contour des lignes de courant :

La figure IV.3 montre la distribution des lignes de courant, on remarque que le contact des particules d'air chaud avec la paroi de brique provoque une diminution de la vitesse jusqu'à l'extérieur. On remarque que le contact des particules d'air avec la paroi de four rotatif. Dans les points de séparation situés derrière la virole, on observe l'apparition des vortex due à l'écoulement turbulent lors de la séparation de la paroi de virole.

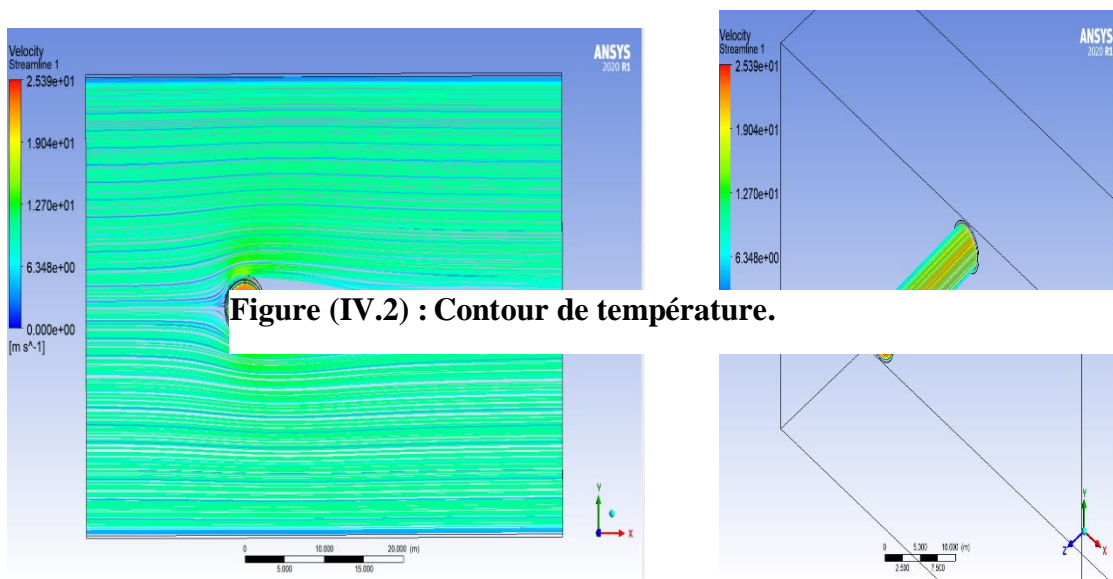


Figure (IV.2) : Contour de température.

Figure (IV.3) : Contour des lignes de courant.

#### IV.4.3 Contour de pression :

La figure VI.4 montre la répartition de la pression autour de l'intérieur, brique, virole de four rotatif. On remarque que la pression est maximale au point de stagnation où elle atteint 61.37 Pa, la pression à ce point est supérieure à la pression atmosphérique et à l'intérieur du four aussi. Ensuite, la pression diminue jusqu'aux points situés en haut et en bas du four où devient presque nulle, puis elle augmente légèrement et revient à la pression atmosphérique.

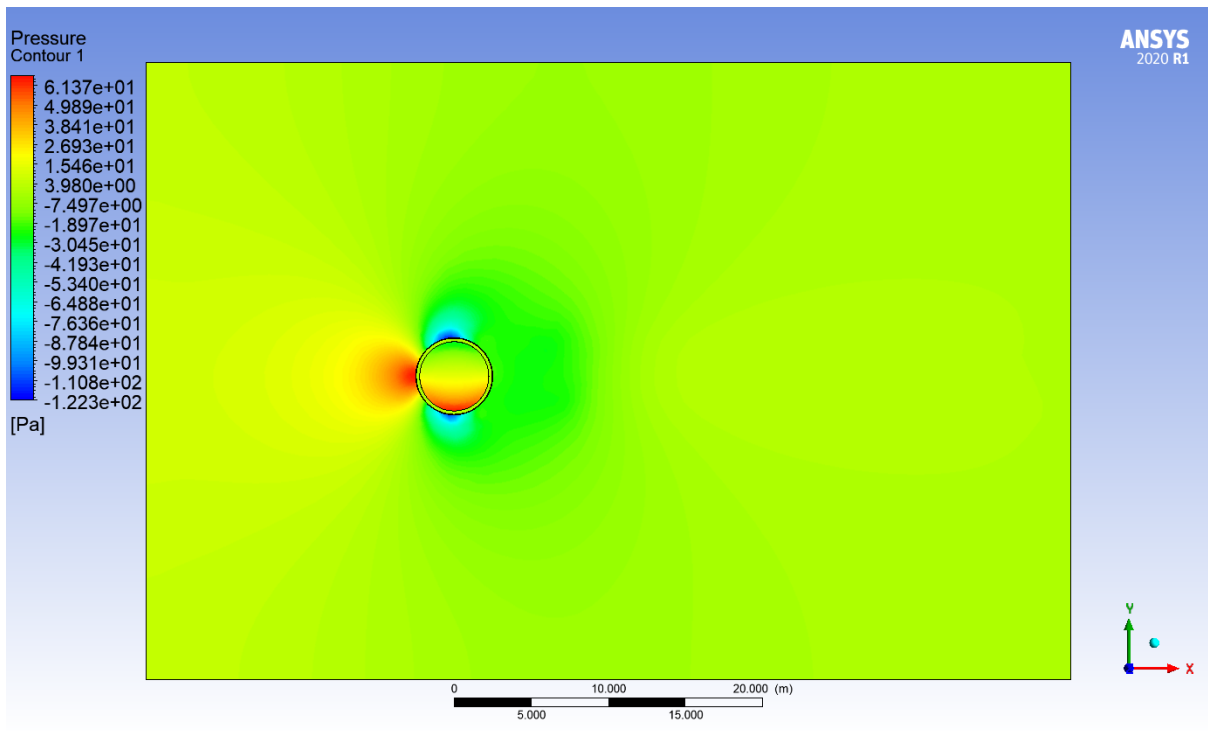


Figure (IV.4) : Contour de pression.

**IV.4.4 Variation des paramètre (vitesse et température) dans une virole lisse :**

Une étude thermique a été effectuée pour déduire les différents aspects influents sur la température de virole du four rotatif. Plusieurs vitesses d’injection d’air chaud, température l’intérieur du four et température d’air ambiant de four ont été imposées. Un plan de la longueur du four (partie cuisson) a été désignée comme référence d’extraction des résultats.

- **Variation de la vitesse d’injection d’air chaud de bruleur :**

Le but de ce cas d’étude est de déterminer l’effet de la vitesse d’air d’injection sur le comportement thermique de la virole. Cinq essais ont été effectués, on a varié la vitesse d’air chaud de 13.74 m/s à 53.74 m/s pour déduire la valeur maximale de température de la virole.

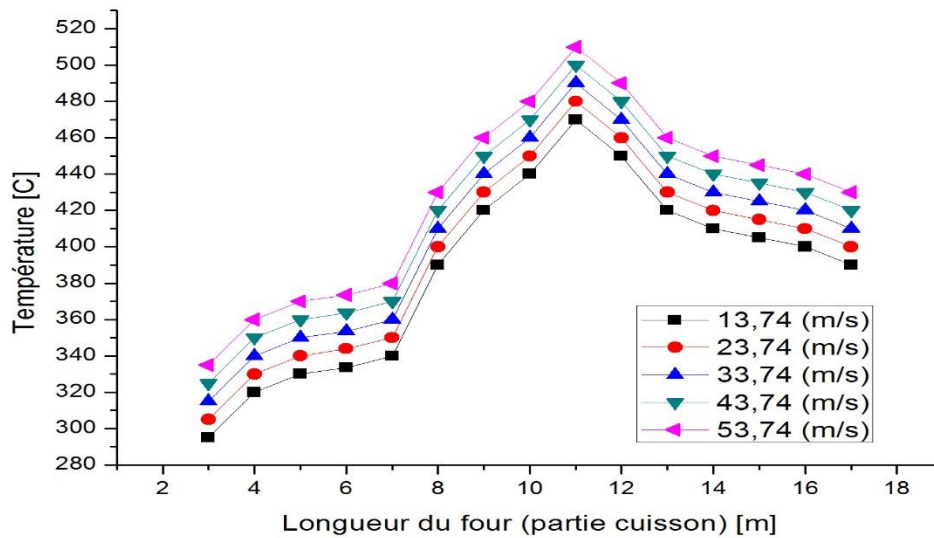
- **Evolution de la température de la virole :**

Cette étape consiste à déduire l’effet de la vitesse d’air chaud sur la température maximale de la virole. Le tableau IV.1 montre l’évolution de la température en fonction de la vitesse d’air chaud. La température augmente relativement avec quand on augmente la vitesse d’injection d’air chaud du bruleur.

Vitesse d’air chaud (m/s)	13.74	23.74	33.74	43.74	53.74
Température de la virole (°C)	470	480	490	500	510

Tableau IV.1 : Température de virole en fonction de la vitesse d’injection d’air.

La figure IV.5 montre la variation de la température de la virole en fonction de différentes vitesses d'injection d'air chaud. Les profils de température ont la même tendance et la même forme. La température augmente de virole augmente de 10 C° (de 23.74 m/s à 33.74 m/s).



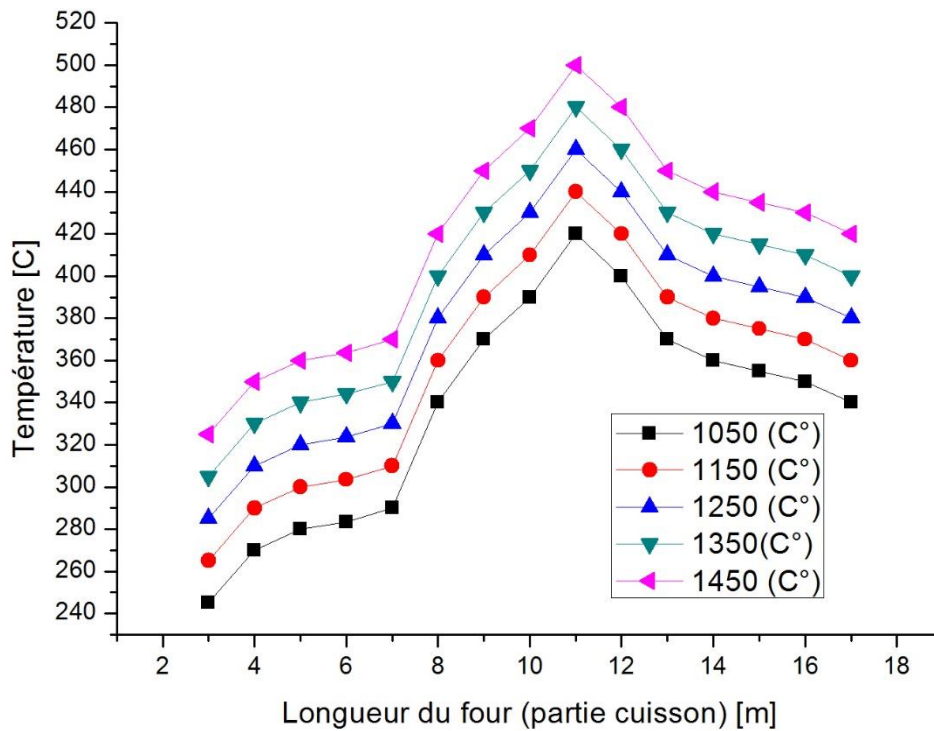
**Figure (IV.5) : Evolution de la température de la virole en fonction de la vitesse d'air chaud.**

- **Variation de température intérieur du four :**

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'air chaud du bruleur.

Température intérieur du four (C°)	1050	1150	1250	1350	1450
Température de la virole (°C)	416	436	456	476	496

**Tableau IV.2 : Température de la virole en fonction de Température intérieur du four.**

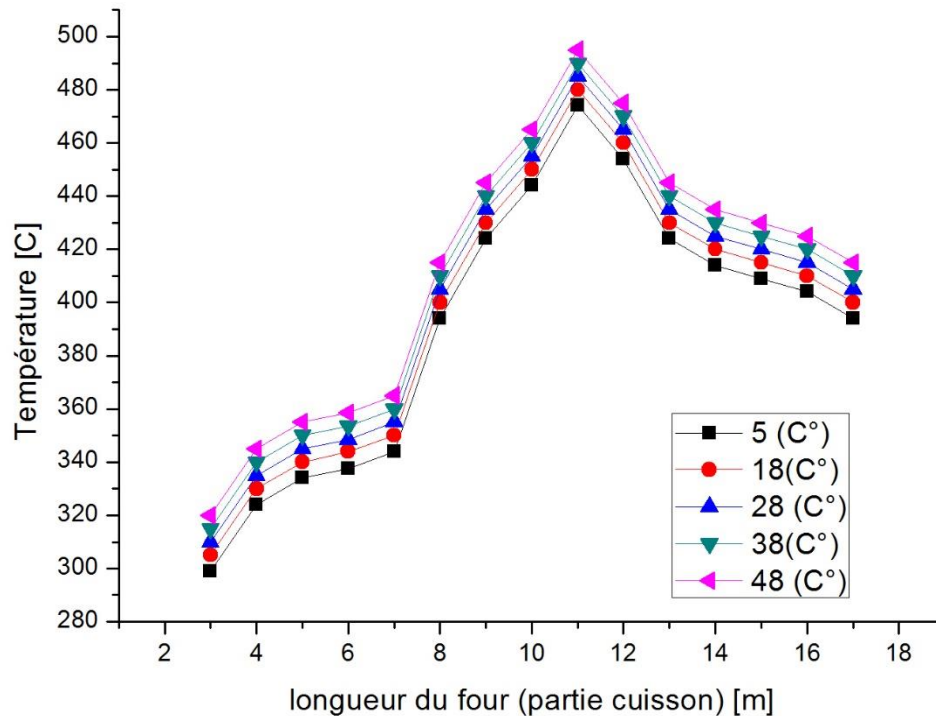


**Figure (IV.6) : Température de la virole en fonction de température intérieure du four**

La figure IV.6 représente la variation de la température maximale de la virole en fonction de température d'air chaud, On remarque une augmentation de 20 C° (de 1350 °C à 1450°C) de la température de la virole.

- **Variation de température de virole en fonction de température d'air ambiant :**

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'injection d'air ambiant.



**Figure (IV.7) : Température de la virole en fonction de la température d'air ambiant.**

La figure IV.7 représente la variation de la température maximale de la virole en fonction de température d'air ambiant, On remarque une augmentation de 5 C° (de 18°C à 28°C) de la température de la virole.

#### IV.5 Virole muni d'ailettes :

Dans le but de déterminer l'effet de la surface d'échange sur la température de la virole de four rotatif, ce cas d'étude travail fait partie à l'analyse thermique d'une virole ailetée représentée dans la figure IV.8.

La figure IV.8 montre la nouvelle géométrie de la virole de four rotatif étudié, elle est munie de 72 ailettes de 1m de longueur, 15 cm de largeur, et 15 cm de la hauteur devisés dans la partie cuisson du four (la figure IV.8. ). On a pris les mêmes conditions aux limites celle de réelle modèle pour déduire l'effet de ces ailettes sur la température de la virole.

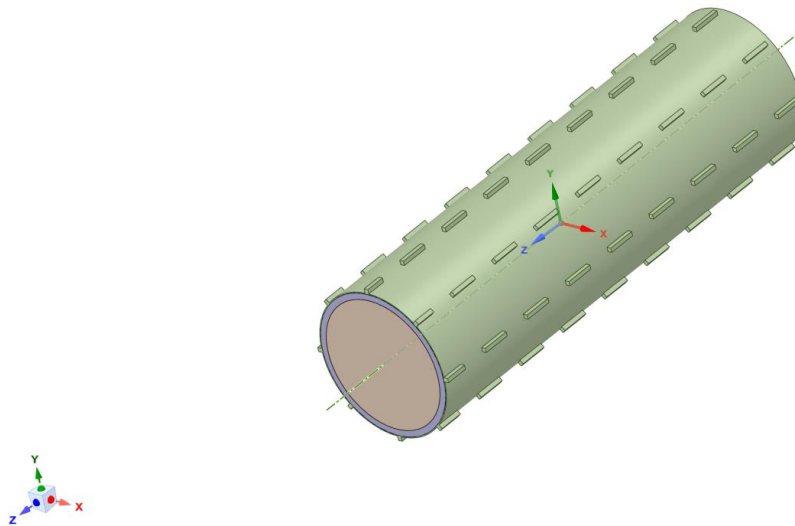


Figure (IV.8) :four avec 72 ailette.

**IV.6 Distribution de température :**

Figure IV.9 montre la distribution de température autour la virole de four rotatif. On constate que la température diminue brusquement après l’insertion des ailettes.

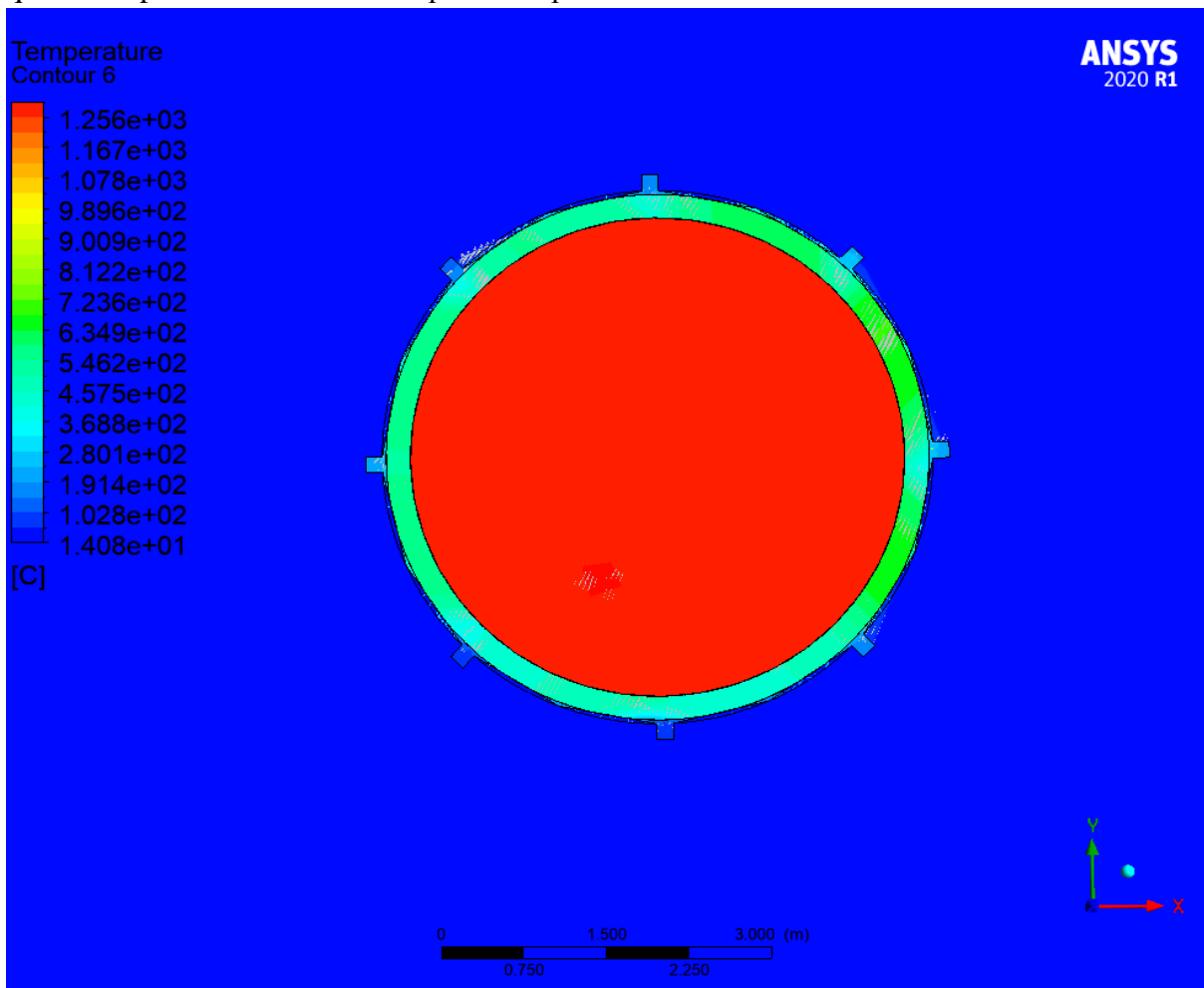


Figure (IV.9) :contour de température de virole avec les ailettes.



### IV.6.1 Distribution des lignes de courant :

La distribution des lignes de courant est représentée dans la figure IV.10. On remarque que la collision des particules d'air avec le four rotatif provoque une augmentation de la vitesse à l'amant de la virole, on observe aussi l'apparition des vortex plus nombreux que celle de cas lisse, ces vortex proviennent de la turbulence de l'écoulement derrière de la virole ailetée.

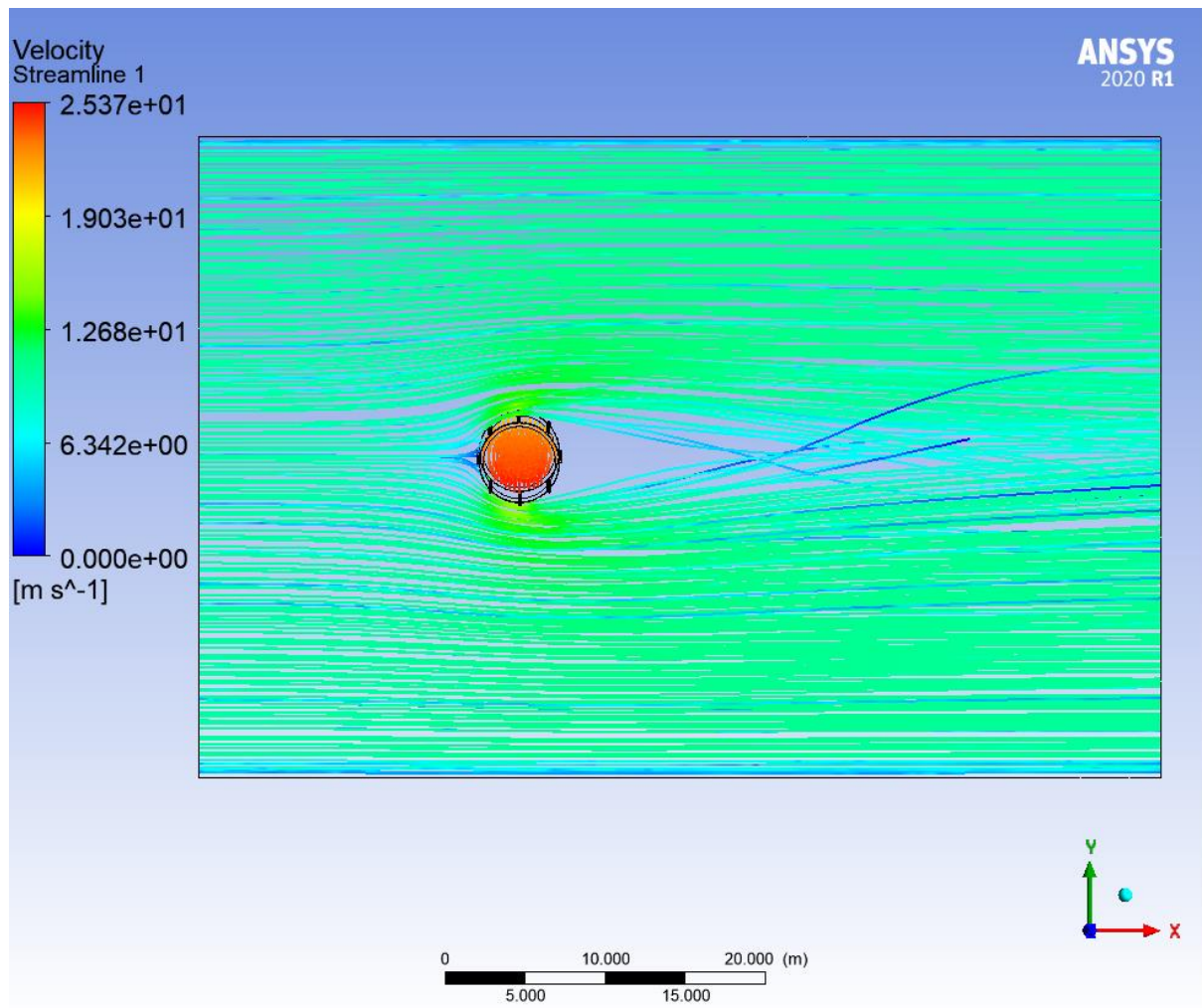


Figure (IV.10): Contour des lignes de courant de la virole avec les ailettes.

### IV.6.2 Variation de la vitesse d'injection d'air chaud de bruleur :

Pour les mêmes conditions de cas de la virole lisse. Cinq essais ont été effectués pour déduire la valeur maximale de température de la virole.



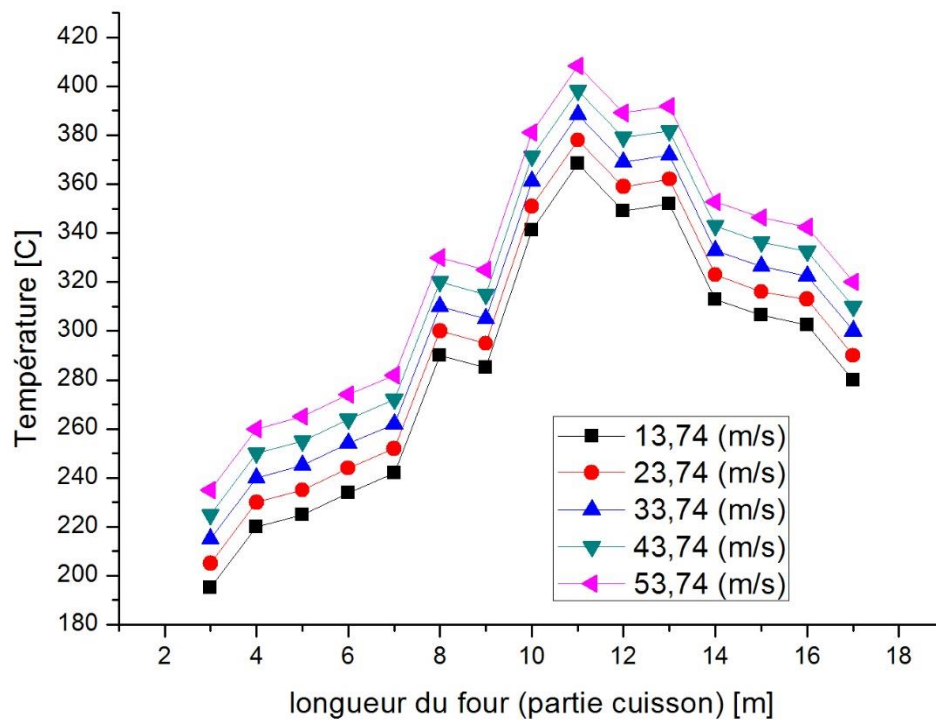
### IV.6.3 Evolution de la température de la paroi :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.3. L'augmentation de la vitesse d'air d'injection provoque une diminution légère de la température de la virole ailettée contrairement au cas de la virole lisse, où la température diminue d'une façon considérable.

Vitesse d'air chaud (m/s)	13.74	23.74	33.74	43.74	53.74	
Température de la virole (°C)	485	490	395	400	405	

**Tableau IV.3 : Température de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air chaud.**

La figure IV.11 montre la variation de la température de la virole ailettée en fonction de différentes vitesses d'injection d'air chaud. Les profils de température ont la même tendance due à la position de ligne d'extraction des résultats.



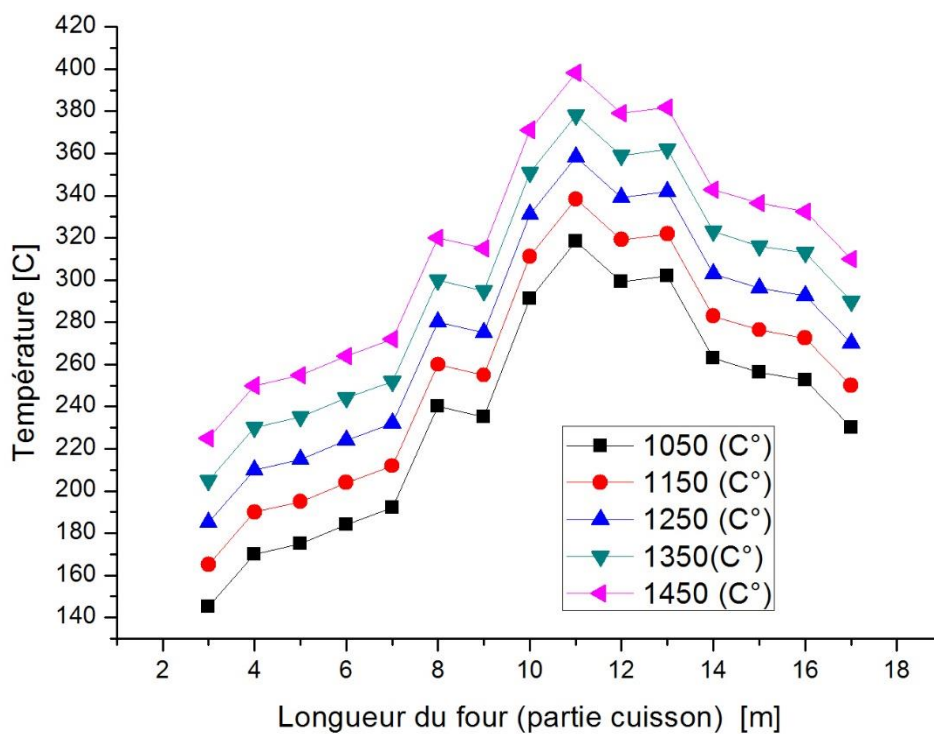
**Figure (IV.11) : la température de la virole avec les ailettes en fonction de la vitesses d'air chaud.**

**IV.6.4 Variation de température intérieur du four :**

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'air chaud du bruleur.

Température intérieur du four (C°)	1050	1150	1250	1350	1450
Température de la virole (°C)	318	338	358	378	398

**Tableau IV.4 : la variation de la température de virole avec les ailettes en fonction température intérieur du four.**

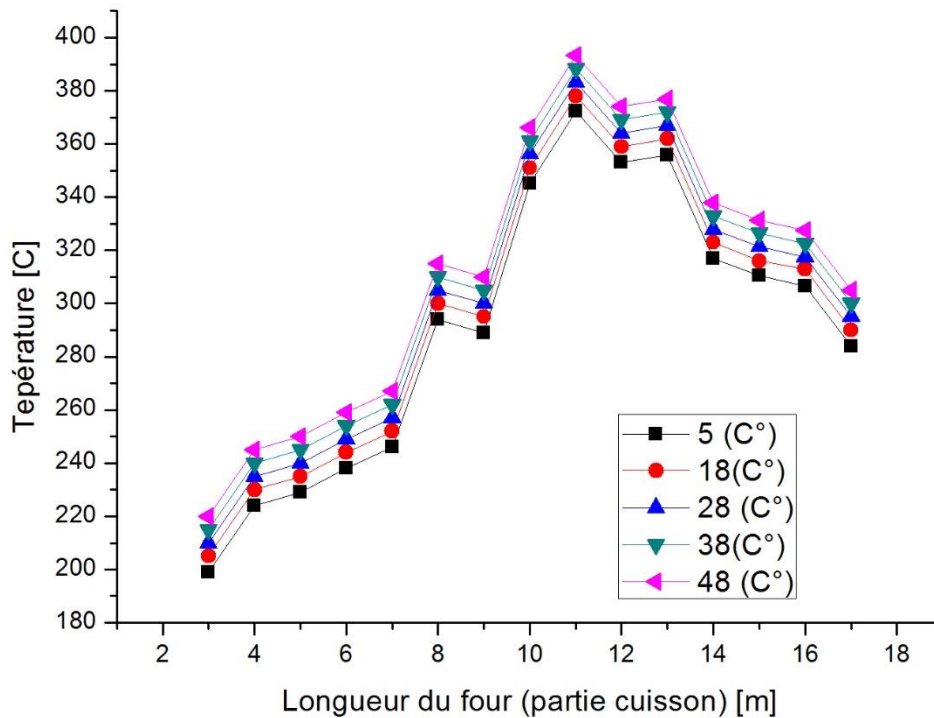


**Figure (IV.12) : la variation de la température de virole avec les ailettes en fonction de température d'air ambiant.**

La figure IV.12 représente la variation de la température maximale de la virole ailettes en fonction de température d'air chaud.

#### IV.6.5 Variation de température intérieur du four :

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'injection d'air d'environnement.

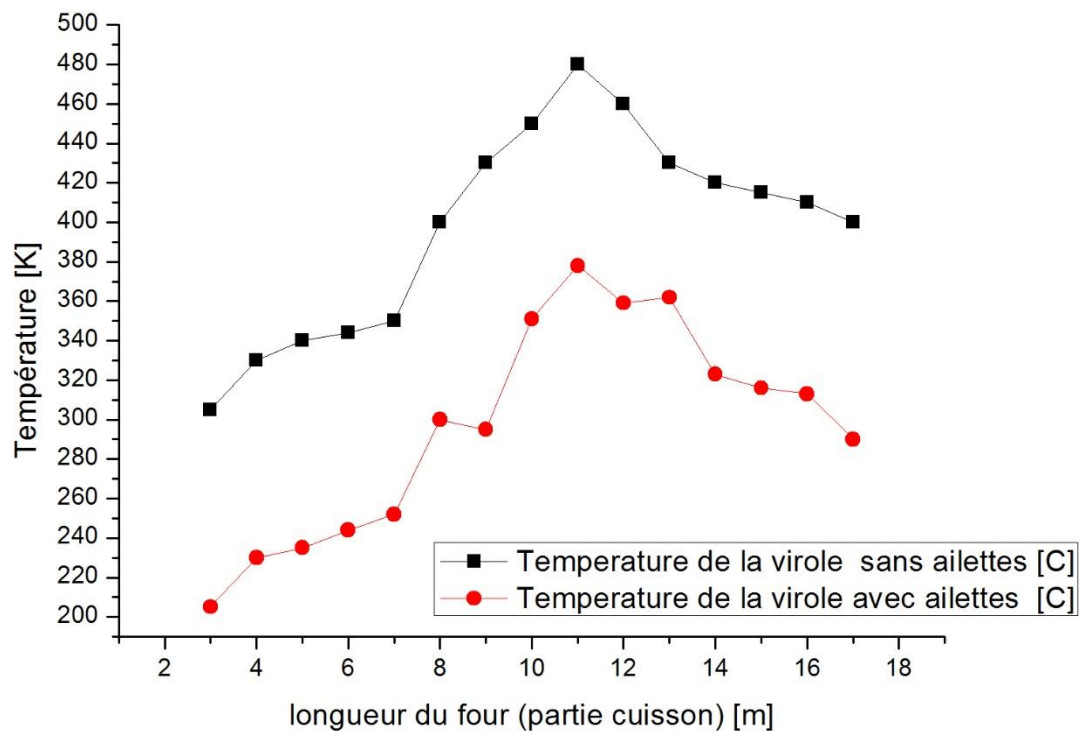


**Figure (IV.13) : variation de température de la virole en fonction de la température d'air ambiant**

Afin de déduire l'effet d'insertion des ailettes sur la température de la virole du four, ont effectué une comparaison entre les deux cas d'étude.

#### IV.7.1 La température de la virole avec les ailettes :

Nous avons effectué une comparaison de l'évolution de la température de la virole dans les deux cas : une virole lisse et une virole ailetée. La figure IV.14 représente l'évolution de la température des deux cas cités précédemment. On remarque que l'insertion des ailettes provoque une diminution de la température de la virole, elle diminue 98 C° dans le point critique de (de 476°C à 378 °C)



**Figure (IV.14) : La comparaison entre la température de la virole et la température de la virole avec les ailettes.**

#### IV.8 Conclusion :

L'augmentation de la vitesse d'injection d'air chaud provoque une augmentation de la température de la virole lisse de (10 C°), ainsi la température l'intérieur du four démunissions (20C°) de la température de la virole mais la vitesse d'air de l'environnement influence juste (5 C°) de la température de virole.

L'insertion des ailettes sur la virole contribuée par une diminution considérable de la température de la virole (une nette diminution de 98 C° de 401 °C à 164 °C). Cependant, L'augmentation de la vitesse d'injection d'air n'a pas un effet important sur la température de la virole ailette. Donc les ailettes provoquent un refroidissement très importante et satisfaite de la virole.

# Conclusion Générale

La présente étude est une modélisation et simulation dans ANSYS(FLUENT) Workbench. La géométrie et les conditions aux limites ainsi que les conditions d'exploitation sont utilisées selon le modèle réel qui existe dans l'usine de cimenterie. Ce qui a permis de valider les résultats numériques. La validation était dans le cadre d'un stage pratique au sein de la Société des Ciments de (LAFARGE oggaz). Le relevé des températures est fait au niveau de la salle de contrôle et de surveillance. L'écart est dû au fait qu'il y a une différence entre le modèle numérique et le phénomène réel.

Dans le quatrième chapitre on a refait la simulation en variant premièrement la température intérieure du four, on remarque qu'on la diminuant la température extérieure de la virole diminuée de 20°C. La deuxième variation c'est celle de la vitesse d'air chaud à l'intérieur du four, on remarque qu'on augmentant la vitesse d'air chaud de l'intérieur du four la température de la virole extérieure du four augmentent de 10 °C. La troisième variation est celle de la température d'air ambiant, on remarque dans ce cas qu'on augmentant la vitesse d'air ambiant la température de la virole augmente juste un peu.

Le fait que la température de la virole soit très élevée pose un problème. La solution proposée est une virole avec ailettes, en effet cette solution a permis de diminuer considérablement la température de 98 C°.

Parmi les perspectives pour les travaux futurs est de mettre en place un système de refroidissement de la virole par régulation.

## Références Bibliographiques

---

- [1] Fathi Habashi; « HISTORY OF THE ROTARY KILN »; Laval University, Quebec City, Canada 2010.
- [2] F.L.Smith ; Mecanical kiln inspection ; «[https://www.lafarge.dz/2\\_2\\_1-fabrication-du-ciment](https://www.lafarge.dz/2_2_1-fabrication-du-ciment) ».
- [3] Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) Plan d'action pour la Méditerranée ; « Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment » ; Étude publiée en mai 2008.
- [4] « Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment ». cemento\_fr.pdf ; Étude publiée en mai 2008.
- [5] « The rotary kiln handbook » « international-ROTARY-KILN-DESIGN-PAPER.pdf »; Feeco international; 2016.
- [6] « THE MANUFACTURE OF PORTLAND CEMENT » ; 1989.
- [7] Ricardo Araujo Mosci; « Refractories in cement manufacturing » ; 17-Feb-2015.
- [8] Ai-chun Ma, Jie-min Zhou, Jian-ping Ou & Wang-xing Li ; « CFD prediction of physical field for multi-air channel pulverized coal burner in rotary kiln »; Journal of Central South University of Technology 13, pages75–79(2006).
- [9] Burner Theory and Lafarge Approach ; « ciarotechnical center process and production » ; october 2010.
- [10] Dr.Abdulkadhum J K Al-Yasiri Montadher A. Muhammed ; « Estimating the thickness of coating in the burning zone of cement kilns including the aging factor » ; Iraqi journal of mechanical and material engineering 2012, Volume 12, Issue 3.
- [11] Prasad Ingawale, Kiran Narkar ; « Contact stress analysis of kiln tyre and thrust roller by using normal loading » ; P.G. Student, Dept. of Mechanical Engg., D.Y. Patil College of Engineering, Pune, Maharashtra, India1 Associate Professor, Dept. of Mechanical Engg., D.Y. Patil College of Engineering, Pune, Maharashtra, India 2 ; 12th October 2015

## Références Bibliographiques

---

[12] Phillips kiln services blog; « calculating cold gap using temperature differences »; Wednesday, January 12.2012.

[13] « Rapport polart meknes four » ; documentation de lafarge de maknes Maroc.

[14] BASTIER, Robert; BOCAN, Alexandre ; GILBERT, Bernard; REGNAULT, Alain ; Institut Polytechnique de Bucarest, Romania Conservatoire National des Arts et Métiers, Centre Technique Groupe Italcementi, France ; Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique. 2000, Vol 6, Num BE8844, pp BE8844.1-BE8844.24.

[15] Butterworth-Heinemann; Rotar kilns: « transport phenomena and transport processes » ; 2015

[16] « Les utilisations de la chaux », Disponible Sur Site Web [www.Membres.Aol.Com/Pierrotbj/Private/Utilisations.Pdf](http://www.Membres.Aol.Com/Pierrotbj/Private/Utilisations.Pdf)> Pierre Chaufour.

[17] William T. Choate; « Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry »; BCS, Incorporated 5550 Sterrett Place, Suite 306 Columbia, MD 21044; December 29, 2003

[18] Boateng & Akwasi Acheampong ; Rotary Kilns, Second Edition: « Transport Phenomena and Transport Processes » ; 370 Pages · 2016 · 18.47 MB · 479 Downloads · English

[19] Hasan Basri, Irsyadi yani ; « Fatigue Analysis of Rotary Cement kiln welded using finite element method » ; 01 august 2016.

[20] Prasad Ingawale, Kiran Narkar ; « Contact stress analysis of kiln tyre and thrust roller by using normal loading »; P.G. Student, Dept. Of Mechanical Engg., D.Y. Patil College of Engineering, Pune, Maharashtra, India1 Associate Professor, Dept. Of Mechanical Engg., D.Y. Patil College of Engineering, Pune, Maharashtra, India 2 ; 12th October 2015.

[21] Indra D. Winarko ; « Ring and snow Ball formation in the kiln »; Dec03, 2016

[22] Gebhart, Walter M. (South Sioux City, NE, US); « System and method for setting roller skew »; 04/02/2013



- [23] Ricardo Araujo Mosci ; « Refractories in cement Manufacturing » ; Dixie state university.
- [24] Eero Immonen, Process Flow Ltd Oy; « Advanced Multiphase Simulation of Rotary Kilns: Coupling of ANSYS Fluent and a Third Party Solver ».
- [25] Shen, Yi-ping, Wang, Song-lai, Li, Xue-jun, Dhillon, B. S ; « Multiaxial fatigue life prediction of kiln roller under axis line deflection » ; Journal : Applied Mathematics and Mechanics 2010.
- [26] Akwasi A. Boateng ; Rotary kilns : transport phenomena and transport processes ; 2008.
- [27] Maxime Pito; Récupération de la chaleur fatale: application aux fours rotatifs. Ingénierie de l'environnement. Ecole des Mines de Nantes, 2015. Français. ffNNT: 2015EMNA0235ff. fftel-01250334ff.
- [28] Sepehr Sadighi, Mansoor Shirvani, and Arshad Ahmad ; Rotary Cement Kiln Coating Estimator: Integrated Modelling of Kiln with Shell Temperature Measurement ; Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, UTM Skudai, Johor Bahru 81310, Malaysia ; Chemical Engineering Department, University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran; FEBRUARY 2011.
- [29] Mansour Tawk. Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2011. Français. fftel-00586080v1ff
- [30] Mojtaba Mirhosseini, Alireza Rezaei, Lasse Rosendahl, Power optimization and economic evaluation of thermoelectric waste heat recovery system around a rotary cement kiln, Journal of Cleaner Production 232 (2019).
- [31] Wei-Ning Wu, Xiao-Yan Liu, Zhou Hu, Rong Zhang, Xin-Yue Lu, Improving the sustainability of cement clinker calcination process by assessing the heat loss

through kiln shell and its influencing factors: A case study in China, *Journal of Cleaner Production* 224 (2019) 132e141.

[32] Hyun-Do Yun, Jong-Won Lee , Young-Il Jang , Seok-Joon Jang and Wonchang Choi, Microstructure and Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Phase Change Materials, *Applied sciences*, 2019, 9, 943.

[33] Alessandro Gallo, Elisa Alonso, Carlos Pérez-Rábago, Edward Fuentealba, María Isabel Roldán, A lab-scale rotary kiln for thermal treatment of particulate materials under high concentrated solar radiation: Experimental assessment and transient numerical modeling, *Solar Energy* 188 (2019)

[34] Wen-Jing Du, Qian Yin, Lin Cheng, Experiments on novel heat recovery systems on rotary kilns, *Applied Thermal Engineering* 139 (2018) 535–541.

[35] ConghuiGu, Zhulin Yuan, Shanshan Sun, Lei Guan, Kai Wu, Simulation investigation of drying characteristics of wet filamentous biomass particles in a rotary kiln, *Fuel Processing Technology* 178 (2018).

[36] Alex Stéphane Bongo Njeng, Stéphane Vitu, Marc Clausse, Jean-Louis Dirion, Marie Debacq, Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns: Experimental determination and modeling, *Experimental Thermal and Fluid Science* 91 (2018).

[37] Peter J. Witt, Matthew D. Sinnott, Paul W. Cleary, M. Philip Schwarz, A hierarchical simulation methodology for rotary kilns including granular flow and heat transfer, *Minerals Engineering* 119 (2018).

[38] Kunyu Wang, Jinbo Li, Peili Wang, Lin Cheng, 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.

[39] Ashish Agrawal, P.S. Ghoshdastidar, Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2017).

[40] Khalid IdrissiJanati, Essaid El Kennassi, LahbibBousshine, Hot Rotary Kiln Deformability for Cement Plant, Experimentation, and Numerical Simulation, *IOSR*

Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Volume 14, Issue 1 Ver. V (Jan. - Feb. 2017).

[41] Christopher Csernyei, Anthony G. Straatman, Numerical modeling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer 102 (2016)

[42] Christopher M. Csernyei, Numerical Modelling of a Rotary Cement Kiln with External Shell Cooling Fans, Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2016.

[43] QI LUO, PENG LI, LANLAN CAI, PINGWANG ZHOU, DI TANG, PENGCHENG ZHAI, QINGJIE ZHANG, A Thermoelectric Waste-Heat-Recovery System for PortlandCement Rotary Kilns, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 44, No. 6, 2015.

[44] R. Bouakkaz, K. Talbi, M. Ouazzazi, Y. Khelili and F. Salhi, EFFECT OF ROTATION RATES ON THE LAMINAR FLOW AND HEAT TRANSFER PAST A CIRCULAR CYLINDER, Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 32, No. 02, pp. 519 - 529, April - June, 2015.

[45] JANATI K. I., DIRHAR M. A., EL MASKAOUI Z., JALAL S. E., BOUSSHINE L., Déformabilité A Chaud D'un Four Rotatif Pour Cimenteries Expérimentation Et Simulation Numérique, 12ème Congrès de Mécanique 21-24 Avril 2015 Casablanca (Maroc).

[46] XiaoYanSong, QinFan, The Analysis of Rotary Kiln Thermal Characteristics Based on ANSYS and FLUENT, Advanced Materials Research Vols. 834-836 (2014)

[47] Vijayan. S. N, Sendhilkumar. S, Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors, International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 3, Issue 3, January 2014.

[48] Laurédan Le Guen, Florian Huchet, Jean Dumoulin, YvanBaudru, Philippe Tamagny, Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor, Applied Thermal Engineering 54 (2013).

- [49] Montadher A. Muhammed, The Ovality Problem in Cement Kilns (A Numerical and Experimental Study), the Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering, Vol.12, No.2, 2012.
- [50] Antonio C. Caputo, \*, Pacifico M. Pelagagge, Paolo Salini, Performance modeling of radiant heat recovery exchangers for rotary kilns, Applied Thermal Engineering 31 (2011).
- [51] Sachin B. Paramane, Atul Sharma, Heat and fluid flow across a rotating cylinder dissipating uniform heat flux in 2D laminar flow regime, International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010).
- [52] I. A. Sofia LARSSON, Elianne M. LINDMARK, T. Staffan LUNDSTRÖM, Daniel MARJAVAARA et Simon TÖYRÄ, Kiln Aerodynamics Visualisation Of Merging Flow By Usage Of Piv And CFD, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 9-11 December 2009.
- [53] Sanjay Mittal and Bhaskar Kumar, Flow past a rotating cylinder, Journal of Fluid Mechanics vol. 476, pp. 303-334 (2003).
- [54] Y. YANG, J. RAKHORST, M. A. REUTER, J. H. L. VONCKEN, Analysis Of Gas Flow And Mixing In A Rotary Kiln Waste Incinerator, Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December 1999.
- [55] Gustavo Urquiza Beltran, Étude De L'écoulement Et Du Transfert De Chaleur Dans Les Cavités Cylindriques En Rotation, Thèse de doctorat 1996.
- [55] Varun SHARMA and Amit Kumar DHIMAN, HEAT TRANSFER FROM A ROTATING CIRCULAR CYLINDER IN THE STEADY REGIME: EFFECTS OF PRANDTL NUMBER,
- [56] S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss, M. Schiemann, S. Schaefer, V. Scherer, 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 15 (2020).
- [57] Attou youcef, Etude numérique et thermique d'un écoulement turbulent dans un espace annulaire d'un rotor stator; Année 2018-2019.

## Références Bibliographiques

---

- [58] Smagorinsky. J, 1963. General circulation experiment with the primitive equations I. the basic experiment. Mon. Weather Rev .91 (3), pp. 99-164.
- [59] Fluent. April 2009, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, ANSYS Inc., Sections 18.1.1 and 18.1.2