



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 Electromécanique**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière** : Electromécanique  
**Spécialité** : Electromécanique Industrielle

### **Thème**

**Comportement thermique du refroidissement de la virole  
d'un four rotatif par l'ajout des ailettes.**

Présenté et soutenu publiquement par :

HAMADOUCH Oussama et BOUABANE Ahmed

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
<b>ADJELOUA Abdelaziz</b>	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Président</b>
<b>ACHACHE Habib</b>	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Examinateur</b>
<b>BOUHAFS Mohammed</b>	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Encadrant</b>

**Année 2023/2024**

## Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Allah pour le savoir que nous avons pu acquérir.

A travers ce modeste travail, nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur BOUHAFS Mohammed pour son encadrement précieux. Ce fut un privilège de travailler à vos côtés et d'apprécier vos qualités humaines et professionnelles. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir nous ont profondément marqués. Nous vous témoignons ici notre respect sincère et notre admiration pour vos qualités scientifiques et humaines.

Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux aux membres du jury, Monsieur ADJELOUA Abdelaziz, présidente du jury, ainsi que Monsieur ACHACHE Habib, qui ont eu l'amabilité d'accepter avec bienveillance d'évaluer ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui nous ont transmis des connaissances fondamentales en recherche tout au long de ces cinq années.

Enfin, nous exprimons notre immense reconnaissance à nos parents, nos amis, et à toutes les personnes qui ont soutenu ce travail de près ou de loin. Veuillez recevoir nos salutations les plus respectueuses.

# *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce mémoire à plusieurs personnes qui, chacune à leur manière, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.*

*À mes parents, qui m'ont inculqué les valeurs du travail, de la persévérance et de l'humilité. Vos sacrifices et vos efforts m'ont permis de me concentrer sur mes études et d'aller au bout de ce projet. Vous êtes ma plus grande source d'inspiration et de motivation.*

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

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

*Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont encouragé et ont cru en moi. Vos mots de soutien, vos gestes de bienveillance et votre confiance m'ont permis de garder la motivation nécessaire pour mener à bien ce projet. Merci à vous tous.*

***Oussama & Ahmed***

## **Résumé**

Cette étude porte sur la modélisation numérique du refroidissement de la virole d'un four rotatif à l'aide d'ANSYS FLUENT. La géométrie du modèle est basée sur celle existant réellement dans l'usine. Les données géométriques, les conditions aux limites et les paramètres d'exploitation ont été utilisés pour valider les calculs numériques. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les mesures effectuées dans l'usine. Afin d'améliorer le refroidissement de la virole, une solution a été proposée : l'ajout d'ailettes sur la virole, ce qui a permis de réduire significativement la température.

## **Abstract**

This study focuses on the numerical modeling of the cooling of a rotary kiln shell using ANSYS FLUENT. The geometry of the model is based on the real one used in the factory. The geometric data, boundary conditions, and operating parameters were used to validate the numerical calculations. The simulation results are in good agreement with the measurements taken in the factory. To improve the cooling of the shell, a solution was proposed : the addition of fins to the shell, which resulted in a significant reduction in temperature.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>II</b>
<b>Dédicace</b>	<b>III</b>
<b>Résumé</b>	<b>IV</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>I Cimenterie et zone de cuisson</b>	<b>2</b>
I.1 La cimenterie . . . . .	2
I.1.1 Présentation de l'entreprise de cimenterie . . . . .	2
I.1.2 Généralité sur la fabrication de ciment . . . . .	3
I.1.3 Description de principe du procédé de fabrication . . . . .	4
I.2 Zone de cuisson . . . . .	9
I.2.1 Le préchauffeur multi cyclones . . . . .	9
I.2.2 Le refroidisseur . . . . .	11
I.2.3 Le four rotatif . . . . .	14
I.3 Conclusion . . . . .	24
<b>II Transfert de la chaleur</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction . . . . .	25
II.2 Pertes de chaleur dans la virole . . . . .	25
II.3 Transfert de chaleur dans le four rotatif . . . . .	26
II.3.1 Transfert de chaleur par conduction dans le four . . . . .	26
II.3.2 Transfert de chaleur par convection . . . . .	26
II.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement . . . . .	27
II.4 Modèle mathématique . . . . .	27
II.5 Bilan énergétique . . . . .	27
II.6 Flux de chaleur . . . . .	28
II.7 Définition d'une ailette . . . . .	29
II.7.1 Détermination du champ de température . . . . .	30
II.7.2 Le flux de chaleur $\Phi$ . . . . .	30
II.7.3 Four avec ailettes . . . . .	31
II.8 Recherche bibliographique . . . . .	31
II.9 Conclusion . . . . .	35
<b>III Méthode numérique et description de problème</b>	<b>36</b>
III.1 Méthode des différences finies . . . . .	36
III.2 Méthode des éléments finis . . . . .	36
III.3 Méthode des volumes finis . . . . .	37
III.4 Équations gouvernantes . . . . .	38
III.4.1 Conservation de la masse . . . . .	38

III.4.2	Conservation de quantité de mouvement . . . . .	38
III.4.3	Équation de conservation d'énergie . . . . .	38
III.5	Principales méthodes d'approches pour la turbulence . . . . .	38
III.5.1	Simulation numérique directe (DNS) . . . . .	39
III.5.2	Simulation des grandes échelles (LES) . . . . .	39
III.5.3	Équations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, R.A.N.S.)	39
III.6	Choix du modèle de turbulence . . . . .	39
III.6.1	Modèles du premier ordre . . . . .	39
III.6.2	Modèles du deuxième ordre . . . . .	39
III.7	Description du problème . . . . .	40
III.8	Mise en œuvre de la simulation dans ANSYS . . . . .	40
III.8.1	Présentation du logiciel ANSYS . . . . .	40
III.8.2	Les avantages de la simulation numérique . . . . .	41
III.9	Modélisation dans ANSYS . . . . .	42
III.9.1	Les étapes de la simulation . . . . .	42
III.10	Conclusion . . . . .	47
<b>IV</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>48</b>
IV.1	Introduction . . . . .	48
IV.2	Résultats et discussion . . . . .	48
IV.3	Simulation sans Ailettes . . . . .	48
IV.3.1	Contour de température . . . . .	50
IV.3.2	Contour des lignes de courant . . . . .	50
IV.3.3	Contour de pression . . . . .	51
IV.4	Optimisation des ailettes dans le four rotatif . . . . .	52
IV.4.1	La Première Forme d'Ailettes . . . . .	52
IV.4.2	Contour des lignes de courant . . . . .	53
IV.4.3	Contour de température . . . . .	54
IV.4.4	Graphique de Température . . . . .	54
IV.5	Impact du nombre d'ailettes . . . . .	55
IV.5.1	Résultats et Analyse . . . . .	55
IV.6	Impact de la Taille des Ailettes . . . . .	56
IV.6.1	Analyse et discussion . . . . .	56
IV.7	La Deuxième Forme des Ailettes . . . . .	57
IV.7.1	Contour des Lignes de Courant . . . . .	58
IV.7.2	Contour de température . . . . .	59
IV.7.3	Graphique de Température . . . . .	59
IV.7.4	Analyse du Graphique . . . . .	60
IV.8	Comparaison entre le Four sans Ailettes et le Four avec ailettes . . . . .	61
IV.8.1	Discussion des Graphiques . . . . .	62
IV.9	Conclusion . . . . .	62
	<b>Conclusion générale</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>

# Table des figures

I.1	Société des ciments de Zahana (S.CI.Z) . . . . .	2
I.2	Les matières premières de ciment . . . . .	4
I.3	Extraction et transport de la matière première . . . . .	4
I.4	Le cocassage des matériaux . . . . .	5
I.5	Les différentes formes des tas . . . . .	5
I.6	Homogénéisation de la matière . . . . .	6
I.7	Le préchauffage et la Cuisson . . . . .	6
I.8	La matière après le refroidissement (clinker) . . . . .	7
I.9	Vue broyeur ciment . . . . .	7
I.10	Section Expédition . . . . .	8
I.11	Ligne de cuisson par voie sèche . . . . .	9
I.12	Préchauffeur multi cyclones. . . . .	9
I.13	Un cyclone. . . . .	10
I.14	Distribution de la température dans le préchauffeur à cyclones. . . . .	11
I.15	Refroidisseur. . . . .	11
I.16	Refroidisseur à Grille . . . . .	12
I.17	Refroidisseur à ballonnets . . . . .	13
I.18	Le premier four était utilisé pour grillage du sulfure. . . . .	14
I.19	Four rotatif. . . . .	14
I.20	Four rotatif de cimenterie. . . . .	15
I.21	Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie. . . . .	16
I.22	Briquetage dans le four rotatif de cimenterie. . . . .	16
I.23	Les différentes zones de briquetage du four rotatif. . . . .	17
I.24	La flamme bruleur de four rotatif. . . . .	18
I.25	Bruleur de four rotatif. . . . .	18
I.26	le croûtage sur la surface intérieure du four rotatif. . . . .	19
I.27	Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie. . . . .	20
I.28	Station des galets. . . . .	21
I.29	Le bandage. . . . .	21
I.30	Montage d'une virole d'un four rotatif. . . . .	22
I.31	Epaisseurs de viroles. . . . .	22
I.32	Virole, bandage, galet de butée et galet. . . . .	23
I.33	Système d'entraînement du four. . . . .	23
I.34	Galet pousseur (la buté). . . . .	24
II.1	Principaux phénomènes mise en jeu dans les fours tournants. . . . .	26
II.2	Les quantités de chaleur intérieure du four. . . . .	29
II.3	Hypothèses simplificatrices d'ailette. . . . .	30

---

III.1	Discrétisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel. . . . .	37
III.2	Four rotatif d'usine (cimenterie de Zahana « S.C.I.Z » – MASCARA). . . . .	40
III.3	Profil de température de la zone cuisson de la virole dans l'usine. . . . .	41
III.4	Définition du domaine étudié dans Workbench. . . . .	42
III.5	L'esquisse 2D de la géométrie. . . . .	43
III.6	Création de la géométrie. . . . .	43
III.7	Maillage quadratique. . . . .	44
III.8	L'interface dans le logiciel ANSYS (Fluent). . . . .	45
III.9	Conditions aux limites du modèle dans ANSYS. . . . .	46
III.10	Convergence des résultats. . . . .	47
IV.1	Profil de température externe de la virole de notre étude par rapport celle de l'usine. . . . .	49
IV.2	Contour de température. . . . .	50
IV.3	Contour des lignes de courant. . . . .	51
IV.4	Contour de pression. . . . .	51
IV.5	La géométrie du four rotatif avec la première forme d'ailettes. . . . .	52
IV.6	Vue 2D de la Géométrie du Four avec Ailettes. . . . .	53
IV.7	Contour des lignes de courant. . . . .	53
IV.8	Contour de température. . . . .	54
IV.9	Variation de la Température externe de la virole. . . . .	54
IV.10	Profil de Température avec quatre configurations d'ailettes. . . . .	55
IV.11	La variation de la Température avec trois tailles d'ailettes. . . . .	56
IV.12	La géométrie du four rotatif avec la Deuxième forme d'ailettes. . . . .	57
IV.13	Vue 2D de la Géométrie du Four avec Ailettes. . . . .	58
IV.14	Contour des Lignes de Courant. . . . .	58
IV.15	Contour de température. . . . .	59
IV.16	La variation de Température dans les deux configurations. . . . .	60
IV.17	La variation de la Température externe pour un Four sans Ailettes, Ailettes Triangulaires et Carrées. . . . .	61

# Liste des tableaux

I.1	Capacités contractuelles de production de clinker et ciment . . . . .	3
III.1	Les dimensions du four rotatif. . . . .	40
III.2	Conditions aux limites de la partie cuisson du four. . . . .	45

# Nomenclature

## Lettres latines

T	Température	K
Q	Quantité de chaleur	J
H	Enthalpie	J
A	Surface	m <sup>2</sup>
L	Longueur	m
uvw	Vitesse	m.s <sup>-1</sup>
K	Conductivité thermique	W.Km <sup>-1</sup>
Cp	Capacité thermique massique	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
F	Kg Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Kg CaO	-
S	Kg SiO <sub>2</sub> /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-tendu 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	Oxyde de calcium CaO	-
ho	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>

## 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	-
$\sigma$		
$\phi$	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

## Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds
Gr	Nombre de Grashof
Pr	Nombre de Prandtl

## Opérateur mathématique

$\partial$	Dérivée partielle
$\Delta$	Variation

# Introduction générale

Ces dernières années, le ciment est devenu un matériau très prisé et largement utilisé en Algérie. La fabrication du ciment suit plusieurs étapes importantes : le calcaire, principalement constitué de carbonate de calcium, est extrait par minage du front de taille. Il est ensuite concassé avec d'autres composants selon des proportions précises. Le produit obtenu, après homogénéisation et broyage, est une poudre fine appelée farine, prête pour la cuisson dans le four rotatif. La matière qui en ressort, une fois refroidie, est transportée vers les silos de stockage après l'ajout d'autres composants. Le ciment ainsi obtenu est alors entreposé dans des silos de stockage pour distribution.

Le four rotatif est l'élément central du processus de fabrication du ciment, et toute défaillance à ce niveau peut impacter gravement la production. Dans ce travail, nous nous penchons sur le refroidissement de la virole du four rotatif ainsi que sur les mécanismes de transfert thermique qui s'y déroulent, en tenant compte des phénomènes de conduction et de convection observés à l'intérieur et à l'extérieur du four. Les calculs par simulation, grâce à des outils comme ANSYS (FLUENT)-Workbench, se révèlent indispensables pour l'étude de ces phénomènes physiques complexes, notamment les transferts thermiques. Cette étude a été validée à partir de mesures réelles effectuées lors d'un stage pratique au sein de la société des ciments de Zahana dénommée **S.C.I.Z.**

L'objectif principal est d'améliorer le refroidissement de la virole du four. Nous avons étudié en détail le cas de la cimenterie de Zahana et proposé des solutions adaptées à cette usine.

Ce mémoire se divise en plusieurs parties :

- Le premier chapitre présente l'entreprise et des généralités sur les fours rotatifs, la tour multi cyclones et le refroidisseur dans les cimenteries.
- Le deuxième chapitre aborde les mécanismes de transfert thermique dans le four rotatif avec une recherche bibliographique.
- Le troisième chapitre traite de la simulation numérique effectuée.
- Le quatrième chapitre est consacré à la validation des calculs ainsi qu'aux résultats numériques obtenus dans cette étude, accompagnés de commentaires et d'analyses.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats de cette étude, accompagnée de recommandations et de perspectives pour des recherches futures.

# Chapitre 1

## Cimenterie et zone de cuisson

# Chapitre I

## Cimenterie et zone de cuisson

### I.1 La cimenterie

#### I.1.1 Présentation de l'entreprise de cimenterie

La société des ciments de Zahana dénommée « S.CI.Z », filiale du groupe ERCO est implantée dans la wilaya de Mascara, sise dans la localité de Djénine Meskine, à proximité de la route nationale N°13 et du réseau ferroviaire reliant les villes d'Oran et de Sidi-Bel-Abbès. Elle est située au nord de Mascara à environ 60 km d'Oran, s'étendant sur une superficie de plus de 31 hectares.



FIGURE I.1 – Société des ciments de Zahana (S.CI.Z)

- Réalisation de deux (02) lignes de production à voie humide de 2 x 200000 t/an de ciment LAFARGE de 1947 à 1953.
- Extension d'une ligne de production à voie sèche de 1000000 de t/an de ciment en 1977 par la société FCB France.

- Rénovation d'une ligne de production à voie humide de 200000 t/an et mise en service en 1995 par la société FLS.
- Le deuxième four à voie humide de 1947 est à l'arrêt depuis 1988.
- Extension d'une ligne de production à voie sèche de 4500 t/jour de clinker en 2017 qui est entrée en production en février 2020 par la société FCB France.

Débit four t/jour	Diamètre four (m)	Jours de marche (norme)	Capacité clinker t/an	Capacité ciment t/an
Voie sèche	3000	5.60	315	950000
Voie humide	600	3.75	315	190000
Voie sèche	4500	4.8	300	1350000
Total	8100	14.15	930	2490000

TABLEAU I.1 – Capacités contractuelles de production de clinker et ciment

## I.1.2 Généralité sur la fabrication de ciment

Les ciments sont des liants qui durcissent à l'air et à l'eau, offrant une résistance durable. Fabriqués à partir de matières premières chauffées, ils sont principalement utilisés pour créer du béton. Le terme "ciment" inclut divers types, comme le ciment Portland. Les ciments artificiels sont produits par cuisson de mélanges de silice, d'alumine, et de carbonate de chaux, et durcissent à des vitesses variées selon leur composition.

Les ciments peuvent être classés en deux grandes familles :

1. Les ciments portland :
  - Le ciment portland (CEM I)
  - Le ciment portland composé (CEM II)
2. Les ciments composites ou mélangés :
  - Les ciments de hauts fourneaux (CEM III)
  - Les ciments pouzzolaniques (CEM IV)
  - Les ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)

Les matières premières sont extraites des carrières à ciel ouvert par divers moyens (explosifs, pelle mécanique, bulldozer) et transportées vers un atelier de concassage. Pour garantir une qualité constante du ciment, elles doivent être soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées. La fabrication du ciment est un processus complexe nécessitant expertise, maîtrise technique et contrôles de qualité rigoureuse.

Le clinker, dur et cristallisé, est gris pour les ciments gris et vert pour le ciment blanc. Après broyage fin avec des ajouts comme le gypse et la pouzzolane, il devient du ciment. Les cimenteries modernes, comme celle de ZAHANA, utilisent la "voie sèche", un procédé économe en énergie consommant environ 0,9 KWh par kg de clinker.



FIGURE I.2 – Les matières premières de ciment

### I.1.3 Description de principe du procédé de fabrication

#### I.1.3.1 Extraction de la matière et concassage

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif, à la pelle mécanique ou par ripage au bulldozer. La roche est ensuite transportée par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualité constante, ces matières premières doivent être soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées afin d'obtenir une composition régulière dans le temps.



(a) Extraction



(b) Transport

FIGURE I.3 – Extraction et transport de la matière première

Le concassage réduit la taille des matériaux extraits des carrières (de 0 à plus de 1000 mm) à une taille maximale de 35 mm, facilitant ainsi leur traitement ultérieur (séchage et broyage). La roche est échantillonnée en continu pour ajuster les ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, saline) et obtenir la composition chimique idéale. Le mélange est ensuite stocké dans un hall de pré-homogénéisation où il est disposé en couches horizontales superposées, puis repris verticalement.

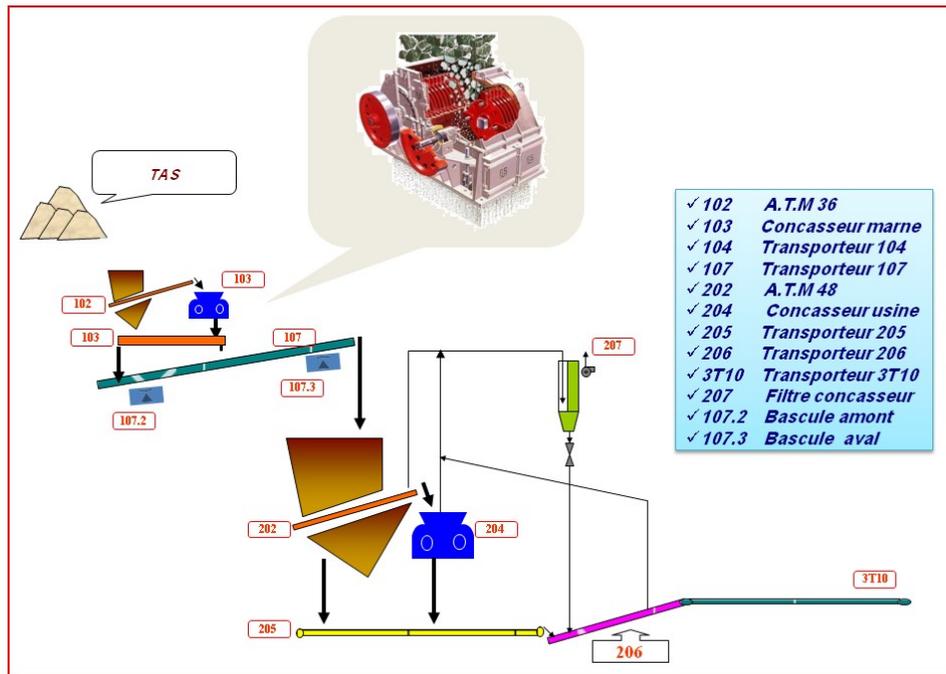


FIGURE I.4 – Le cocassage des matériaux

### I.1.3.2 Broyage et homogénéisation des matières premières

L'élaboration du cru requiert le mélange de calcaire et d'argile (ou de marne). Ce mélange est d'abord réalisé dans un hall de pré-homogénéisation, où la matière est disposée en couches horizontales superposées et reprise verticalement avec une roue-pelle. La matière est ensuite stockée sous forme de tas, en architecture longitudinale ou circulaire.

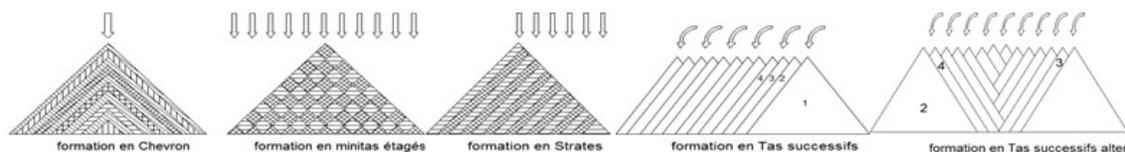


FIGURE I.5 – Les différentes formes des tas

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées par les gaz des exhausteurs du four et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économes en énergie et permettent un séchage plus efficace.

La pré-homogénéisation réduit la déviation standard de la matière concassée, suivie par l'homogénéisation, qui prépare une farine crue régulière pour le préchauffeur. Cette opération est réalisée en continu dans deux silos de 10 000 tonnes chacun. L'homogénéisation s'effectue principalement par alimentation intermittente et vidange via un ensemble d'aéroglisteurs déployés en étoile.

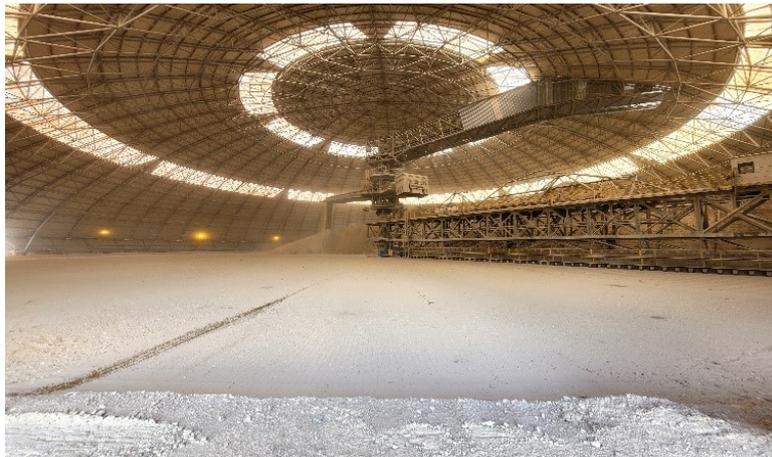


FIGURE I.6 – Homogénéisation de la matière

### I.1.3.3 Cuisson et refroidissement du clinker

Avant d'entrer dans le four, la farine est chauffée à 800 °C dans un préchauffeur. Elle passe ensuite par plusieurs étapes de transformation dans le four, alimenté par divers combustibles, pour atteindre 1 450 °C, où elle se transforme en clinker. À la sortie du four, le clinker est rapidement refroidi, généralement par un système de refroidissement à grillé. Cette étape est essentielle pour la décarbonatation et la fiabilité du processus.

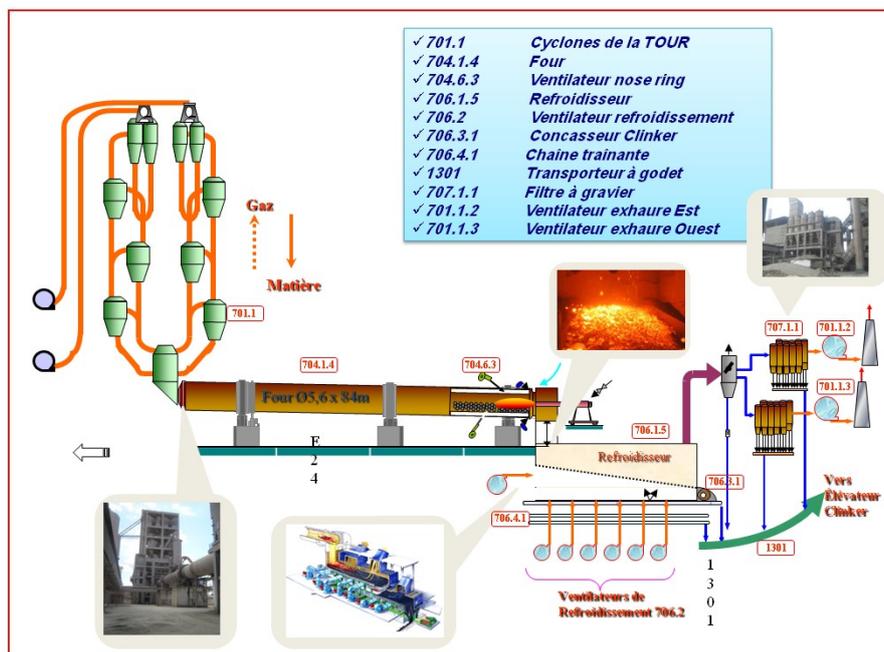


FIGURE I.7 – Le préchauffage et la Cuisson

À la sortie du four, le clinker est refroidi à environ 100 °C à l'aide d'un refroidisseur à grillé. Pendant la cuisson, des réactions physico-chimiques transforment la matière : la décarbonatation du calcaire produit de la chaux vive, et l'argile se décompose en silice et alumine, qui réagissent avec la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux, un processus appelé clinkérisation.



FIGURE I.8 – La matière après le refroidissement (clinker)

#### I.1.3.4 Broyage du clinker

Pour produire un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker est broyé très finement dans des broyeurs à boulets, où des boulets d'acier écrasent les grains jusqu'à obtenir une fine farine, avec très peu de grains supérieurs à 40 microns. Un cyclone sépare les particules fines des plus grosses, qui retournent au broyeur. Pendant le broyage, on ajoute du gypse (3 à 5%) pour réguler la prise du ciment, produisant ainsi le ciment "Portland". Les ciments "à ajouts" sont obtenus en ajoutant des éléments minéraux supplémentaires, comme des laitiers, cendres, fillers calcaires ou pouzzolanes, pour créer diverses catégories de ciments adaptés à différents types d'ouvrages.

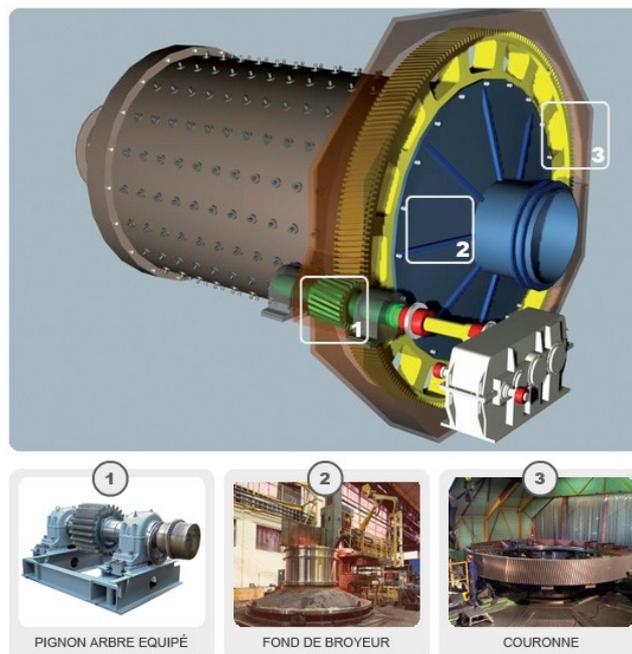


FIGURE I.9 – Vue broyeur ciment

### I.1.3.5 Stockage de ciment et expédition

Les ciments sont acheminés vers les silos de stockage par transport pneumatique ou mécanique. Ils sont ensuite expédiés en sacs de 25 ou 50 kg, avec un ensachage atteignant souvent 100 tonnes par heure. Les sacs sont palettisés en palettes de 1500 kg pour le transport routier. Le ciment livré en vrac, représentant 70% de la production, est transporté par camion-citerne, train ou bateau.

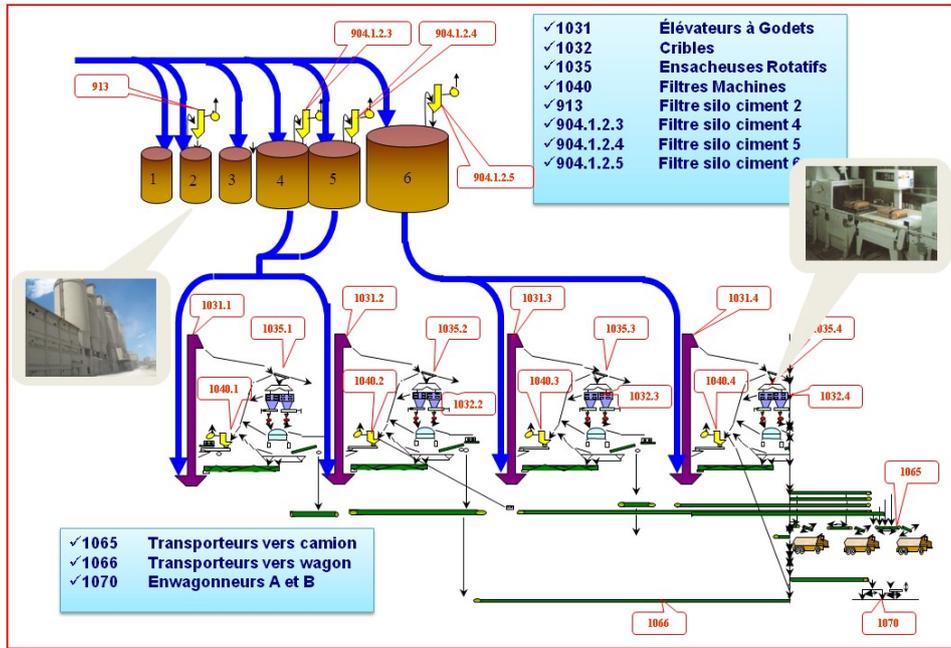


FIGURE I.10 – Section Expédition

## I.2 Zone de cuisson

La zone de cuisson dans une cimenterie est essentielle pour la transformation des matières premières en clinker, un semi-produit crucial dans la fabrication du ciment. Ce processus se déroule principalement dans des fours rotatifs, où la farine crue, préalablement mélangée et broyée, est soumise à des températures élevées.

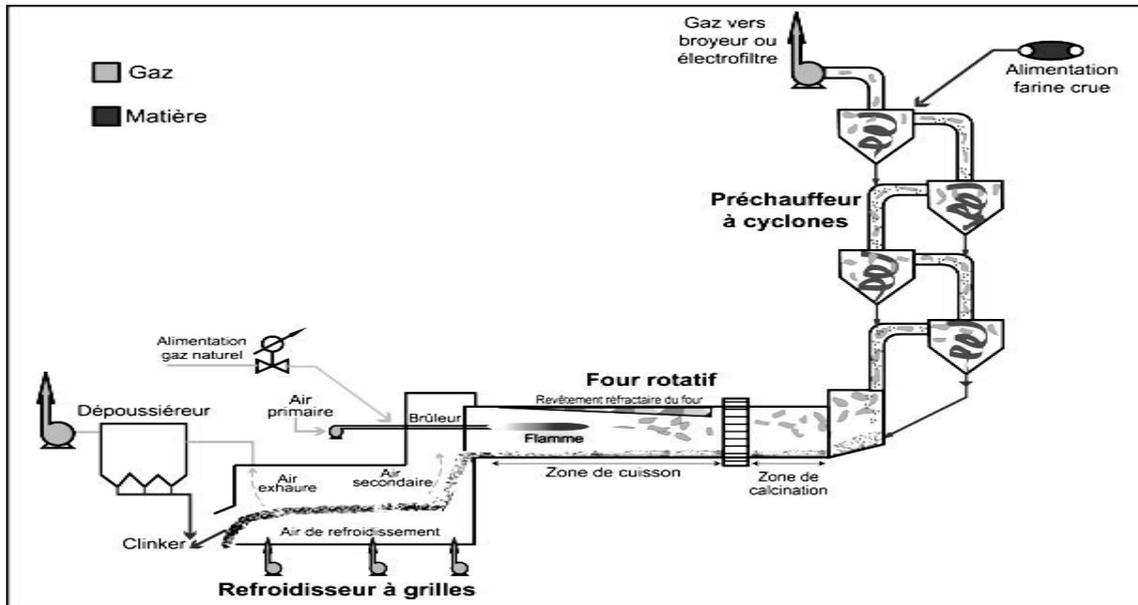


FIGURE I.11 – Ligne de cuisson par voie sèche

### I.2.1 Le préchauffeur multi cyclones

Le préchauffeur multi cyclones est un équipement essentiel dans le processus de fabrication du ciment, situé en amont du four rotatif. Son rôle principal est de préchauffer la farine crue avant son introduction dans le four, optimisant ainsi l'efficacité énergétique de l'ensemble du système.



FIGURE I.12 – Préchauffeur multi cyclones.

Le préchauffeur multi cyclones utilise une série de cyclones pour maximiser le transfert de chaleur entre les gaz chauds ascendants et le cru descendant. Ce processus permet d'élever la température du cru jusqu'à environ 900°C, ce qui est crucial pour la calcination. En récupérant la chaleur des gaz d'échappement du four et d'autres équipements comme l'éco fournaise, le préchauffeur contribue à réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. [27]

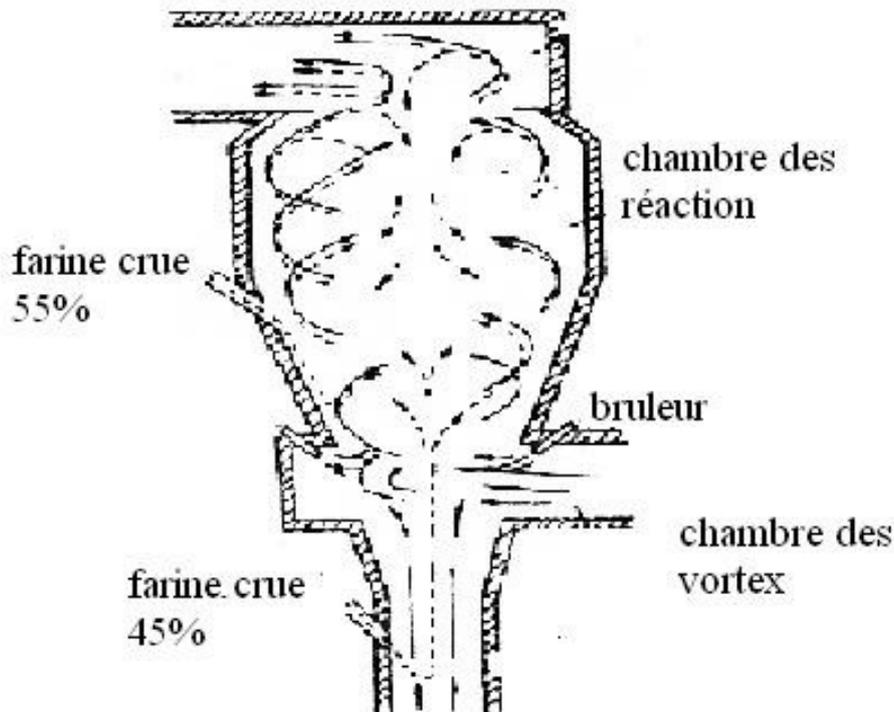


FIGURE I.13 – Un cyclone.

La tour de préchauffage est composée de plusieurs étages ou cyclones disposés verticalement, généralement de quatre à six, bien que ce nombre puisse varier en fonction de la conception spécifique de l'usine et de ses besoins en production.

- **Introduction du cru** : Le cru broyé est introduit dans la tour de préchauffage depuis le haut, permettant à la gravité de faciliter son passage à travers les différents cyclones.
- **Echange thermique** : Les gaz chauds provenant du four montent à travers la tour en sens inverse du cru. En passant à travers les cyclones, ces gaz transfèrent leur chaleur au cru. Ce processus augmente progressivement la température du cru à mesure qu'il descend, préparant efficacement le matériau pour la clinkérisation.
- **Efficacité Énergétique** : La conception des cyclones permet un transfert de chaleur maximal avec une perte minimale d'énergie, rendant le processus très énergétiquement efficace. [35]

Les Avantages du préchauffeur multi cyclones :

- **Efficacité énergétique** : En préchauffant la matière première avant son entrée dans le four, on réduit la consommation de combustible nécessaire pour atteindre les températures de cuisson.
- **Réduction des émissions** : Un meilleur contrôle des températures dans le four permet également de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres polluants.

— **Production optimisée** : Le préchauffeur multicyclones permet d'accélérer le processus de cuisson du clinker, augmentant ainsi la capacité de production de l'installation. [22]

La tour de préchauffage est vitale car elle améliore l'efficacité thermique de la cimenterie, permet une meilleure utilisation des ressources, réduit les coûts de production et aide à minimiser l'impact environnemental de la production de ciment.

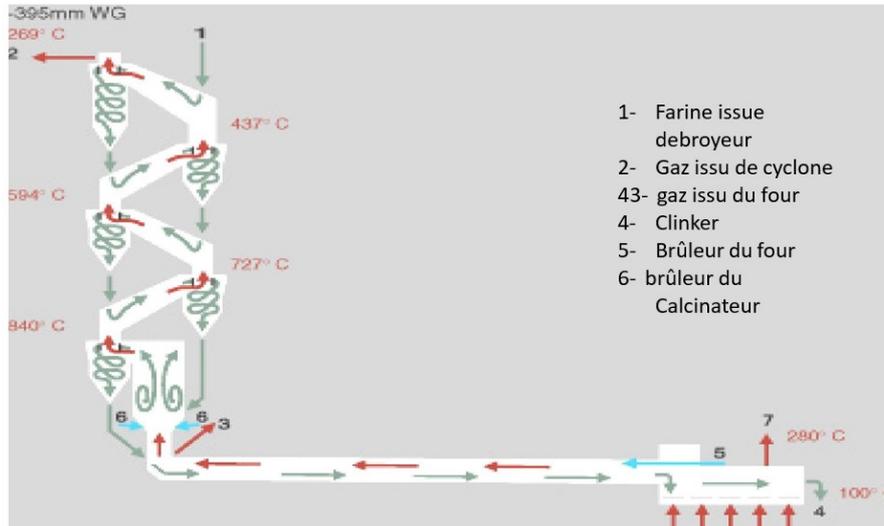


FIGURE I.14 – Distribution de la température dans le préchauffeur à cyclones.

## I.2.2 Le refroidisseur

Le refroidisseur dans une cimenterie est une composante essentielle du processus de production du ciment. Il joue un rôle crucial dans la transformation du clinker, le produit intermédiaire résultant du processus de cuisson dans le four rotatif, en ciment.

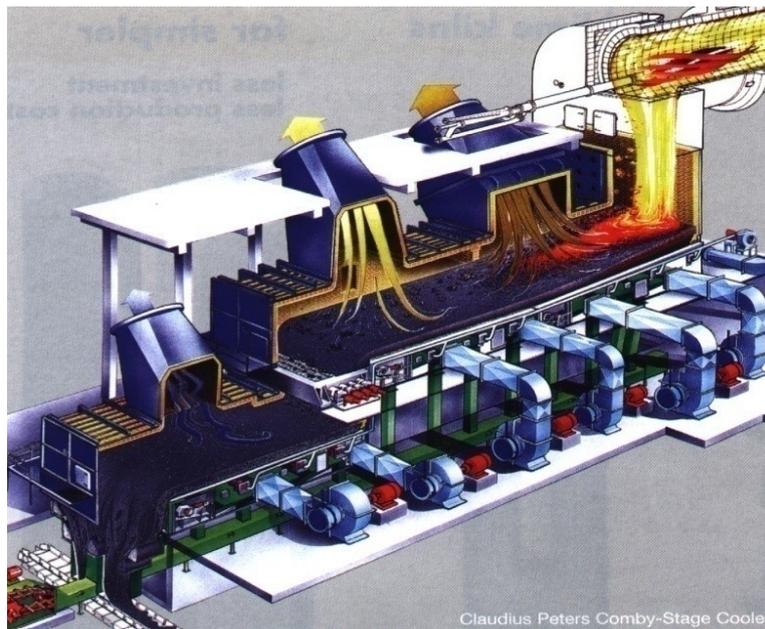


FIGURE I.15 – Refroidisseur.

- **Réception du Clinker** : Le clinker sort du four rotatif à une température extrêmement élevée, souvent supérieure à 1400°C. À cette température, le clinker est en fusion partielle.
- **Refroidissement Rapide** : Le clinker est introduit dans le refroidisseur, où il est soumis à un refroidissement rapide. Ce processus est généralement effectué par un flux d'air forcé qui traverse le clinker chaud. Le refroidissement rapide est crucial pour stabiliser les phases minérales du clinker et améliorer ses propriétés mécaniques.
- **Récupération de la Chaleur** : Une partie de la chaleur extraite du clinker est récupérée et réintroduite dans le système de production. Cela permet d'améliorer l'efficacité énergétique globale de la cimenterie. Par exemple, l'air chauffé par le clinker peut être utilisé comme air secondaire ou tertiaire pour la combustion dans le four rotatif.
- **Transport du Clinker Refroidi** : Une fois refroidi à une température gérable (environ 100-200°C), le clinker est transporté vers les silos de stockage ou directement vers le broyeur de ciment pour la phase finale de broyage et d'ajout de divers additifs, aboutissant à la production du ciment.

Il existe plusieurs types de refroidisseurs de clinker, voici les principaux types :

#### I.2.2.1 Refroidisseur à Grille

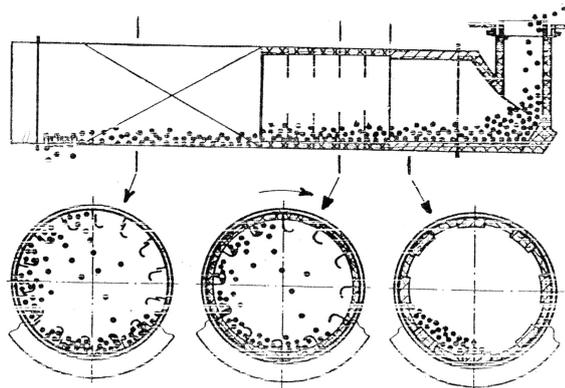
Le type le plus courant de refroidisseur. Il se compose de plusieurs étages de grilles sur lesquelles le clinker est distribué. L'air est soufflé à travers les grilles pour refroidir le clinker. Les grilles sont souvent vibrantes pour faciliter le déplacement du clinker.



FIGURE I.16 – Refroidisseur à Grille

### I.2.2.2 Refroidisseur à Ballonnets

Le refroidisseur comprend dix tubes cylindriques appelés ballonnets (figure a de I.17) montés sur le tube rotatif. Le ballonnet est recouvert par un revêtement calorifuge dans sa première moitié et doté de releveurs. Il assure une grande surface d'échange de chaleur à contre-courants entre le clinker et l'air de refroidissement. La figure b de I.17 montre la répartition des ballonnets sur la virole de décharge. [21]



(a) Schéma d'un ballonnet du refroidisseur



(b) Répartition des ballonnets sur la virole de décharge

FIGURE I.17 – Refroidisseur à ballonnets

Les refroidisseurs de clinker jouent un rôle important dans le processus de production du ciment en refroidissant rapidement le clinker après sa sortie du four rotatif :

- **Qualité du Ciment** : Un refroidissement efficace et rapide est crucial pour garantir une bonne qualité du clinker, ce qui influence directement la qualité du ciment produit.
- **Efficacité Énergétique** : La récupération de chaleur dans le refroidisseur contribue à réduire la consommation énergétique globale de la cimenterie, ce qui est essentiel pour la viabilité économique et environnementale de l'usine.
- **Durabilité des Équipements** : Le refroidisseur permet de réduire la température du clinker avant qu'il n'entre en contact avec d'autres équipements, prolongeant ainsi la durée de vie de ces équipements et réduisant les coûts de maintenance.

### I.2.3 Le four rotatif

Les fours rotatifs sont fréquemment perçus comme le cœur des usines de production de ciment. Ils jouent un rôle crucial dans la fabrication du clinker dans l'industrie cimentière, ainsi que dans la production de la chaux et la fabrication des charbons. De 1847 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 le New Jersey, où il présenta les premiers fours longs utilisés dans l'industrie, mesurant 46 mètres de longueur. En 1914, l'utilisation du four rotatif pour diminuer la teneur en soufre par grillage partiel du sulfure de cuivre fut introduite. Aux États-Unis, un four à réverbération fut réalisé, avec un diamètre de 2 à 2,5 mètres et une longueur de 5 à 8 mètres, installé horizontalement.

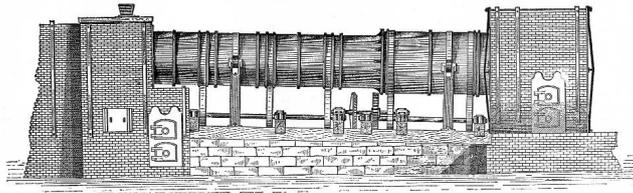


FIGURE I.18 – Le premier four était utilisé pour grillage du sulfure.

En 1953, une nouvelle invention fut introduite pour réduire la consommation thermique des fours : les fours HUMBOLDT avec préchauffeurs à suspension gazeuse. Dans ce type de four, les gaz chauds provenant de l'aval transmettent leur chaleur à une farine qui descend à travers une série de cyclones disposés en amont du four, formant ainsi un four à quatre étages. [7]

#### I.2.3.1 Définition de four rotatif

Les fours rotatifs sont, dans l'industrie des procédés, parmi les unités dont le fonctionnement est bien établi mais qui restent pourtant parmi les moins compris. Ils peuvent être utilisés pour trois raisons distinctes : le chauffage, la réaction et le séchage de matériaux solides. Souvent, ils réalisent une combinaison de ces objectifs. Dans la conception des fours, quatre aspects importants doivent être considérés du point de vue de la technologie des procédés : le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides granulaires à travers le four, le transfert de masse gaz-solide et les réactions chimiques. Parmi ces aspects, le transfert thermique est le plus crucial, car il limite la performance du four rotatif. Cette importance est reflétée par le nombre de publications scientifiques sur les modèles de transfert thermique dans les fours.



FIGURE I.19 – Four rotatif.

Les fours rotatifs sont utilisés pour transporter des processus tels que :

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

### I.2.3.2 Four rotatif de cimenterie et son fonctionnement

Le four rotatif est un cylindre en acier long soutenu par des stations de roulement, dont la station amont est motrice, et il tourne à une vitesse variable comprise entre 1,8 et 3,5 tours par minute. Ce cylindre, également appelé virole, est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires. Incliné à 3,5% dans le sens de l'écoulement des matériaux, cette inclinaison combinée à la rotation permet à la matière de progresser vers le brûleur par gravité. Fonctionnant comme un échangeur de chaleur, les fours rotatifs de cimenterie sont largement utilisés pour convertir les matières premières (farine brute) en clinker de ciment. Ce processus est à la fois physique et chimique, à haute intensité énergétique, transformant la matière première en ciment utilisé pour des applications nécessitant une liaison de haute résistance, comme les structures de soutien et autres travaux d'infrastructure. Une fois que la farine brute est transformée en clinker dans le four. [2]



FIGURE I.20 – Four rotatif de cimenterie.

### I.2.3.3 Les caractéristiques du four rotatif

Le four de cimenterie est défini par sa longueur, son diamètre et le nombre d'appui. Il se compose d'éléments intérieurs et extérieurs :

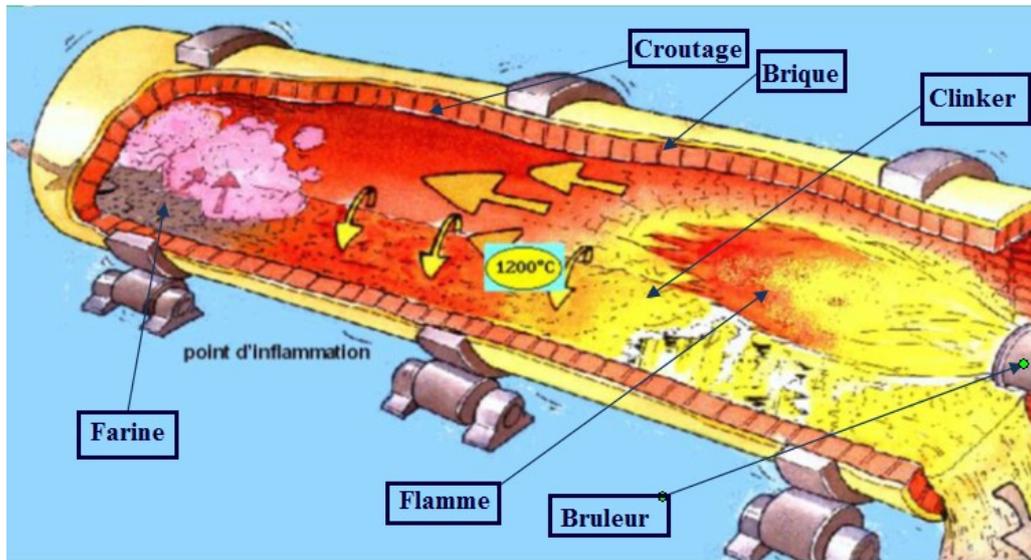


FIGURE I.21 – Les éléments intérieurs dans les fours rotatifs de cimenterie.

— Les éléments intérieurs principaux dans les Fours Rotatifs :

#### 1. Briquetage dans le four rotatif :

Le four doit être entouré exclusivement de briques réfractaires. Les réfractaires sont des matériaux céramiques conçus pour résister à des températures élevées. La hauteur des briques réfractaires, qui est fonction du diamètre du four, varie généralement à partir de 200 mm et peut être plus importante. [13]



FIGURE I.22 – Briquetage dans le four rotatif de cimenterie.

Le briquetage remplit plusieurs rôles importants :

- Isolation thermique et protection de la virole** : Les réfractaires isolent et protègent la virole du four contre les températures élevées à l'intérieur. Sans réfractaires, l'acier au carbone de la virole serait endommagé par la chaleur.
- Protection contre l'abrasion** : Le clinker de ciment est très abrasif. Les réfractaires servent à protéger la virole contre l'abrasion causée par les matériaux en mouvement à l'intérieur du four.

- (c) **Réduction des pertes de chaleur** : Une partie de la chaleur produite par le système du four est perdue par rayonnement à travers la virole en acier. Les réfractaires, grâce à leur faible conductivité thermique, contribuent à minimiser ces pertes de chaleur. [1]

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

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

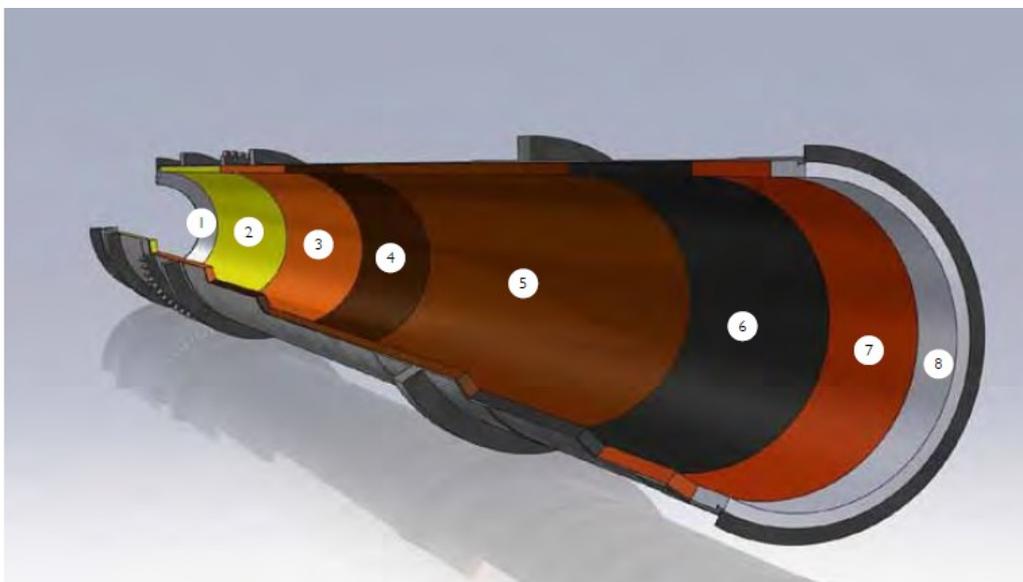


FIGURE I.23 – Les différentes zones de briquetage du four rotatif.

## 2. Brûleur de four rotatif :

Le brûleur est une composante cruciale d'un four rotatif, jouant un rôle essentiel dans le contrôle du flux d'air, la répartition de la température, la consommation d'énergie et là. [4]



FIGURE I.24 – La flamme brûleur de four rotatif.

Le rôle principal d'un brûleur est de préparer et de mélanger l'air primaire avec le combustible à l'intérieur du four. Ce mélange intensif du combustible permet une combustion rapide et complète. Le tube du brûleur contrôle la flamme pour assurer une dispersion efficace de la chaleur dans la zone de cuisson tout en protégeant les réfractaires et le revêtement du four. La chaleur générée par la flamme ou les produits de combustion est transféré au lit de matière ou à l'environnement du four. [14]



FIGURE I.25 – Brûleur de four rotatif.

Il existe deux types principaux de brûleurs pour le mélange combustible-comburant :

- (a) **Brûleurs à prémélanges** : Dans ce type de brûleur, le mélange entre le combustible et le comburant (généralement de l'air) est effectué avant leur introduction dans le four. Ces brûleurs sont utilisés uniquement avec des combustibles gazeux. Ils génèrent des flammes courtes et permettent d'atteindre localement des températures très élevées. Cependant, des mesures spécifiques doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion en amont jusqu'au dispositif de mélange.
- (b) **Brûleurs à flamme de diffusion** : Dans ce type de brûleur, le mélange entre le combustible et le comburant se fait soit à la sortie du brûleur, soit au nez du brûleur. Ces brûleurs sont adaptés pour les combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. Ils offrent une grande flexibilité en permettant de contrôler les vitesses et les écoulements pour obtenir une variété de formes de flammes [15].

### 3. Croûtage :

Le croûtage fait référence à la formation d'une couche solide, souvent composée de minéraux et de résidus, sur la surface intérieure du four rotatif. Cette couche est généralement formée durant le processus de cuisson, où les températures élevées et les réactions chimiques entraînent la fusion et la solidification de certains composants présents dans les matières premières. Bien que le croûtage soit nécessaire pour protéger le revêtement réfractaire du four, son épaisseur et sa composition doivent être soigneusement contrôlées pour éviter des problèmes d'usure ou de défaillance structurelle. [3]

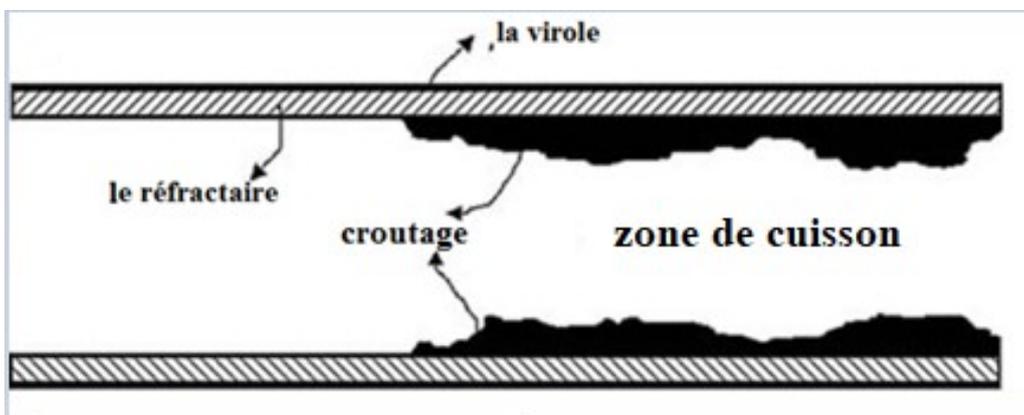


FIGURE I.26 – le croûtage sur la surface intérieure du four rotatif.

## — Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie :

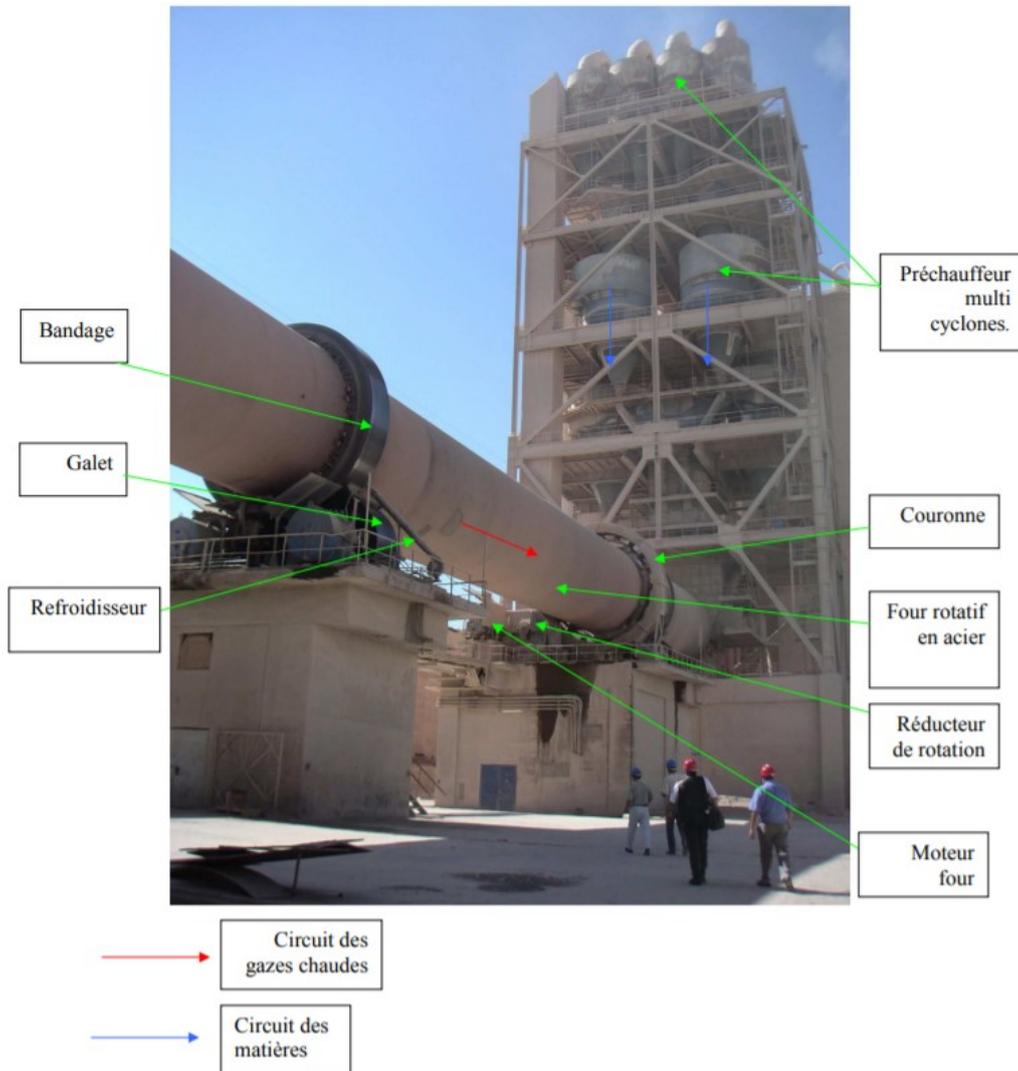


FIGURE I.27 – Les éléments extérieurs du four rotatif de cimenterie.

## 1. Le galet :

Les galets des fours rotatifs sont conçus pour supporter les charges axiales, contrôler le mouvement axial, contrer la pente du four et assurer une utilisation uniforme de la surface de contact entre le bandage du four. Fabriqués en acier moulé, les galets sont composés de deux pièces : un cylindre plein et un axe (fusée de galet) emmanché avec un ajustement serré compris entre 0,07 et 0,1%. Un ajustement incorrect peut provoquer des déplacements relatifs et la cassure de l'arbre. Un galet bien réglé est parallèle à l'axe de rotation de la virole, minimisant les contraintes et évitant la cassure. Les galets sont fixés par des paliers en alliages de bronze ou de métal blanc (antifriction), et leur bon fonctionnement dépend d'une lubrification adéquate avec un film d'huile refroidi par un système à eau. Ces galets minimisent le frottement grâce à leur faible coefficient de frottement de surface et leur nature similaire aux bandages, ce qui permet une usure uniforme. [12] [30]



FIGURE I.28 – Station des galets.

## 2. Bandages :

Le bandage, fabriqué en acier coulé ou forgé, est conçu pour supporter une charge définie et entoure la virole du four en la soutenant selon le diamètre du four. Il protège la virole de l'usure, minimise le frottement entre le four et ses paliers, et maintient la forme cylindrique de la virole pour éviter les fissures et la détérioration des briques réfractaires. De plus, le bandage réduit le flux de chaleur transmis de la virole aux galets supports. Au niveau des bandages, la virole est renforcée avec une tôle pouvant atteindre 100 mm d'épaisseur pour limiter les déformations dues à la pression des galets. La largeur du bandage et du galet est calculée pour assurer une répartition uniforme de la charge et éviter : la déformation locale du bandage et du galet, les fissures du bandage ou du galet et l'ovalisation plastique sous la pression. [18]



FIGURE I.29 – Le bandage.

## 3. La virole :

La virole est l'enveloppe d'un four rotatif de 4,5 m de diamètre et 75 m de longueur. Elle se compose de plusieurs tronçons de différentes tailles assemblés par soudage, sans alignement des soudures longitudinales. Fabriquée à partir de tôles en acier doux de qualité E 24.2 ou A42 CP, la virole est conçue pour résister aux contraintes mécaniques et thermiques. Les tôles, d'une largeur de 2200 mm, sont soudées pour former des demi-viroles, qui sont ensuite soudées ensemble le long de leurs génératrices. [25]



FIGURE I.30 – Montage d'une virole d'un four rotatif.

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.

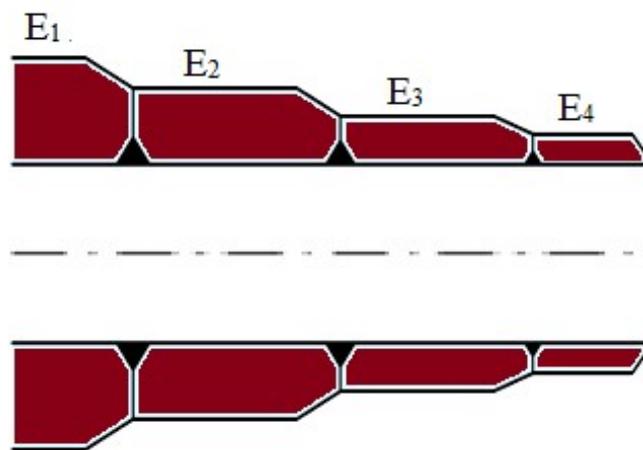


FIGURE I.31 – Epaisseurs de viroles.

Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

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

Le choix des différentes épaisseurs de viroles doit permettre une variation des contraintes avec un minimum de discontinuité. La virole est libre en rotation à l'intérieur du bandage car sa température est plus élevée que celle du bandage, entraînant une dilatation thermique plus importante. Un jeu est nécessaire pour absorber cette différence. Les bandages ne sont pas montés directement sur la virole mais sur des cales libres, reliées à la virole par des butées soudées. Le mouvement de montée et descente du four répartit l'usure sur toute la surface du galet. Sinon, le bandage finirait par creuser un sillon dans le galet qu'il ne pourrait plus quitter. [25]

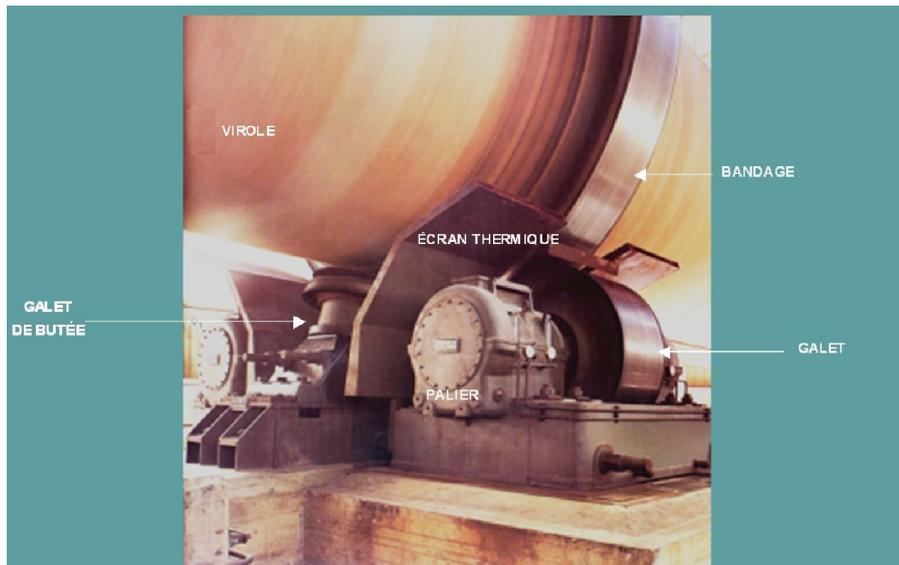


FIGURE I.32 – Virole, bandage, galet de butée et galet.

#### 4. Le système d'entraînement du four :

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

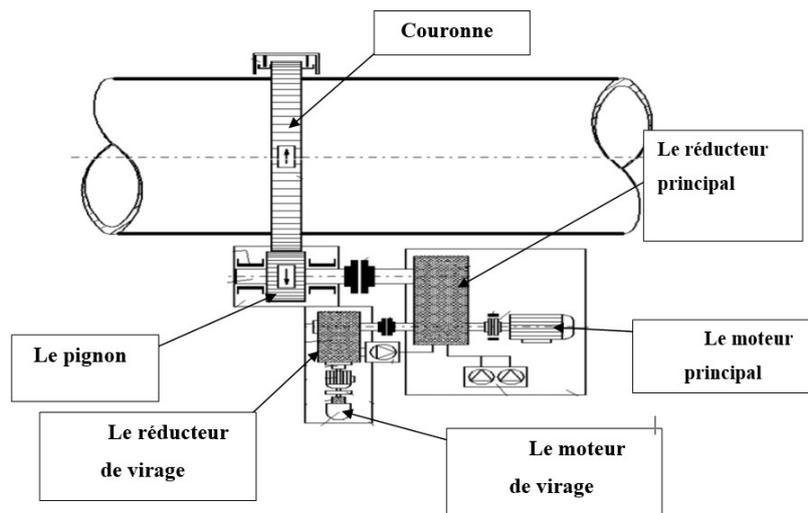


FIGURE I.33 – Système d'entraînement du four.

Le moteur du four rotatif tourne à 1000 t/min, entraînant le réducteur qui tourne à 13 t/min. Ce dernier est engrené à la couronne qui fait tourner le four à 1,4 tours/min. Ainsi, on peut distinguer trois niveaux de vitesse : le premier est à grande vitesse, le deuxième à vitesse moyenne, correspondant au réducteur, et le troisième à petite vitesse (1,4 t/min) pour le four rotatif. La couronne d'entraînement, l'élément le plus sensible et le plus coûteux du four, est engrenée avec le pignon du réducteur. Tous les engrenages sont plongés dans de l'huile de refroidissement. Le four se déplace horizontalement en s'appuyant sur trois galets. Le groupe de poussée, composé à 80% de systèmes hydrauliques, comprend une pompe à huile, des vérins, et un disque horizontal situé sous le four rotatif. Ce système fait monter le four d'environ 15 centimètres en 24 heures et le fait redescendre en 8 heures, ce qui permet une usure uniforme des bandages et d'accommoder la dilatation du four due à la forte chaleur interne. La puissance consommée par le moteur pour faire tourner le four est de 380 kW. [20]

#### 5. Système de la butée :

Le four a une pente de 3% à 4%, ce qui favorise le glissement de la matière vers la sortie. Le dispositif de retenue hydraulique, appelé "la butée du four", se trouve à cet endroit. La butée est conçue pour reprendre jusqu'à 90% de la charge axiale du four. Le reste de cette charge est supporté par les stations de galets du four. Lorsque les galets sont correctement réglés, ils peuvent reprendre de 10% à 50% de la charge axiale du four. [20]

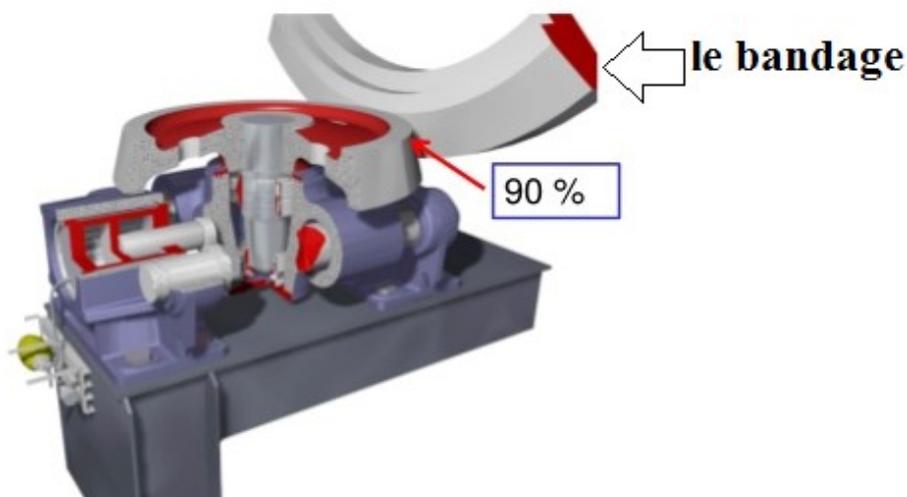


FIGURE I.34 – Galet pousseur (la butée).

## I.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter brièvement le procédé de fabrication du ciment, ainsi que de décrire le four rotatif utilisé en cimenterie. Nous avons ensuite fourni une description technique détaillée de l'ensemble des composants qui le constituent, en expliquant leurs rôles et spécificités. Le four rotatif est le lieu des réactions chimiques et fonctionne sous des conditions de pression et de température très élevées, d'où l'importance d'une étude thermique. Le chapitre suivant abordera le transfert de chaleur dans le four rotatif.

# Chapitre 2

## Transfert de la chaleur

# Chapitre II

## Transfert de la chaleur

### II.1 Introduction

Les mécanismes de transfert de chaleur dans les fours rotatifs comprennent la conduction, la convection et le rayonnement, qui varient en fonction de la température. Ces modes de transfert sont divisés en trois catégories correspondant à trois zones : l'extérieur, l'intérieur et à travers le mur du four. Chaque mode peut inclure un ou plusieurs de ces mécanismes de transfert de chaleur.

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

Les pertes de chaleur des viroles jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des fours rotatifs. Dans certaines applications, comme les fours à ciment, les scanners de température des viroles peuvent être utilisés pour contrôler le processus. Les pertes de chaleur à travers la virole fournissent des informations sur ce qui se passe à l'intérieur du four. Même avec des caméras installées, une défaillance du réfractaire ne peut être détectée qu'en observant une augmentation de la température de la virole à l'endroit défectueux. Certains fours à ciment modernes sont équipés de scanners de température qui surveillent en permanence la virole et enregistrent le profil de température en temps réel. Divers facteurs influençant les changements de température à l'intérieur du four, tels que l'augmentation du débit d'alimentation, un faible débit de carburant ou des modifications du débit d'air, permettent d'ajuster le profil de température des viroles.

Cependant, un inconvénient de l'utilisation de la paroi de la virole pour le contrôle du four est que le revêtement réfractaire possède une grande masse thermique, ce qui entraîne une réponse lente aux changements de température à l'intérieur du four. C'est pourquoi certains opérateurs préfèrent utiliser la température de la paroi intérieure comme point de contrôle, en utilisant des caméras équipées de capteurs de température. [6]

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

Le transfert de chaleur dans le four se fait selon trois modes principaux :

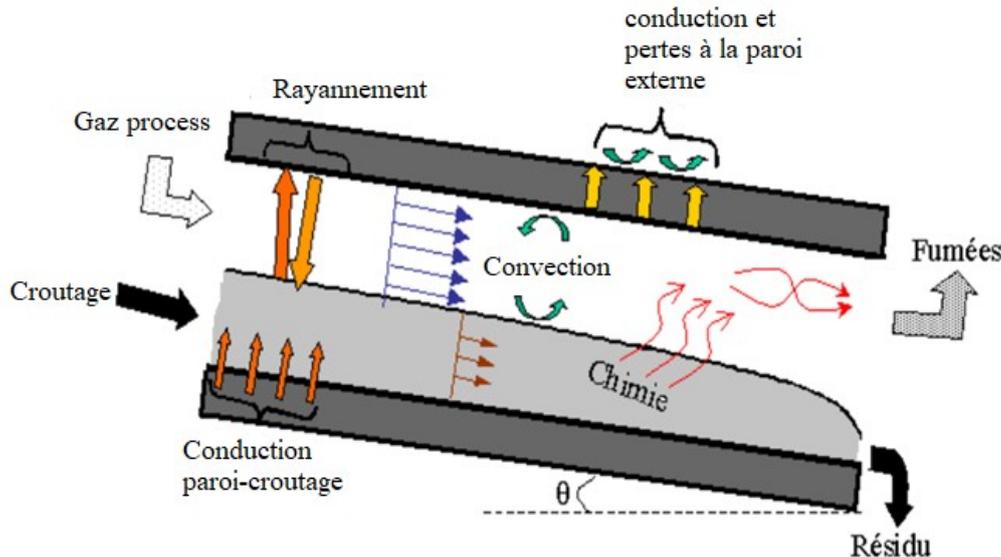


FIGURE II.1 – Principaux phénomènes mise en jeu dans les fours tournants.

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

Dans les matériaux solides tels que les parois réfractaires ou la virole d'un four rotatif, les molécules possèdent une énergie interne rigide, formant une structure en treillis. Ces molécules ne migrent pas à l'intérieur du réseau mais possèdent une énergie interne sous diverses formes, telles que l'énergie vibratoire et l'énergie cinétique de rotation, qui sont proportionnelles à la température locale. La vitesse de transfert d'énergie dépend du gradient de température et des modes d'interaction moléculaire présents dans ce matériau spécifique (conductivité thermique). Ainsi, la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur est définie par :

$$\Phi_{1-2} = K_p \frac{T_1 - T_2}{L_1 - L_2} \quad (\text{II.1})$$

### 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. Le taux de transfert de chaleur entre une surface à la température  $T_p$  et un fluide à la température  $T_f$  peut être calculé à partir de la loi de Newton sur le refroidissement, qui est mathématiquement énoncée comme suit :

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

### II.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Les transferts de chaleur par rayonnement thermique sont liés aux ondes caractéristiques et ces échanges dépendent fortement du niveau de la température et de 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, en particulier les émissivités des solides de la paroi du tambour et des gaz, ainsi que le modèle de rayonnement utilisé. [23]

$$\Phi = \varepsilon \sigma AT \quad (\text{II.3})$$

## II.4 Modèle mathématique

Divers processus se déroulant dans le four rotatif à ciment doivent 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, à d'autres réactions et à la formation de la masse fondue est fournie par le gaz chaud. Plusieurs réactions chimiques se produisent dans le lit solide, et la formation de la masse fondue entraîne un revêtement interne à la surface du réfractaire dans la zone de combustion. Le système est non linéaire en raison du transfert complexe de chaleur et de masse.

## II.5 Bilan énergétique

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

— **Pour gaz :**

$$A_g C_{p_g} \rho_g V_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = \beta_1 (T_w - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + Q_{comb} \quad (\text{II.4})$$

— **Pour solide :**

$$A_s C_{p_s} \rho_s V_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \beta_2 (T_w - T_g) + \beta_3 (T_w - T_s) + A_s Q_c \quad (\text{II.5})$$

— **Pour le mur :**

$$\beta_1 (T_w - T_g) + \beta_3 (T_w - T_s) + \beta_4 (T_a - T_w) = 0 \quad (\text{II.6})$$

— **La chaleur de la réaction :**

$$Q_c = \frac{\rho_s}{1 + A_1 + F_i + S_i} [-\Delta h_g K_1 E - \Delta h_w R_w - \Delta h_\beta K_\beta A(C)^2 - \Delta h_\alpha K_\alpha C_\beta] \quad (\text{II.7})$$

( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ) sont des fonctions non linéaires des températures, des coefficients de transfert de chaleur par convection et rayonnement, et de la géométrie qui peuvent être calculées par les équations (II.8)-(II.12).

$$\beta_1 = 1.7307 r_{1p} [f_1 + 1.73 \times 10^{-9} (1 - h_0) \varepsilon_g \varepsilon_s (T_g^2 + T_w^2) (T_g + T_w)] \quad (\text{II.8})$$

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

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

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

$$\beta_3 = r_1(2\pi - p) [f_3 + 1.73 \times 10^{-9}h_\varepsilon W\varepsilon_s (T_s^2 + T_w^2) (T_s + T_w)] \quad (\text{II.10})$$

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

$$\beta_4 = 2\pi f_4 r_2 \quad (\text{II.11})$$

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 :

$$h_{cvsh \rightarrow a} = 0.11k_a pr^{0.36} D(0.5Re_w^2 + Re^2 + Gr)^{0.35} \quad (\text{II.12})$$

$$h_{rch \rightarrow a} = C\varepsilon_{sh}\sigma T_{sh}^3 \quad (\text{II.13})$$

Où la constante  $C$  dans l'équation (II.11) est donnée par :

$$C = \left\{ 1 + \frac{T_a}{T_{sh}} + \left(\frac{T_a}{T_{sh}}\right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{sh}}\right)^3 \right\} \quad (\text{II.14})$$

Comme l'équation (II.11),  $h_{cvsh \rightarrow a}$  dépend sur la température, car  $Pr$ ,  $Re$  et  $Gr$  peuvent être fortement affectés par les conditions environnementales [23]. 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.12) 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. 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 :

$$\Phi = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.15})$$

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface (A) par unité de temps. Flux de chaleur en coordonnées cylindriques (sans production de chaleur) est :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (\text{II.16})$$

Avec les hypothèses suivantes, l'équation (II.16) peut être simplifiée comme suit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (\text{II.17})$$

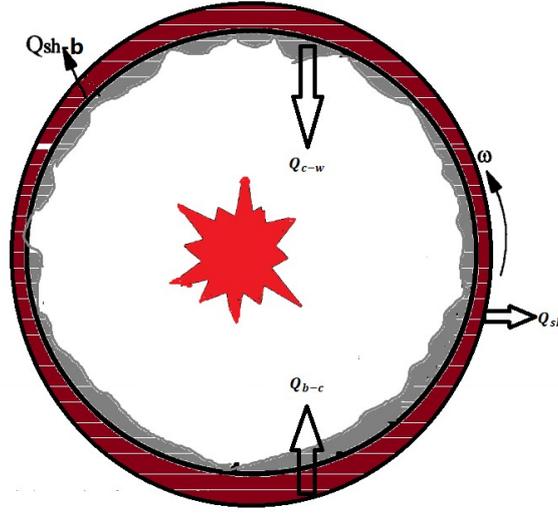


FIGURE II.2 – Les quantités de chaleur intérieure du four.

Appliquant les conditions limites ci-dessus et l'équation (II.17), on obtient les équations suivantes :

$$Q_{c-w} = \frac{2\pi \Delta Z k_c (T_w - T_c)}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)} \quad (\text{II.18})$$

$$Q_{b-c} = \frac{2\pi \Delta Z k_b (T_c - T_b)}{\ln \left( \frac{r_b}{r_c} \right)} \quad (\text{II.19})$$

$$Q_{sh-b} = \frac{2\pi \Delta Z k_{sh} (T_b - T_{sh})}{\ln \left( \frac{r_{sh}}{r_b} \right)} \quad (\text{II.20})$$

$$Q_{sh} = 2\pi \Delta Z r_{sh} h_{sh \rightarrow a} (T_{sh} - T_a) \quad (\text{II.21})$$

## II.7 Définition d'une ailette

Une ailette est un dispositif thermique conçu pour augmenter la surface de contact avec un fluide extérieur afin de renforcer les échanges convectifs. Plus la surface d'échange est grande, plus l'échange de chaleur est amélioré. Une technique pour augmenter cette surface d'échange consiste à ajouter des ailettes [24].

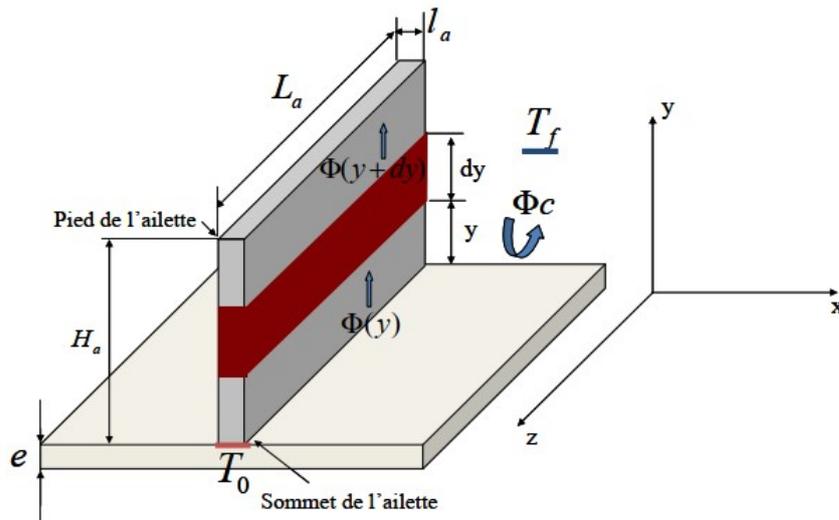


FIGURE II.3 – Hypothèses simplificatrices d'ailette.

Le champ de température à la surface de l'ailette étant évidemment multidimensionnel (la température dépend de plusieurs variables spatiales), le flux thermique perdu par l'ailette  $\Phi_a$  peut être déterminé en utilisant la relation suivante :

$$\Phi'_a = hdA(T_p - T_f) \quad (\text{II.22})$$

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 [24].

### II.7.1 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 :

$$\Phi(y) = -K_a A' \frac{dT}{dy} y \quad (\text{II.23})$$

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

$$\Phi(y + dy) = -K_a A' \frac{dT}{dy} (y + dy) \quad (\text{II.24})$$

### II.7.2 Le flux de chaleur $\Phi$

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 :

$$\Phi_c = hP'_a dy(T(y) - T_f) \quad (\text{II.25})$$

Avec la conservation du flux de chaleur en régime stationnaire, on obtient l'équation suivante :

$$\Phi(y) = \Phi(y + dy) + \Phi_c \quad (\text{II.26})$$

$$-K_a \frac{dT}{dy} \Big|_y = hP'_a dy (T(y) - T_f) - K_a A' \frac{dT}{dy} \Big|_{y+dy} \quad (\text{II.27})$$

### II.7.3 Four avec ailettes

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

$$\phi_A = kA \left( \frac{T_{vA} - T_{Aa'}}{L_A} \right) \quad (\text{II.28})$$

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

$$\phi'_a = h_a (T_{Aa'} - T_a) \quad (\text{II.29})$$

## II.8 Recherche bibliographique

Mirhosseini et al [19] ont conçu un système de récupération de chaleur en forme d'anneau autour d'un four à ciment dans l'usine de ciment Aalborg Portland au Danemark. Ils ont déterminé la température moyenne sur l'absorbeur, utilisée comme température du côté chaud des générateurs thermoélectriques (TEG), et ont optimisé des paramètres critiques du TEG, tels que la longueur des jambes et le facteur de remplissage. Leurs résultats montrent que les TEG à base d'antimoniure de zinc produisent plus d'énergie que ceux à base de tellurure de bismuth. Cependant, l'absorbeur en forme d'anneau agissant comme isolant augmente la température de surface du four, réduisant ainsi la sécurité. C'est pourquoi, dans une étude antérieure, un absorbeur en forme d'arc a été conçu pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur et le flux de fluide autour du four. Malgré les études précédentes, il manque une étude numérique complète qui combine la modélisation théorique et l'optimisation des systèmes TEG, y compris la géométrie du dissipateur de chaleur, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et météorologiques autour du four.

Cet article de Yun et al [34] présente une étude sur la caractérisation du mortier de ciment contenant des matériaux à changement de phase (PCMs) afin de contrôler le développement de la chaleur d'hydratation. La recherche a examiné les caractéristiques microstructurales et les propriétés du mortier de ciment avec des PCMs, telles que l'écoulement, la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Deux types de PCM ont été utilisés, avec jusqu'à 15% de ciment ajouté aux mélanges de mortier. Les PCMs utilisés sont le PCM avec baryum (PCM-Ba) et le PCM avec strontium (PCM-Sr). Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation de la température et le temps de libération maximale de la chaleur sont retardés avec l'ajout de jusqu'à 5% de PCM. Les PCM-Ba et PCM-Sr se révèlent efficaces pour réduire le développement de la chaleur d'hydratation. L'analyse microstructurale indique que le contenu cristalloïde du mortier de ciment sans PCM est supérieur d'environ 3% à celui du mortier avec PCM, indépendamment du type de PCM utilisé, et qu'il n'y a pas de différence significative dans la formation de cristaux entre le mortier avec ou sans PCM.

L'étude de Witt et al [32] examine les fours rotatifs, qui sont utilisés dans plusieurs opérations de traitement des minéraux ainsi que dans des industries connexes comme la fabrication de ciment. Étant donné qu'ils impliquent des processus complexes de transfert de chaleur et de masse multiphasique, l'optimisation doit idéalement être guidée par la modélisation numérique. Cet article propose une nouvelle approche hiérarchique générique, combinant séquentiellement des simulations en 2D par la méthode des éléments discrets (DEM) de tranches du lit, et des modèles de dynamique des fluides computationnelle (CFD) en 3D à deux phases pour l'ensemble du four, englobant à la fois le lit et l'espace libre gazeux. Les simulations DEM ont été utilisées pour dériver les vitesses moyennes des solides dans un lit pour diverses vitesses de rotation et tailles de particules, et ces données ont ensuite été utilisées pour calibrer et valider le modèle de rhéologie des solides utilisé dans le modèle CFD subséquent. Une friction coulombienne modifiée pour le lit dans le modèle CFD a montré un accord satisfaisant avec les résultats DEM sur une gamme de vitesses de rotation.

L'objectif de ce travail de Janati et al [16] est d'étudier le comportement mécanique et la déformabilité de la virole sous l'effet de la chaleur dans un four rotatif d'une cimenterie. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la maintenance préventive de ces fours, en particulier la validation du modèle par éléments finis qui simule le comportement élastoplastique du four. Le travail est basé sur l'étude de cas d'un four rotatif d'une cimenterie appartenant à un groupe industriel marocain. Tout d'abord, des mesures expérimentales des déformations du four en présence de chaleur sont effectuées. Ensuite, la méthode numérique des éléments finis est utilisée pour simuler la virole et la paroi réfractaire, cette simulation étant réalisée à l'aide du logiciel commercial PATRAN-NASTRAN. Enfin, pour une approche plus réaliste du comportement du four, les résultats obtenus par la méthode des éléments finis sont comparés à ceux des tests expérimentaux.

Les modèles numériques sont développés par Christopher Csernyei [9] pour analyser et comprendre les tendances au sein des fours rotatifs, permettant ainsi d'améliorer la quantification et l'utilisation de l'énergie. Cette étude propose un modèle unidimensionnel de four en utilisant des éléments de modèles existants, puis lie ce 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 l'enveloppe. Ces ventilateurs, couramment utilisés dans l'industrie, permettent de réduire la température de l'enveloppe et favorisent la formation de revêtements internes. La conductivité thermique à travers l'enveloppe du four est traitée comme un paramètre de calibration pour générer un profil de température de l'enveloppe plus précis, tandis qu'un modèle de convection forcée, développé pour un banc de jets frappant un grand cylindre, est mis en œuvre pour quantifier la résistance convective externe. Les équations gouvernantes du transfert de chaleur et de la chimie sont intégrées dans le logiciel Matlab R2014a pour produire des solutions unidimensionnelles des distributions de température et des fractions massiques des espèces observées dans un four rotatif à ciment. Une étude de validation est réalisée par rapport à un modèle unidimensionnel existant, montrant des résultats quantitatifs et qualitatifs raisonnables des profils de température et des sorties d'espèces. En utilisant des paramètres opérationnels d'une organisation partenaire, un profil des températures internes et externes et le développement axial correspondant des produits d'espèces sont également présentés. Les données de température de l'enveloppe scannée sont ensuite comparées aux résultats du modèle en tenant compte uniquement de la convection libre, et de la convection forcée des ventilateurs de refroidissement en fonctionnement. Une erreur de  $20 \geq \%$  a été observée lorsque les effets de la convection forcée sur l'enveloppe du four sont négligés.

Dans ce travail de Bouakkaz et al [8] le transfert de chaleur par convection forcée autour d'un cylindre circulaire en rotation, avec un taux de rotation non dimensionnel constant  $\alpha$  variant de 0 à 6, a été étudié pour des nombres de Reynolds compris entre 20 et 200 et un nombre de Prandtl de 0,7. Les calculs numériques ont été réalisés en utilisant un solveur de dynamique des fluides computationnelle basé sur la méthode des volumes finis, FLUENT. Les changements successifs dans le schéma d'écoulement ont été étudiés en fonction du taux de rotation. La suppression du décollement de vortex se produit à mesure que le taux de rotation augmente. Un second type d'instabilité apparaît à des vitesses de rotation plus élevées, où une série de vortex tournant dans le sens antihoraire se détache dans la couche de cisaillement supérieure. La rotation atténue cette instabilité secondaire et augmente le nombre de Reynolds critique pour l'apparition de cette instabilité. De plus, les résultats des coefficients de portance et de traînée ainsi que du nombre de Nusselt, moyennés dans le temps, ont été obtenus et comparés aux données de la littérature. Un bon accord a été obtenu pour les valeurs locales et moyennes.

Les travaux de cette thèse de M Tawk [28] portent sur le refroidissement des composants électroniques de puissance par métal liquide. Les efforts se sont concentrés plus particulièrement autour de deux fonctions : la pompe électromagnétique servant à mettre le fluide en mouvement et le refroidisseur omnicanaux situé sous la source de dissipation. Le mémoire de thèse se structure en quatre chapitres équivalents. Dans le premier, l'apport des métaux liquides pour le refroidissement des composants actifs de puissance est démontré. Dans un deuxième temps, l'étude théorique et expérimentale d'une pompe électromagnétique à conduction est effectuée. Le système de refroidissement est plus particulièrement abordé dans le troisième chapitre. Enfin, des réflexions sur la mise en œuvre des refroidisseurs à métaux liquides en électronique de puissance sont discutées.

Dans cette étude de Xin-Yue Lu [33], la calcination du clinker de ciment dans un four rotatif est un processus énergivore. La récupération de chaleur à partir de la surface de l'enveloppe du four est une méthode potentielle pour améliorer l'efficacité énergétique, rendant ainsi la production de ciment plus propre et durable. Dans ce travail, des méthodes ont été proposées pour évaluer les pertes de chaleur à travers l'enveloppe du four et les facteurs qui les influencent, en utilisant un four à ciment industriel en Chine comme étude de cas. Grâce à la thermographie infrarouge, la température de l'enveloppe et les pertes de chaleur à travers celle-ci ont été surveillées pendant 19 jours. Les calculs montrent que la perte de chaleur quotidienne à travers l'enveloppe du four dans la zone de calcination du four étudié est d'environ 140 GJ, les pertes par rayonnement et convection étant comparables, représentant respectivement 54% et 46% des pertes. Cinq variables opérationnelles principales affectant considérablement les pertes de chaleur ont été identifiées grâce à la méthode des forêts aléatoires et au coefficient de corrélation de Pearson. Les résultats de cette étude aideront les administrateurs d'entreprises à prendre conscience de l'importance d'améliorer l'efficacité énergétique du système de four, afin de concevoir des stratégies appropriées pour réduire les pertes de chaleur à travers l'enveloppe. Ce travail contribue également à une meilleure compréhension du fonctionnement des fours rotatifs pour réduire les pertes de chaleur. En posant les bases du recyclage ou de la réduction des pertes de chaleur à travers l'enveloppe du four, ce travail rend le processus de calcination du clinker de ciment plus durable.

Cette étude de A Gallo [11], montre que les fours rotatifs sont utilisés à travers le monde pour des processus industriels impliquant des traitements thermiques de matériaux particuliers. Cependant, ces processus consomment une grande quantité de combustibles fossiles.

Comme alternative, les fours rotatifs solaires sont envisagés en raison de leur polyvalence et de leur potentiel à remplacer les dispositifs traditionnels alimentés par des combustibles fossiles. Pour favoriser le développement de cette technologie, il est essentiel de contrôler la température des particules pendant le traitement. Dans ce contexte, un four rotatif à l'échelle de laboratoire a été construit et testé en utilisant un simulateur solaire à haut flux de 7 kWe à l'Université d'Antofagasta. Ce four est conçu pour traiter des matériaux particuliers de différentes natures et peut atteindre des températures supérieures à 800 °C sous diverses stratégies opérationnelles. Le carbure de silicium a été choisi pour les premiers tests en raison de son inertie, de sa résistance à des températures élevées (jusqu'à 1600 °C) et de son utilisation proposée comme vecteur de stockage thermique dans plusieurs recherches sur l'énergie solaire concentrée. Dans une première étape, le four vide a été préchauffé jusqu'à environ 800 °C, atteignant un état stable en moins de trois heures avec une puissance d'environ 370 W entrant dans la cavité du four. Ensuite, 43 g de carbure de silicium ont été introduits dans le four, et le système a été chauffé de nouveau jusqu'à un deuxième état stable au-dessus de 800 °C. À ce stade, les particules ont montré une augmentation rapide de leur température, dépassant 700 °C en moins de trois minutes après leur introduction. Un modèle numérique transitoire unidimensionnel a également été développé pour effectuer l'analyse thermique du four et estimer à la fois la température des particules et l'efficacité du système. Les résultats numériques ont montré un bon accord avec les données expérimentales, permettant de quantifier en détail les pertes thermiques. Le modèle a donc été utilisé pour prédire le comportement thermique d'un four rotatif solaire fonctionnant en mode batch.

Dans cet article de WJ Du [10], nous avons proposé un nouveau système de récupération de chaleur installé sur un four rotatif. Des mesures expérimentales ont été effectuées pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur et les performances d'écoulement du fluide de neuf échangeurs de chaleur dans le système de récupération de chaleur. Une plateforme expérimentale a été mise en place pour étudier les caractéristiques opérationnelles du système. Les résultats des mesures montrent que les températures de sortie des échangeurs de chaleur varient principalement en fonction de l'augmentation des températures d'entrée, bien que les expériences présentent un certain retard. De plus, la pression de sortie des échangeurs de chaleur varie en fonction des changements de pression d'entrée. Les paramètres de mesure des pressions d'entrée et de sortie suivent la même tendance et réagissent rapidement sans retard. Lorsque le débit massique d'entrée varie de 0 à 6 kg/s, les échangeurs de chaleur à tuyaux enroulés améliorent efficacement les performances de récupération de chaleur par rapport aux échangeurs de type radiant. Ensuite, les performances de récupération de chaleur de trois types différents d'échangeurs de chaleur dans le système ont été étudiées pour identifier les surfaces de transfert de chaleur offrant une meilleure efficacité thermique sur les fours rotatifs. Les mesures expérimentales indiquent que les performances de récupération de chaleur de l'échangeur de chaleur avec deux couches de tuyaux enroulés sont supérieures à celles des autres. De plus, le taux de transfert de chaleur de cet échangeur est augmenté de 15,3% par rapport à l'échangeur de chaleur existant dans la littérature.

L'étude de K Wang [29], présente un nouvel échangeur de chaleur impliquant des bancs de tubes alignés et tournés, proposé et étudié expérimentalement et numériquement. Il est utilisé dans un système de récupération de chaleur résiduelle dans une cimenterie et combine les caractéristiques des configurations en quinconce et alignées. Les caractéristiques de transfert de chaleur et d'écoulement de l'échangeur sont analysées. Les données expérimentales de l'agencement aligné tourné sont comparées à celles des agencements alignés, et des corrélations du

nombre de Nusselt ainsi que du facteur de friction sont obtenues. Une étude numérique bidimensionnelle est réalisée en utilisant la simulation CFD. Un modèle de l'échangeur de chaleur entier est construit et simulé. Les conditions aux limites sont formulées avec une température d'entrée de 300 °C et une température constante de la paroi du tube de 150 °C, avec une vitesse d'entrée variant 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 l'agencement aligné tourné. De plus, des simulations des bancs de tubes alignés et en quinconce sont réalisées pour les comparer avec le banc de tubes alignés tournés. Les résultats numériques indiquent une performance de transfert de chaleur supérieure du banc de tubes alignés tournés par rapport aux deux autres agencements. Le coefficient de transfert de chaleur est supérieur de 37,5 à 78,8% par rapport à l'agencement aligné, et de 32,7 à 66,7% par rapport à l'agencement en quinconce. Il présente également un niveau élevé d'intensité de turbulence ainsi qu'une grande vitesse maximale de l'air dans le banc de tubes, bien que la chute de pression soit élevée. Le nombre de Nusselt correspond assez bien à celui de l'agencement en quinconce, et le facteur de friction se situe entre les agencements alignés et en quinconce pour un nombre de Reynolds compris entre 6000 et 10000.

Dans cette recherche de Q Luo [17], la production de ciment Portland est l'un des processus industriels les plus énergivores. La consommation d'énergie pour la fabrication du ciment Portland est d'environ 110 à 120 kWh par tonne. Le four rotatif à ciment est l'équipement crucial utilisé pour la production de ciment. Environ 10 à 15% de l'énergie consommée pour la production du clinker de ciment est directement dissipée dans l'atmosphère par la surface externe du four rotatif. La technologie innovante pour la conservation de l'énergie est donc une nécessité urgente pour l'industrie du ciment. Dans cet article, nous proposons un nouveau système de récupération de chaleur résiduelle thermoélectrique pour réduire les pertes de chaleur des fours rotatifs à ciment. Ce système est configuré comme un ensemble d'unités de génération thermoélectrique disposées longitudinalement sur une coque secondaire coaxiale avec le four rotatif. Un modèle mathématique a été développé pour estimer les performances de la récupération de chaleur résiduelle. Les discussions se concentrent principalement sur la production d'électricité et les économies d'énergie, en prenant comme exemple un four rotatif à ciment de  $\Phi 4.8 \times 72$  m. Les résultats montrent que le système hybride de récupération de chaleur thermoélectrique Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe peut générer environ 211 kW de puissance électrique tout en économisant 3283 kW d'énergie. Par rapport à un four sans système de récupération thermoélectrique, le four équipé de ce système peut récupérer plus de 32,85% de l'énergie qui était auparavant perdue sous forme de chaleur résiduelle à travers la surface du four.

## II.9 Conclusion

Dans cette partie, L'étude thermique du four se concentre sur les différents modes de transfert de chaleur entre les gaz, les briques réfractaires et les surfaces solides, nous avons passé en revue les recherches existantes sur le four rotatif utilisé dans la production de ciment, soulignant son importance à travers une analyse de la littérature, ce qui justifie pleinement l'intérêt porté à ce sujet. Le prochain chapitre sera consacré à la méthode numérique employée pour l'analyse de notre four rotatif.

## Chapitre 3

### Méthode numérique et description de problème

# Chapitre III

## Méthode numérique et description de problème

### Introduction

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est une discipline de la mécanique des fluides qui s'appuie sur des méthodes numériques et des algorithmes pour résoudre et étudier les problèmes d'écoulement des fluides. Une expertise en dynamique des fluides est nécessaire pour interpréter et évaluer avec précision les résultats obtenus. Les prédictions réalisées par la CFD sont souvent validées par des données expérimentales, assurant ainsi une grande précision des résultats.

Différentes méthodes numériques sont employées en mécanique des fluides, chacune avec ses propres avantages et inconvénients :

- La méthode des différences finies
- La méthode des éléments finis
- La méthode des volumes finis

### III.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies pour la discrétisation repose sur la forme différentielle des équations aux dérivées partielles (EDP) à résoudre. Chaque dérivée est remplacée par une formule de différence approximative, généralement obtenue à partir d'un développement en série de Taylor. Le domaine de calcul est divisé en cellules hexaédriques, formant une grille, et la solution est calculée à chaque point nodal. Cette méthode est particulièrement intuitive lorsque la grille physique est cartésienne. La discrétisation aboutit à un système d'équations définissant la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, elle représente une approximation discrète de la solution continue [31].

### III.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le domaine en sous-domaines, souvent de forme triangulaire, avec un certain nombre d'inconnues associées aux nœuds, dépendant de la fonction de forme choisie. La fonction inconnue est approximée par un polynôme dont le degré, généralement faible, peut varier selon l'application. Cette méthode se déroule en deux étapes principales :

- Approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines, en utilisant des fonctions d'interpolation.
- Utilisation de la méthode des résidus pondérés, qui permet de transformer les équations aux dérivées partielles en une formulation intégrale [31].

### III.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine de calcul en un certain nombre de petites cellules ou volumes finis. Chaque volume fini est entouré par des faces sur lesquelles les flux sont calculés. L'idée principale est de formuler l'équation de conservation sous forme intégrale sur chaque volume fini. Cela permet de garantir la conservation des quantités physiques (comme la masse, l'énergie, etc.) dans chaque volume.

La méthode des volumes finis suit 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.

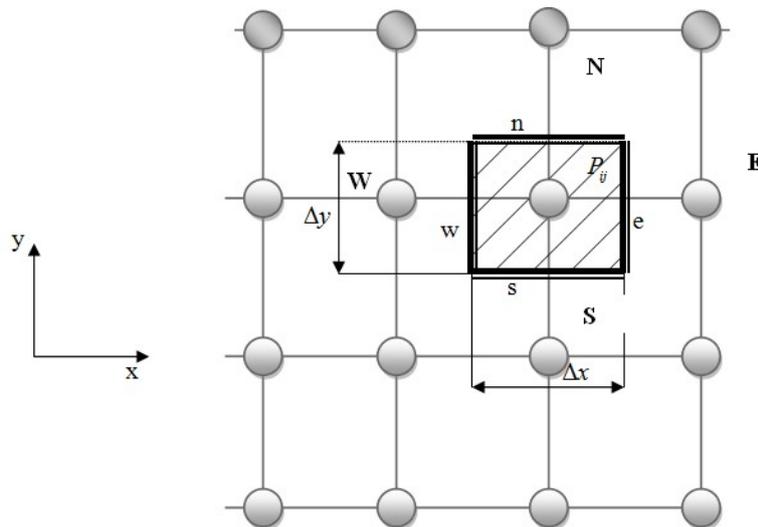


FIGURE III.1 – Discrétisation d'un domaine en volumes élémentaires pour un problème bidimensionnel.

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

- $\mathbf{n}$  : Interface « North » du VC
- $\mathbf{s}$  : Interface « South » du VC
- $\Delta x$  : Largeur du VC étudié
- $\Delta y$  : Longueur du VC étudié [31]

## III.4 Équations gouvernantes

Les équations gouvernantes sont exprimées sous forme différentielle, dérivée en considérant un volume de contrôle fixe et infiniment petit. Ces équations de conservation, qui incluent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, sont des équations aux dérivées partielles non linéaires. En raison de leur complexité, les analyses différentielles des écoulements de fluides et du transfert de chaleur ne peuvent être résolues numériquement qu'à l'aide d'un code CFD, tel qu'ANSYS FLUENT ou ANSYS CFX.

### III.4.1 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 :

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

### III.4.2 Conservation de quantité de mouvement

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

$$Q \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + v \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (\text{III.2})$$

$$Q \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + v \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (\text{III.3})$$

### III.4.3 Équation de conservation d'énergie

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

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

## III.5 Principales méthodes d'approches pour la turbulence

Les principales approches pour l'étude numérique de la turbulence sont :

- **D.N.S. (Direct Numerical Simulation)** : Simulation Numérique Directe.
- **L.E.S. (Large Eddy Simulation)** : Simulation des grandes échelles (ou structures).
- **R.A.N.S. (Reynolds Averaged Navier-Stokes)** : Équations de Navier-Stokes moyennées [5].

### III.5.1 Simulation numérique directe (DNS)

La Simulation Numérique Directe (DNS) résout toutes les fluctuations spatiales et temporelles sans recourir à des modèles simplifiés. Cependant, cette approche est extrêmement coûteuse en termes de ressources de calcul, ce qui limite son application à des géométries simples et à des écoulements de faible complexité.

### III.5.2 Simulation des grandes échelles (LES)

La Simulation des Grandes Échelles (LES) a été initialement développée dans les années 1960 pour modéliser les écoulements atmosphériques. Grâce aux avancées en puissance de calcul, cette méthode est devenue l'une des plus prometteuses et efficaces pour simuler les écoulements turbulents, en particulier dans des situations complexes en ingénierie.

### III.5.3 Équations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, R.A.N.S.)

La résolution numérique des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) se concentre sur les équations de transport pour les quantités moyennées, modélisant toutes les échelles de la turbulence. En ne résolvant que les variables moyennées, cette approche réduit considérablement les efforts de calcul. Cependant, en raison de la complexité inhérente de la turbulence, il est peu probable qu'un modèle RANS puisse capturer toutes les échelles turbulentes avec précision. C'est pourquoi les modèles RANS utilisent souvent des méthodes statistiques pour traiter ces limitations.

## III.6 Choix du modèle de turbulence

Le choix du modèle de turbulence dépend de plusieurs facteurs, tels que la physique des écoulements, le niveau de précision souhaité, les ressources de calcul disponibles et le temps alloué pour la simulation. Pour sélectionner le modèle le plus approprié à une application donnée, il est essentiel de bien comprendre les capacités et les limites de chaque option. ANSYS Fluent propose les modèles de turbulence suivants :

- Le modèle  $(k - \epsilon)$ .
- Les modèles  $(k - \omega)$ .
- Les modèles de Transition *SST*. [26]

### III.6.1 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 à deux équations : le modèle  $(k - \epsilon)$  Standard et ses variantes (RNG, Realizable, les modèles  $(k - \omega)$  Standard et SST)

### III.6.2 Modèles du deuxième ordre

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

## III.7 Description du problème

Une étude numérique réelle sur le transfert thermique dans les fours rotatifs : convection naturelle, convection forcée, 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 le logiciel *ANSYS FLUENT*.

Le four étudié dans ce projet d'usine (cimenterie de Zahana « S.C.I.Z » – MASCARA) figure III.2 avec dimensions présentées dans le tableau III.1.



FIGURE III.2 – Four rotatif d'usine (cimenterie de Zahana « S.C.I.Z » – MASCARA).

Cette étude est réalisée avec un modèle mathématique (3D). Le domaine extérieur est considéré comme un fluide.

Dimensions du four	Valeur
Longueur	80 m
Longueur de la partie cuisson	20 m
Diamètre	5 m
Épaisseur de virole	30 mm
Épaisseur de brique	220 mm
Inclinaison	2.29°

TABLEAU III.1 – Les dimensions du four rotatif.

## III.8 Mise en œuvre de la simulation dans ANSYS

### III.8.1 Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS, leader mondial dans le calcul par éléments finis, offre des outils avancés permettant de résoudre efficacement les problèmes de validation des produits et d'optimiser le processus de conception. Ces solutions permettent aux ingénieurs de développer des produits innovants et de haute qualité tout en réduisant les coûts et le temps de développement.

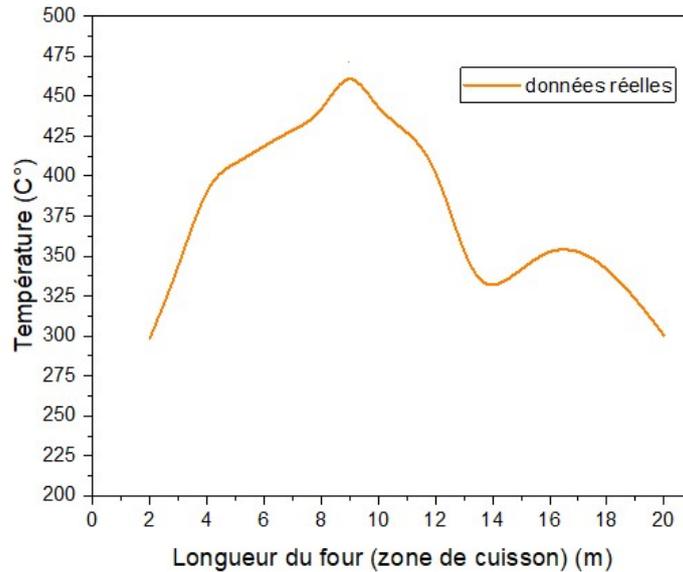


FIGURE III.3 – Profile de température de la zone cuisson de la virole dans l'usine.

L'interface Workbench d'ANSYS rend ces technologies accessibles même sans expertise approfondie en éléments finis. Son interface intuitive assure une prise en main rapide, tandis que l'automatisation de la reconnaissance des zones de contact et de la génération de maillage simplifie la préparation des modèles. Workbench intègre divers modules de simulation dans une plateforme unifiée, couvrant des domaines tels que la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, l'analyse thermique et acoustique.

Cette polyvalence fait d'ANSYS un outil incontournable pour de nombreux secteurs industriels, permettant aux entreprises de rester à la pointe de l'innovation grâce à des simulations précises et une gestion optimisée du processus de conception.

### III.8.2 Les avantages de la simulation numérique

La simulation numérique offre de nombreux avantages dans divers domaines de l'ingénierie et de la conception. Voici quelques-uns des principaux bénéfices :

- **Réduction des Coûts** : En permettant de tester virtuellement des prototypes, la simulation numérique réduit le besoin de fabriquer des prototypes physiques coûteux.
- **Gain de Temps** : Les simulations peuvent être réalisées rapidement, permettant d'accélérer le processus de développement et de mise sur le marché des produits.
- **Optimisation des Conceptions** : La simulation permet d'identifier et de corriger les défauts de conception avant la fabrication, améliorant ainsi la qualité et la performance des produits.
- **Flexibilité et Adaptabilité** : Les paramètres de simulation peuvent être facilement modifiés pour tester différents scénarios et conditions, offrant une grande flexibilité dans l'analyse.
- **Sécurité** : La simulation permet de tester des situations dangereuses ou inaccessibles dans la réalité, garantissant la sécurité des ingénieurs et des techniciens.
- **Compréhension et Visualisation** : Les résultats de simulation offrent une visualisation claire des phénomènes complexes, facilitant la compréhension et l'interprétation des comportements des produits.

- **Innovation** : En permettant de tester des concepts innovants sans risques élevés, la simulation numérique favorise l'innovation et le développement de nouvelles technologies.

## III.9 Modélisation dans ANSYS

L'analyse du comportement thermique d'un four rotatif dans une cimenterie est réalisée à l'aide des équations énergétiques dans ANSYS et de la mécanique des fluides via FLUENT.

En utilisant ANSYS Fluent, il est possible de modéliser les mécanismes de transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement au sein du four rotatif, ainsi que les interactions complexes entre les gaz de combustion et les matériaux solides. Cette étude vise à développer un modèle numérique précis du four rotatif de cimenterie, permettant d'analyser les distributions de température, les flux de chaleur et les zones critiques de perte énergétique.

Cette étude est si complexe qu'elle nécessite un temps de calcul considérable. Il est donc nécessaire de simplifier le modèle pour obtenir une solution suffisamment précise.

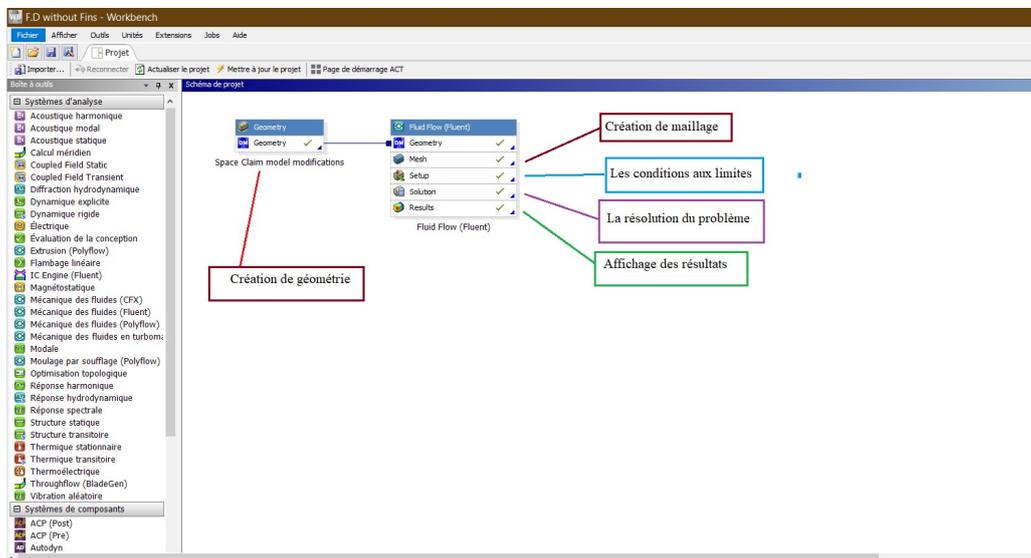


FIGURE III.4 – Définition du domaine étudié dans Workbench.

### III.9.1 Les étapes de la simulation

#### III.9.1.1 Création de géométrie

La création de géométrie est une étape fondamentale dans la modélisation et la simulation numérique. Elle permet de définir les formes et les structures de base qui seront utilisées pour les analyses ultérieures.

Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons les outils de dessin modulaire disponibles dans ANSYS pour créer des géométries précises et adaptées à nos besoins. *Sketching* est l'outil de base pour dessiner des contours en 2D. Il permet de tracer des lignes, des arcs, des cercles et d'autres formes géométriques simples. Ces esquisses servent de fondation pour la création de volumes en 3D. *Extrude* est une fonction qui permet de transformer une esquisse 2D en un objet 3D en lui donnant de la profondeur. En extrudant une forme, on peut créer des solides complexes à partir de contours simples.

Parmi les autres outils de dessin modulaire, on trouve :

- **Revolve** : pour créer des objets 3D en faisant tourner une esquisse autour d'un axe.
- **Sweep** : pour générer des formes en déplaçant une esquisse le long d'un chemin défini.
- **Loft** : pour créer des volumes en reliant plusieurs esquisses situées sur des plans différents.

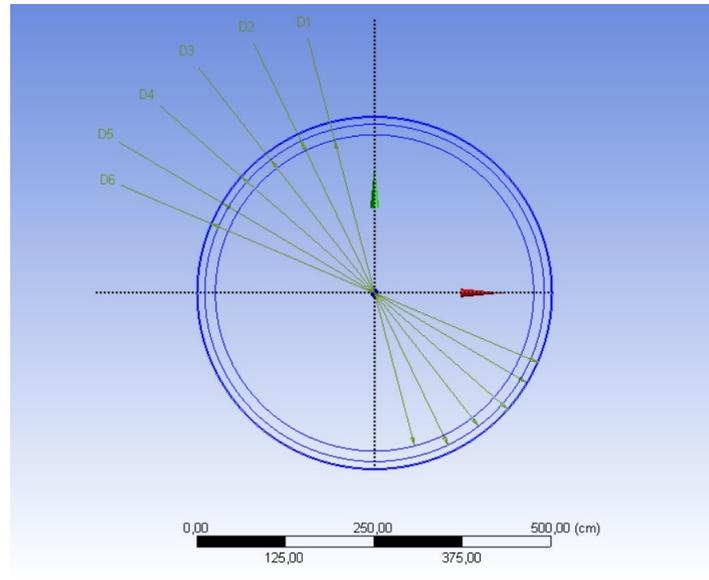


FIGURE III.5 – L'esquisse 2D de la géométrie.

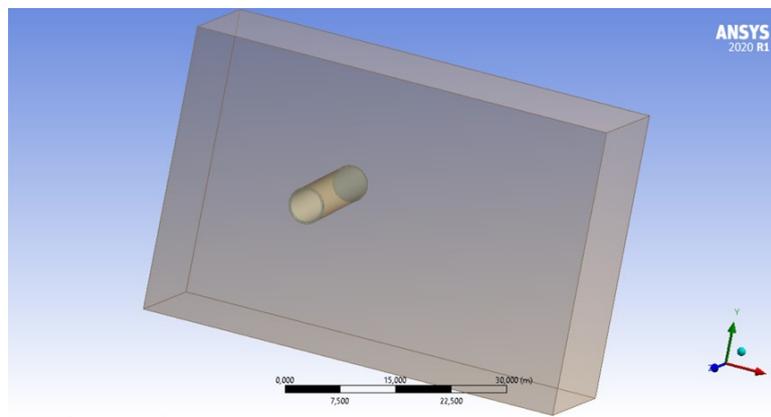


FIGURE III.6 – Création de la géométrie.

### III.9.1.2 Préparation de maillage

La préparation du maillage est essentielle pour la précision des simulations. Dans ANSYS Fluent, le maillage divise la géométrie en petits éléments pour faciliter l'analyse. Les types de maillage : structuré, non structuré et hybride, selon la complexité de la géométrie.

#### Outils de maillage :

- **Watertight Geometry Workflow** : Pour les géométries simples.
- **Meshing** : Création de maillages 2D et 3D.
- **Boundary Layer** : Ajout de couches limites pour capturer les gradients près des parois.

**Qualité du maillage** : Vérifier l'orthogonalité, l'aspect ratio et le *skewness* pour des résultats précis.

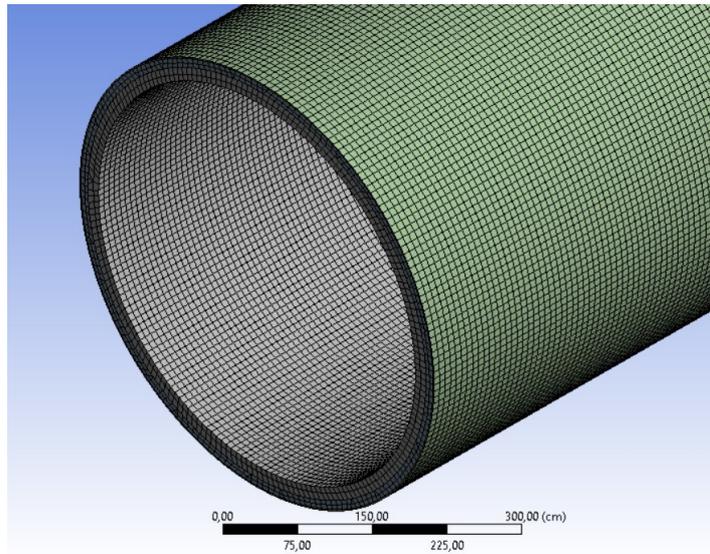


FIGURE III.7 – Maillage quadratique.

### III.9.1.3 Conditions aux limites

Dans le cadre de la modélisation et de la simulation de l'échange thermique dans un four rotatif de cimenterie avec ANSYS Fluent, les conditions aux limites jouent un rôle crucial pour définir les interactions thermiques et fluidiques.

#### Types de conditions aux limites spécifiques à notre cas :

- **Entrée (Inlet)** : Débit d'air et température des gaz de combustion entrant dans le four.
- **Sortie (Outlet)** : Conditions de sortie des gaz, telles que la pression et la température, pour assurer une évacuation adéquate des produits de combustion.
- **Parois (Walls)** : Température des parois du four et flux de chaleur.
- **Symétrie (Symmetry)** : Utilisée pour simplifier le modèle en exploitant la symétrie géométrique du four.

Les conditions aux limites de la zone cuisson du four (20 m) :

Caractéristique	Valeur
Vitesse d'injection d'air d'environnement	6 m/s
Température d'air d'injection	20 °C
Température d'entrée de la partie cuisson	950 °C
Température de sortie de la partie cuisson	1450 °C
Vitesse d'injection d'air chaud du brûleur	23.47 m/s
Température d'air chaud du brûleur	850 °C

TABLEAU III.2 – Conditions aux limites de la partie cuisson du four.

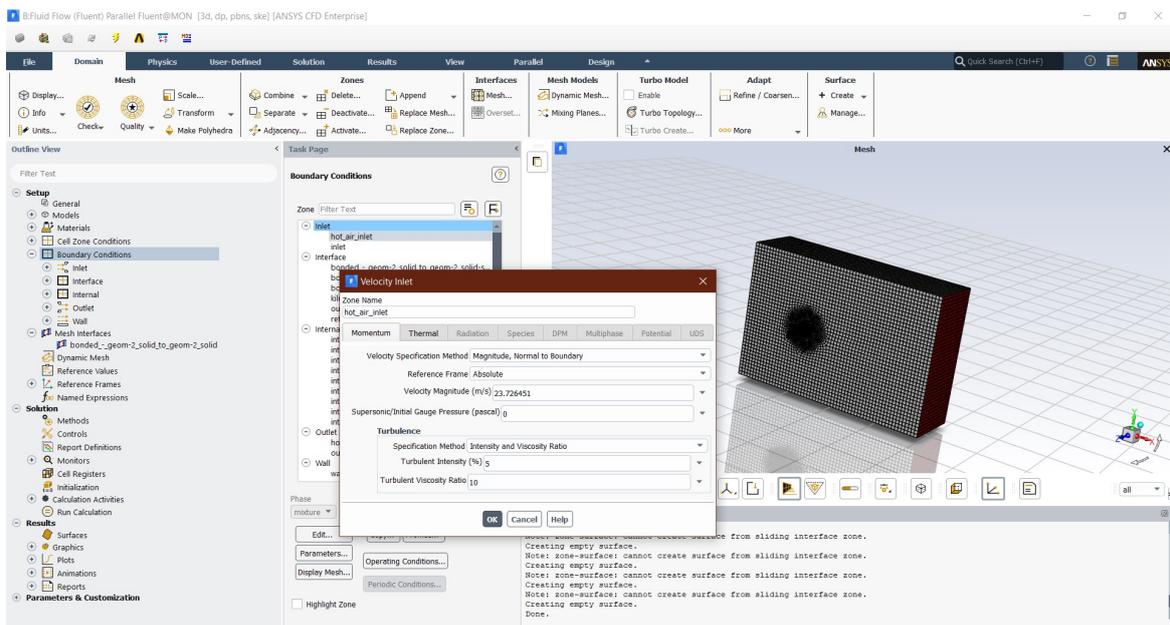


FIGURE III.8 – L'interface dans le logiciel ANSYS (Fluent).

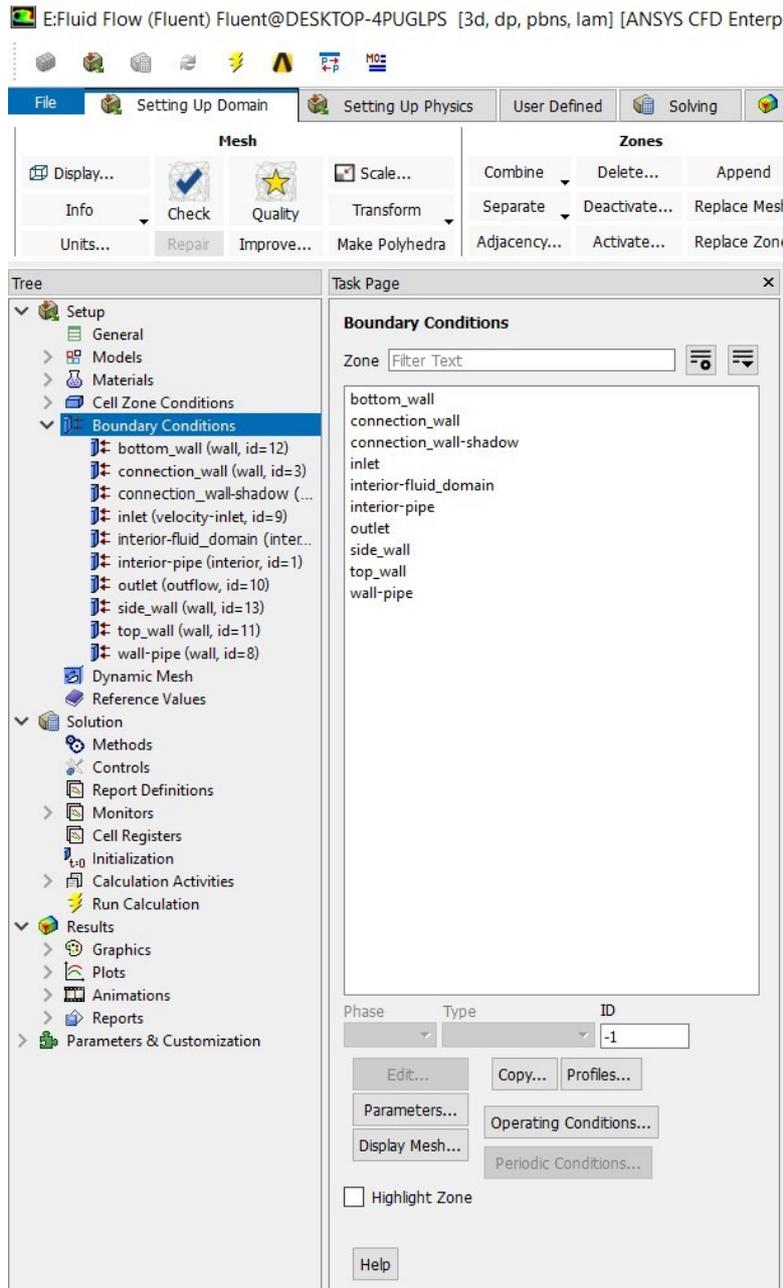


FIGURE III.9 – Conditions aux limites du modèle dans ANSYS.

### III.9.1.4 Démarrage des calculs

Le démarrage des calculs dans ANSYS Fluent est une étape clé pour obtenir des résultats précis et fiables. Voici les étapes spécifiques pour lancer les calculs dans le cadre de la simulation de l'échange thermique dans un four rotatif de cimenterie : **Initialisation** :

- **Initialisation hybride** : Utilisée pour obtenir une solution initiale stable en combinant les méthodes de volume de contrôle et de relaxation.

#### Paramètres de calcul :

- **Modèle de turbulence** : Choisir un modèle adapté, comme le  $k-\epsilon$  ou le  $k-\omega$ , pour capturer les effets de la turbulence dans les flux de gaz.
- **Modèle de rayonnement** : Sélectionner un modèle de rayonnement approprié pour simuler les échanges thermiques par rayonnement entre les parois et les gaz.

### Critères de convergence :

- Définir les critères de convergence pour les résidus de vitesse, de pression, de température et de turbulence.

### Exécution des calculs :

- **Nombre d'itérations** : Déterminer le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre la convergence.
- **Surveillance des résidus** : Suivre les résidus pendant les itérations pour s'assurer que les critères de convergence sont respectés.

**Post-traitement** : Analyser les résultats obtenus, comme les distributions de température, les flux de chaleur et les profils de vitesse.

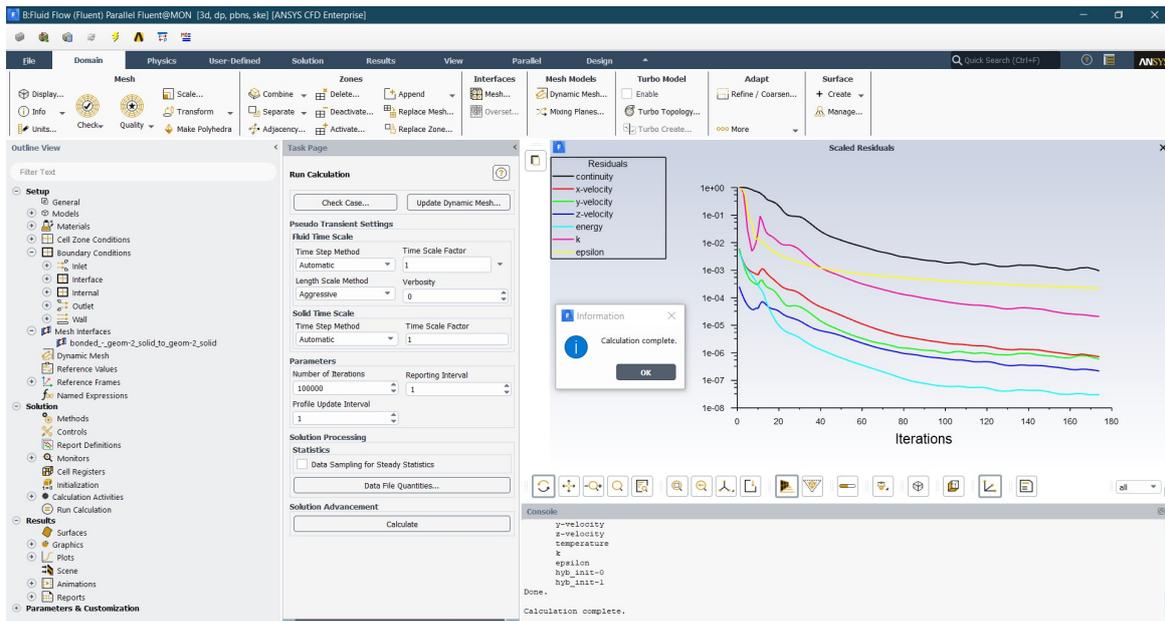


FIGURE III.10 – Convergence des résultats.

## III.10 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la présentation des outils numériques employés pour aborder la résolution de notre problématique, en particulier ANSYS Fluent. Nous avons exploré en profondeur les diverses méthodes numériques de discrétisation, notamment la méthode des volumes finis, ainsi que les approches de modélisation de la turbulence. L'accent a été mis sur les principes théoriques et pratiques qui sous-tendent ces techniques. Les résultats obtenus, ainsi que leur analyse détaillée et interprétation, feront l'objet d'une discussion approfondie dans le chapitre suivant.

# Chapitre 4

## Résultats et discussion

# Chapitre IV

## Résultats et discussion

### IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée de notre étude de cas, qui vise à déterminer la température dans la virole d'un four rotatif. Dans un premier temps, on va faire une analyse de la virole sans ailettes, en comparant les résultats de la simulation avec les données réelles obtenues de l'usine. Cette comparaison permettra de valider la précision et la fiabilité de nos simulations. Ensuite, nous reproduirons la même virole en ajoutant des ailettes à la surface, tout en maintenant les mêmes conditions aux limites. Cette étape nous permettra d'évaluer l'effet des ailettes sur la dissipation thermique et d'identifier les configurations optimales pour améliorer l'efficacité thermique du four rotatif. Les simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT, reconnu pour sa capacité à modéliser avec précision les phénomènes thermiques complexes. À travers cette analyse, nous visons à fournir des insights précieux sur les dynamiques thermiques au sein des fours rotatifs et à proposer des recommandations pratiques pour les applications industrielles et les recherches futures.

### IV.2 Résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats obtenus à partir des simulations effectuées avec ANSYS Fluent. L'objectif principal est de déterminer la distribution de température dans le four rotatif et d'explorer l'impact de l'ajout d'ailettes sur sa surface extérieur. Nous examinons en détail comment la forme, la taille et le nombre d'ailettes influencent la dissipation et le refroidissement thermique. Les résultats sont discutés pour comprendre les phénomènes thermiques en jeu et évaluer l'efficacité des modifications proposées. Cette analyse permet de tirer des conclusions pertinentes et de formuler des recommandations pour des améliorations futures.

### IV.3 Simulation sans Ailettes

Pour commencer notre analyse, nous procédons à une validation afin d'assurer la crédibilité de notre travail. La figure (49) illustre les températures obtenues dans notre étude, comparées aux températures mesurées dans la salle de commande de l'usine (cimenterie de zahana « S.CI.Z » – MASCARA). Cette première étape se concentre sur la simulation du four rotatif sans ajout d'ailettes, permettant d'établir une base de référence pour les comparaisons ultérieures. Les

résultats obtenus nous permettent de mieux comprendre la distribution thermique naturelle du four et de poser les fondations pour l'analyse des modifications apportées par l'ajout d'ailettes.

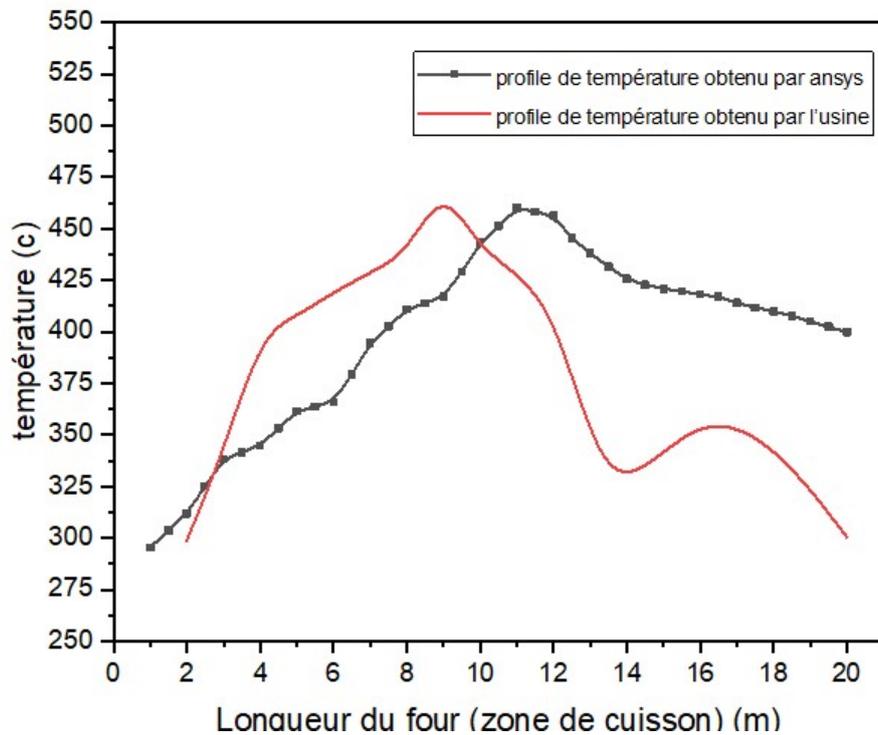


FIGURE IV.1 – Profil de température externe de la virole de notre étude par rapport celle de l'usine.

La figure IV.1 compare les températures obtenues à partir de notre simulation avec les températures mesurées dans la salle de contrôle de l'usine (cimenterie de zahana « S.CI.Z » – MASCARA). Cette comparaison est essentielle pour vérifier la précision et la fiabilité de notre modèle de simulation. La courbe rouge représente le profil de température réelles obtenu par l'usine, tandis que la courbe noire représente les résultats de la simulation. Ce graphique illustre la température de la virole en fonction de la longueur du four. Au début, les deux températures augmentent à un rythme similaire, avec la température réelle commençant à 298,4 °C et celle de la simulation à 295,38 °C. Les deux courbes atteignent leur température maximale, avec la température réelle atteignant 471,46 °C à la longueur de 9 mètres, et la simulation atteignant 460,22 °C à 11 mètres. Ensuite, les températures commencent à diminuer, mais à des rythmes différents. À 20 mètres, la température réelle est de 300,41 °C, tandis que celle de la simulation est de 399,74 °C. Cette différence de rythme peut être attribuée à plusieurs facteurs. Notre étude repose sur une simulation numérique théorique, tandis que les données de l'usine reflètent un phénomène réel. De plus, l'épaisseur du croûtage prise en compte dans notre simulation est une estimation, et l'état des briques réfractaires du four (neuves ou usées) peut également influencer les résultats.

Ces différences soulignent l'importance de divers facteurs affectant le fonctionnement du four et la simulation elle-même. Malgré ces écarts, la validation montre que notre modèle est suffisamment précis pour être utilisé dans des analyses ultérieures.

### IV.3.1 Contour de température

La figure IV.2 présente la répartition de la température au sein du four rotatif, mettant en évidence trois zones distinctes. La couche la plus interne, connue sous le nom de ‘croûtage du four’ ou ‘coating’, affiche des températures élevées, variant de 1400 °C à 850 °C. Cette zone est cruciale pour les réactions chimiques et la fusion des matériaux. Ensuite, la couche de ‘brique réfractaire’ montre des températures comprises entre 850° C et 500 °C. Cette couche joue un rôle essentiel dans l’isolation thermique, protégeant la structure externe du four contre les températures extrêmes. Enfin, la couche externe, appelée ‘virole’, atteint une température d’environ 460 °C. Cette couche constitue la structure principale du four et doit être conçue pour résister aux contraintes thermiques et mécaniques.

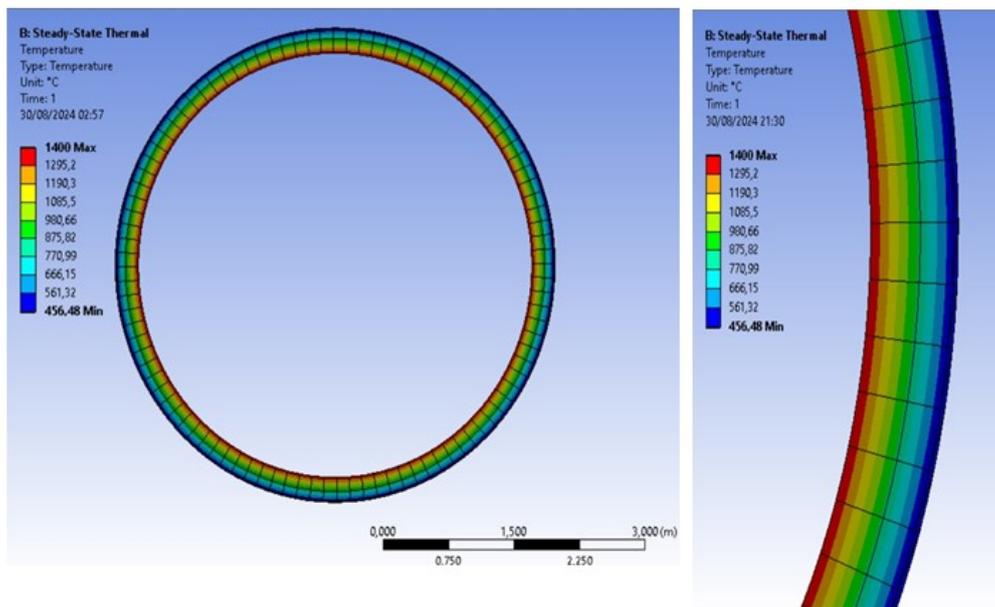


FIGURE IV.2 – Contour de température.

### IV.3.2 Contour des lignes de courant

La figure IV.3 présente les contours des lignes de courant autour du four rotatif. Elle montre que l’air, avec une vitesse initiale de 6 m/s, atteint le four rotatif par le côté, aérodynamique du four, les lignes de courant s’écoulent de manière fluide autour de celui-ci. Cependant, lorsque l’air atteint le four, sa vitesse augmente à 12 m/s, ce qui entraîne des formations de petits vortex derrière le four, indiquant des zones de recirculation.

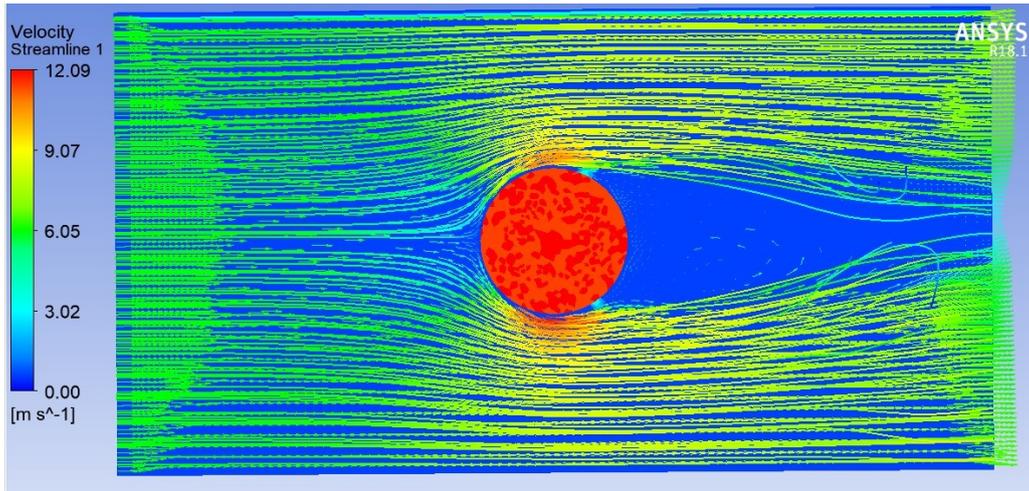


FIGURE IV.3 – Contour des lignes de courant.

### IV.3.3 Contour de pression

La figure IV.4 présente les contours de pression autour du four rotatif, montre une distribution de pression globalement basse autour du four rotatif. Cependant, une pression légèrement plus élevée de 6[Pa] est observée à l'intérieur du four et dans la zone de contact direct du four avec l'air extérieur. Ces variations de pression, bien que faibles, peuvent influencer la stabilité structurelle et l'efficacité thermique du four.

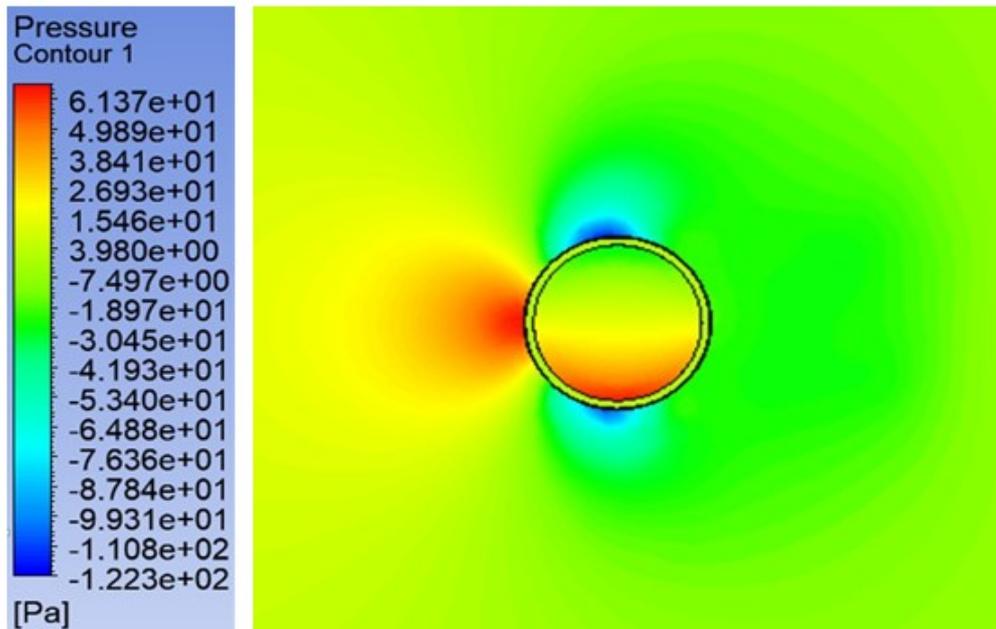


FIGURE IV.4 – Contour de pression.

## IV.4 Optimisation des ailettes dans le four rotatif

Après avoir analysé le four rotatif sans ailettes, cette section se concentre sur l'impact de l'ajout d'ailettes sur la distribution de la température, les lignes de courant et les contours de pression. Les ailettes sont des dispositifs ajoutés pour améliorer l'efficacité thermique en augmentant la surface d'échange de chaleur.

En appliquant les mêmes conditions aux limites que pour le four sans ailettes. Les paramètres de simulation ont été ajustés pour inclure différentes configurations d'ailettes, en variant leur forme, taille et nombre.

### IV.4.1 La Première Forme d'Ailettes

Dans l'étude de l'échange thermique au sein des fours rotatifs, la conception et l'implémentation des ailettes jouent un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité thermique. La première forme d'ailettes analysée dans cette recherche est le prisme à base carrée. Ce type d'ailette est choisi pour sa géométrie simple et sa capacité à augmenter la surface d'échange thermique de manière significative.

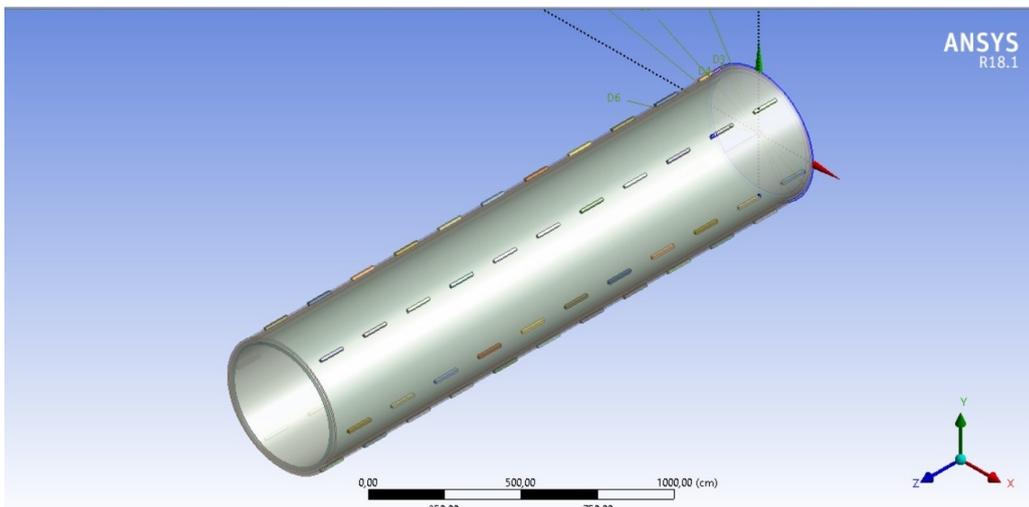


FIGURE IV.5 – La géométrie du four rotatif avec la première forme d'ailettes.

La Figure IV.5 illustre la géométrie du four rotatif avec la première forme d'ailettes utilisée dans notre étude. Cette ailette est conçue comme un prisme à quatre côtés avec une base carrée. Les côtés de la base carrée mesurent 10 cm, et la longueur du prisme s'étend sur 1 mètre. Il y a un total de 50 ailettes de ce type installées sur l'extérieur du four.

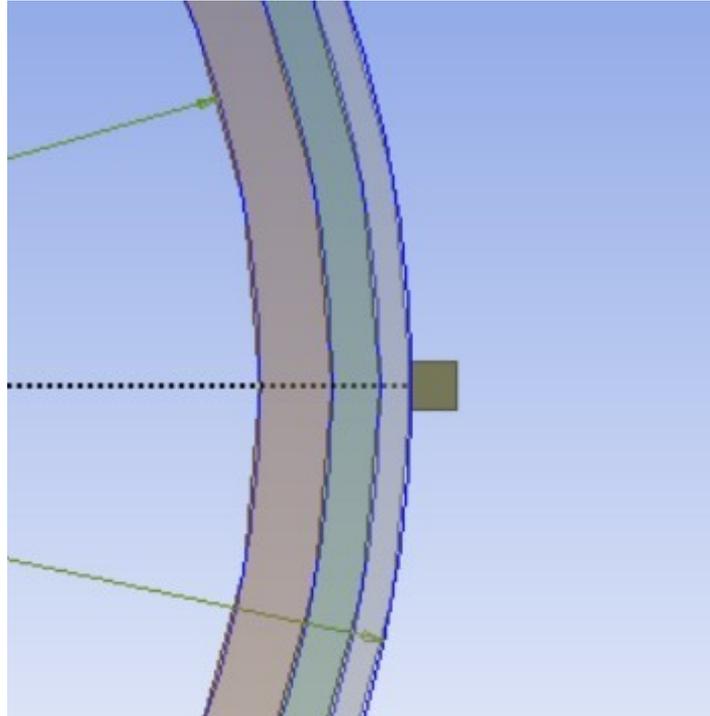


FIGURE IV.6 – Vue 2D de la Géométrie du Four avec Ailettes.

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

La figure IV.7 illustre les trajectoires des particules de fluide à l'extérieur du four, mettant en évidence les zones de recirculation et les chemins préférentiels de l'écoulement. L'air, avec une vitesse initiale de 6 m/s, atteint le four rotatif. L'ajout des ailettes rend le four légèrement moins aérodynamique, comme le montrent les côtés supérieur et inférieur où l'on observe une augmentation visible de la vitesse de l'air, atteignant 11,4 m/s. De plus, une zone d'air plus perturbée se crée derrière le four. Il est également important de noter que la vitesse maximale de l'air est légèrement inférieure à celle observée dans le cas d'un four sans ailettes.

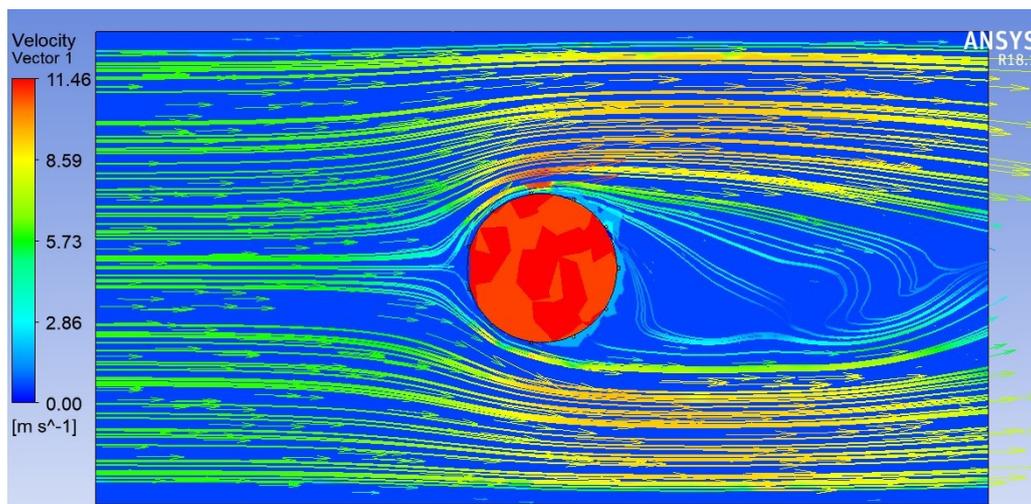


FIGURE IV.7 – Contour des lignes de courant.

### IV.4.3 Contour de température

La figure IV.8 illustre la distribution thermique à l'intérieur du four, mettant en évidence les zones de haute et de basse température. Les résultats montrent une dégradation de la température, passant de 1400 °C à l'intérieur du four à 445 °C sur l'extérieur de la virole. Le point le plus froid se situe à l'extrémité la plus éloignée de l'ailette.

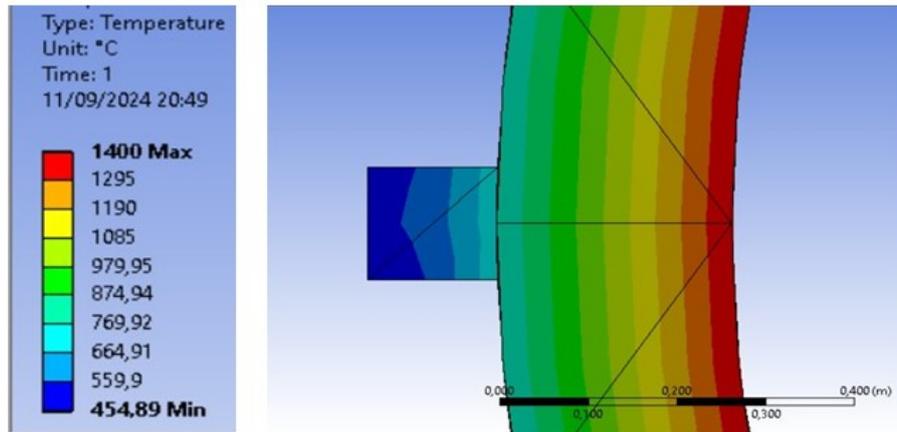


FIGURE IV.8 – Contour de température.

### IV.4.4 Graphique de Température

La figure IV.9 représente la variation de la température en fonction de la longueur du four rotatif équipé des ailettes de la première forme, qui montre une augmentation de la température de 276 °C à 446 °C au cours des 12 premiers mètres du four. Ensuite, la température commence à diminuer, passant de 446 °C à 380 °C entre 12 et 20 mètres.

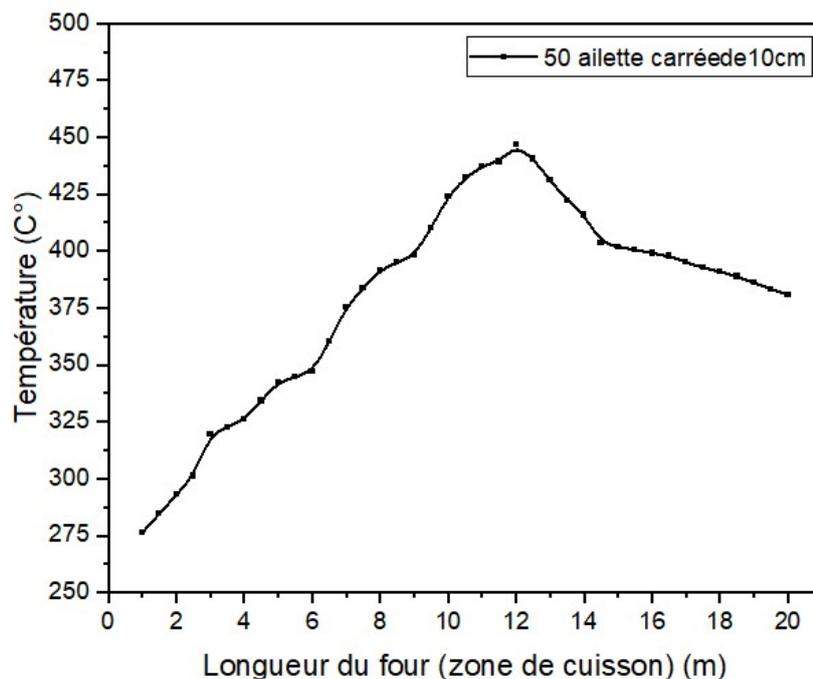


FIGURE IV.9 – Variation de la Température externe de la virole.

## IV.5 Impact du nombre d'ailettes

La figure IV.10 présente une représentation graphique des variations de température externe en fonction de la longueur du four rotatif, avec quatre configurations différentes d'ailettes : 50, 70, 100 et 120 ailettes. Toutes les ailettes ont la même taille et la même forme, ce qui permet de comparer directement l'impact du nombre d'ailettes sur la distribution de la température externe.

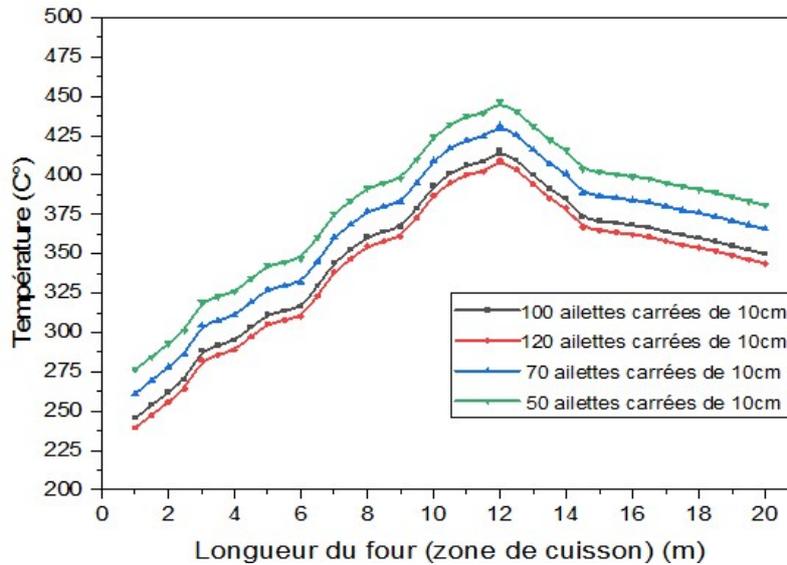


FIGURE IV.10 – Profil de Température avec quatre configurations d'ailettes.

### IV.5.1 Résultats et Analyse

- **50 ailettes** : La courbe correspondant à 50 ailettes montre une température externe maximale de 446 °C. Cette configuration, avec un nombre limité d'ailettes, entraîne une dissipation thermique moins efficace, ce qui se traduit par des températures externes plus élevées.
- **70 ailettes** : La courbe pour 70 ailettes indique une température externe maximale de 431 °C, soit une diminution de 15 °C par rapport à la configuration avec 50 ailettes. L'augmentation du nombre d'ailettes améliore la dissipation thermique, réduisant ainsi les températures externes.
- **100 ailettes** : La courbe pour 100 ailettes montre une température externe maximale de 415 °C, soit une diminution de 16 °C par rapport à la configuration avec 70 ailettes. L'ajout d'ailettes supplémentaires continue d'améliorer l'échange de chaleur, abaissant davantage les températures externes.
- **120 ailettes** : La courbe pour 120 ailettes présente une température externe maximale de 409 °C, soit une diminution de 6 °C par rapport à la configuration avec 100 ailettes. Bien que l'augmentation du nombre d'ailettes continue de réduire les températures, l'effet devient moins prononcé à mesure que le nombre d'ailettes augmente.

L'analyse des courbes de température montre que l'augmentation du nombre d'ailettes améliore l'efficacité thermique du four rotatif. Cependant, les diminutions de température deviennent moins significatives à mesure que le nombre d'ailettes augmente. Cela s'explique par

le fait que chaque ailette supplémentaire contribue de moins en moins à l'amélioration de la dissipation thermique, en raison de la saturation de la surface d'échange de chaleur et des limitations physiques du système.

Cette surcharge peut poser des problèmes à long terme, affectant la durabilité et la stabilité structurelle du four. Par conséquent, après analyse, le nombre optimal d'ailettes à considérer est de 100, car il offre un bon équilibre entre efficacité thermique et contraintes mécaniques.

## IV.6 Impact de la Taille des Ailettes

La figure IV.11 présente la température en fonction de la longueur du four rotatif pour trois tailles d'ailettes différentes : 5 cm, 10 cm et 15 cm. Ces ailettes ont une base carrée, et les dimensions indiquées représentent la longueur des côtés de cette base. L'objectif de cette analyse est de comprendre l'impact de la taille des ailettes sur la distribution de la température le long du four et d'identifier la meilleure configuration parmi les trois.

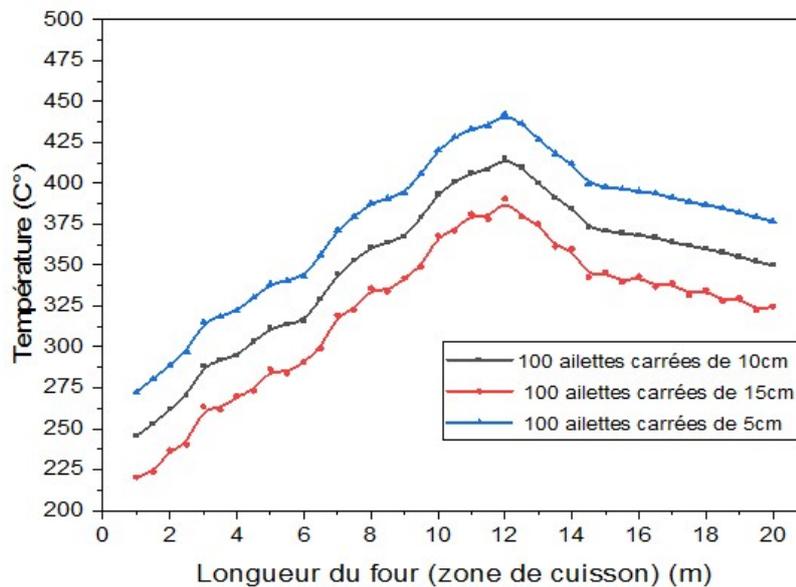


FIGURE IV.11 – La variation de la Température avec trois tailles d'ailettes.

### IV.6.1 Analyse et discussion

#### IV.6.1.1 Efficacité du Transfert de Chaleur

- **Ailettes de 5 cm** : La température maximale de 442 °C indique une dissipation de chaleur moins efficace. La surface de contact plus petite limite le transfert de chaleur, ce qui entraîne des températures plus élevées.
- **Ailettes de 10 cm** : Avec une température maximale de 415 °C, ces ailettes montrent une amélioration notable dans la dissipation de chaleur par rapport aux ailettes de 5 cm. L'augmentation de la surface de contact permet un meilleur transfert de chaleur. La différence de température de 27 °C par rapport aux ailettes de 5 cm souligne cette amélioration.

- **Ailettes de 15 cm** : La température maximale de 390 °C démontre l'efficacité supérieure des ailettes plus grandes. Cependant, les fluctuations observées indiquent une distribution de chaleur inégale, créant des points chauds qui pourraient poser des problèmes pour l'intégrité thermique du four. La différence de température de 25 °C par rapport aux ailettes de 10 cm et de 52 °C par rapport aux ailettes de 5 cm montre l'impact significatif de l'augmentation de la taille des ailettes.

#### IV.6.1.2 Distribution de la Température

- **Ailettes de 5 cm** : La distribution de la température est probablement plus uniforme, mais avec des températures globalement plus élevées.
- **Ailettes de 10 cm** : Une meilleure uniformité de la température est attendue, avec une réduction des points chauds par rapport aux ailettes de 5 cm.
- **Ailettes de 15 cm** : Bien que ces ailettes offrent la meilleure dissipation de chaleur, les fluctuations de température indiquent une distribution de chaleur inégale, ce qui pourrait entraîner des points chauds et des zones de surchauffe.

Parmi les trois tailles d'ailettes étudiées, les ailettes de 10 cm semblent offrir le meilleur compromis entre efficacité de dissipation de chaleur et uniformité de la distribution de la température. Elles réduisent significativement la température maximale par rapport aux ailettes de 5 cm (27 °C de moins) tout en évitant les fluctuations de température inégales observées avec les ailettes de 15 cm. Cela fait des ailettes de 10 cm la configuration optimale pour améliorer l'efficacité thermique du four tout en maintenant une distribution de chaleur plus uniforme.

## IV.7 La Deuxième Forme des Ailettes

Pour cette section, nous allons examiner l'impact de l'utilisation d'ailettes en forme de prisme triangulaire au lieu de prismes carrés. L'objectif est de comparer les performances de ces deux formes en termes de dissipation de chaleur et de distribution de la température dans le four rotatif. Cette comparaison nous permettra de déterminer si la forme triangulaire offre des avantages supplémentaires en termes de transfert de chaleur et d'uniformité de la température.

La figure IV.12 illustre la géométrie 3D de la nouvelle ailette sur l'extérieur du four, où il s'agit d'un prisme triangulaire avec des côtés de 10 cm de longueur. Le nombre total d'ailettes est de 100. Nous allons maintenant analyser les différences de performance entre cette nouvelle forme d'ailettes et les prismes carrés précédemment étudiés.

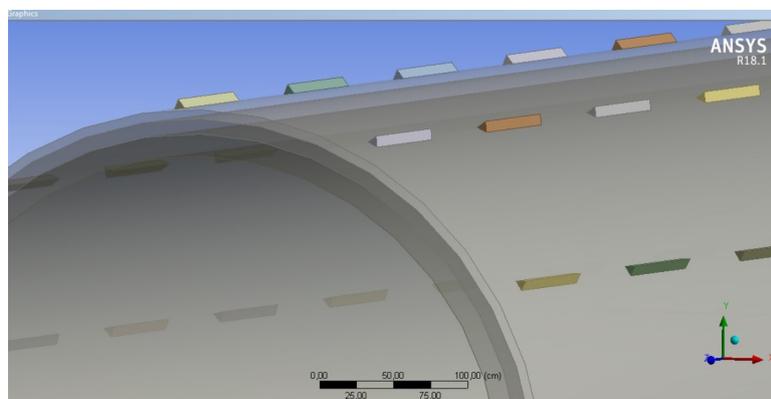


FIGURE IV.12 – La géométrie du four rotatif avec la Deuxième forme d'ailettes.

La figure IV.13 illustre la géométrie 2D de la nouvelle ailette sur l'extérieur du four , où il est facile de différencier entre les trois parois et comment l'ailette est installée.

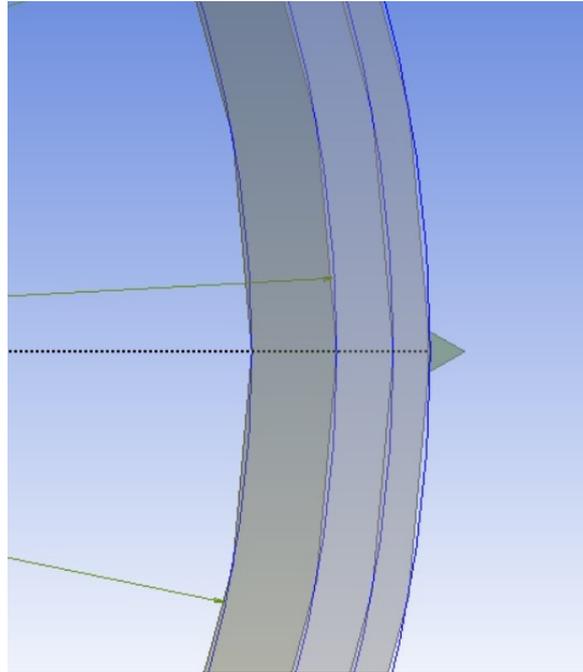


FIGURE IV.13 – Vue 2D de la Géométrie du Four avec Ailettes.

### IV.7.1 Contour des Lignes de Courant

Dans cette section, nous allons discuter de la figure IV.14, qui montre les contours des lignes de courant autour des ailettes. Nous pouvons observer que l'ajout des ailettes crée une certaine traînée par rapport à une configuration sans ailettes. Cependant, en comparant les ailettes triangulaires aux ailettes carrées, il est évident que les ailettes triangulaires sont plus aérodynamiques. Cela se voit clairement en examinant les lignes de courant et la vitesse des vecteurs.

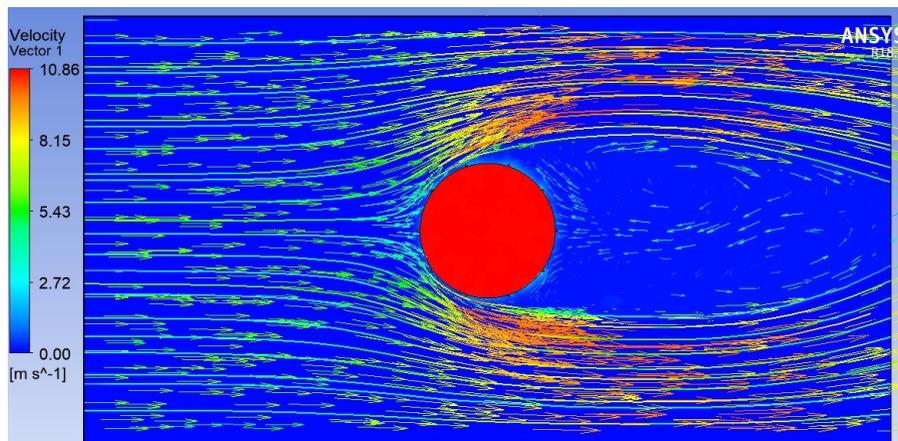


FIGURE IV.14 – Contour des Lignes de Courant.

### IV.7.2 Contour de température

La figure IV.15 présente les contours de température obtenus à partir des simulations effectuées avec ANSYS pour le four rotatif équipé des ailettes en forme de prisme triangulaire. Cette figure illustre la distribution thermique à l'extérieur du four, mettant en évidence les zones de haute et de basse température. Les résultats montrent que la température à l'intérieur du four est de 1400 °C, tandis que la température de la virole est de 430 °C. Bien que cela représente une amélioration par rapport au four sans ailettes, cette configuration est moins performante comparée aux résultats obtenus avec les ailettes carrées.

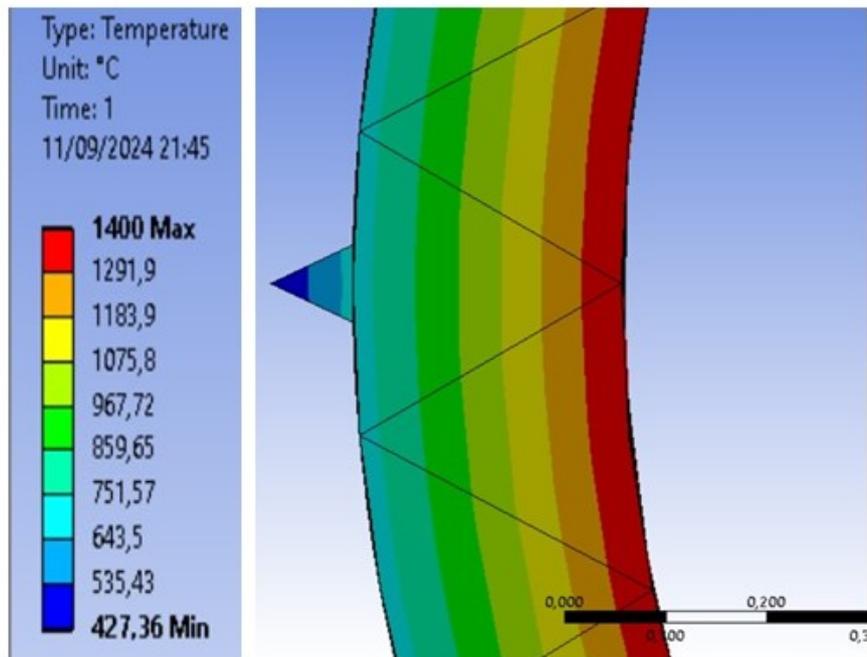


FIGURE IV.15 – Contour de température.

### IV.7.3 Graphique de Température

La figure IV.16 présente la variation de la température sur la virole en fonction de la longueur du four pour deux types d'ailettes dans notre configuration ultime, avec des côtés de 10 cm et un nombre total de 100 ailettes. Ce graphique permet de comparer l'efficacité des deux formes d'ailettes en termes de dissipation de chaleur et de distribution de la température sur la surface de la virole.

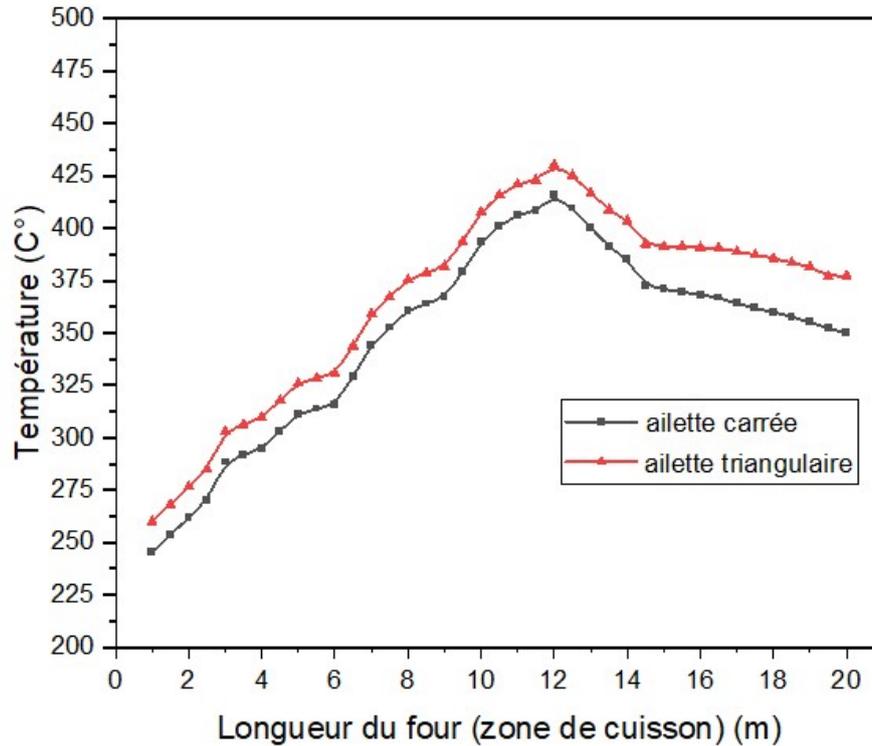


FIGURE IV.16 – La variation de Température dans les deux configurations.

#### IV.7.4 Analyse du Graphique

En analysant le graphique, nous pouvons observer que le four avec les deux configurations géométriques d'ailettes se comporte de manière similaire en termes de taux d'augmentation de la température, de la longueur à laquelle nous atteignons la température maximale, et de la diminution de la température qui suit. Cependant, la différence entre les deux configurations réside dans les températures elles-mêmes.

- **Premiers 12 mètres** : On observe une différence d'environ  $15^{\circ}\text{C}$ , où les ailettes carrées maintiennent une température plus basse que les ailettes triangulaires.
- **Températures Maximales** : Les températures maximales atteintes sont de  $415^{\circ}\text{C}$  pour les ailettes carrées et de  $430^{\circ}\text{C}$  pour les ailettes triangulaires.
- **De 12 à 20 mètres** : La température du four avec les ailettes carrées diminue à un rythme plus rapide que celle du four avec les ailettes triangulaires, au point que la différence de température entre les deux configurations atteint presque  $28^{\circ}\text{C}$ . Les résultats obtenus peuvent être expliqués par :
  - **Surface de Contact** : Les ailettes carrées possèdent une plus grande surface de contact avec l'environnement extérieur par rapport aux ailettes triangulaires. Cette surface accrue permet une dissipation de chaleur plus efficace, car une plus grande quantité de chaleur peut être transférée de la virole vers l'air ambiant.
  - **Aérodynamisme** : Les ailettes triangulaires sont plus aérodynamiques, ce qui permet à l'air de glisser plus facilement autour d'elles. Cela réduit la friction avec les molécules d'air, ce qui signifie que le refroidissement des ailettes triangulaires est moins efficace par rapport aux ailettes carrées. En revanche, les ailettes carrées, étant moins aérodynamiques,

créent plus de turbulence et de friction avec l'air, ce qui améliore le transfert de chaleur et permet un refroidissement plus efficace. Ces observations montrent que, bien que les deux configurations aient des performances similaires en termes de profil de température, les ailettes carrées sont plus efficaces pour maintenir des températures plus basses sur la longueur du four, en particulier après les 12 premiers mètres. Cela est principalement dû à leur plus grande surface de contact et à leur capacité à créer plus de turbulence, ce qui améliore le transfert de chaleur.

## IV.8 Comparaison entre le Four sans Ailettes et le Four avec ailettes

Après l'analyse de multiples configurations de taille, nombre et formes d'ailettes, nous concluons que les configurations les plus adaptées sont celles des ailettes carrées, avec une longueur de côté de 10 cm et un nombre total de 100 ailettes, ainsi que des ailettes triangulaires.

C'est pourquoi nous présentons la figure IV.17, qui est une représentation de la température externe de la virole en fonction de la longueur du four, pour trois configurations : sans ailettes, avec des ailettes triangulaires, et avec notre configuration optimale d'ailettes carrées, afin de voir les résultats en détail.

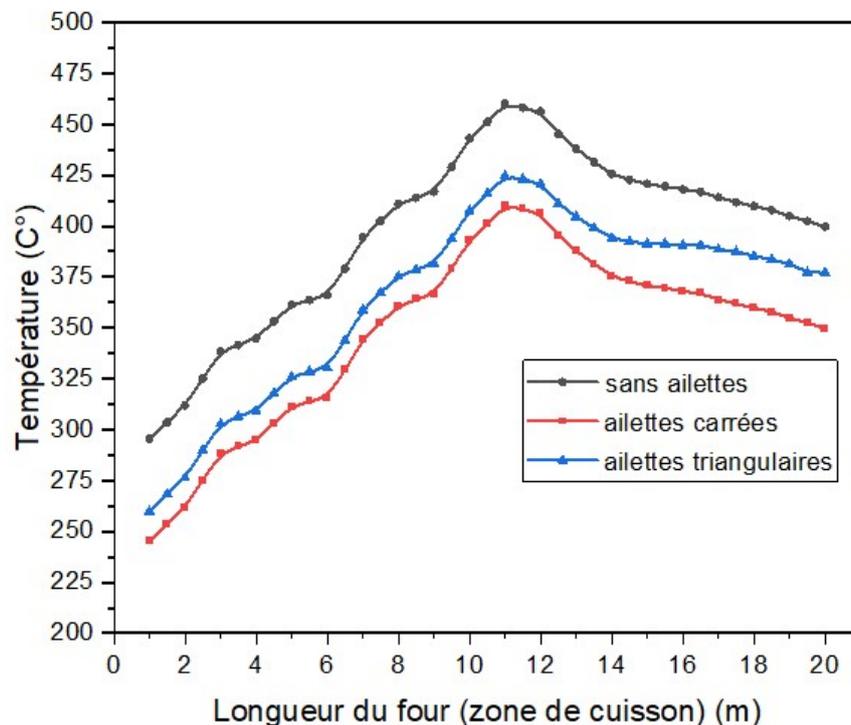


FIGURE IV.17 – La variation de la Température externe pour un Four sans Ailettes, Ailettes Triangulaires et Carrées.

### IV.8.1 Discussion des Graphiques

En examinant les graphiques, nous pouvons clairement voir que notre configuration a préservé l'intégrité et le rythme du transfert de chaleur du four, ainsi que la cohérence sur chacun des 20 mètres de longueur totale du four. De plus, cette configuration a amélioré le refroidissement du four en réduisant la température d'environ 50 degrés Celsius. Cela démontre l'efficacité des ailettes carrées de 10 cm pour maintenir des températures plus basses tout en assurant une distribution uniforme de la chaleur le long du four.

## IV.9 Conclusion

L'analyse des différentes configurations d'ailettes a permis de déterminer les configurations optimales pour le refroidissement du four rotatif. Les simulations effectuées avec ANSYS Fluent ont montré que les ailettes carrées et triangulaires améliorent la distribution de la température, permettant un refroidissement plus efficace.

En particulier, les ailettes carrées avec une longueur de côté de 10 cm et un nombre total de 100 ailettes se sont révélées les plus performantes, réduisant la température de 471°C à 421°C, soit une diminution de 10.6%. Les ailettes triangulaires, quant à elles, ont réduit la température de 471°C à 436°C, soit une diminution de 7.4%.

Les résultats obtenus indiquent que la forme, la taille et le nombre d'ailettes jouent un rôle crucial dans l'efficacité du refroidissement. La comparaison entre un four sans ailettes, avec des ailettes triangulaires et avec des ailettes carrées a mis en évidence l'impact significatif de ces configurations sur la distribution de la température et le flux de chaleur.

# Conclusion générale

Cette étude repose sur la modélisation et la simulation réalisées avec ANSYS (FLUENT) Workbench. La géométrie, les conditions aux limites et les paramètres d'exploitation sont basés sur le modèle réel existant dans l'usine de cimenterie, ce qui a permis de valider les résultats numériques. Cette validation a été effectuée dans le cadre d'un stage pratique au sein de La société des ciments de Zahana dénommée « S.CI.Z ». Les relevés de température ont été effectués dans la salle de contrôle et de surveillance. L'écart constaté entre les résultats numériques et les mesures réelles s'explique par la différence entre le modèle numérique et les phénomènes physiques réels.

L'ajout des ailettes au four rotatif a démontré une amélioration significative du processus de refroidissement. Les simulations ont révélé que les ailettes optimisent la distribution de la température, permettant ainsi un refroidissement plus efficace du four. Cette approche innovante, bien que récente, ouvre la voie à de nombreuses possibilités d'amélioration et d'études futures.

Les résultats obtenus indiquent que la forme, la taille et le nombre d'ailettes jouent un rôle crucial dans l'efficacité du refroidissement. En outre, plusieurs autres paramètres peuvent être explorés pour améliorer encore ce processus. Par exemple, l'utilisation de matériaux avec une conductivité thermique différente pour les ailettes pourrait influencer l'efficacité du transfert de chaleur.

De plus, la configuration spatiale des ailettes sur la surface du four peut affecter le flux de chaleur et la distribution de la température. Enfin, l'application de revêtements spéciaux sur les ailettes pourrait améliorer la dissipation thermique. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner ces paramètres et maximiser les performances.

En conclusion, l'intégration des ailettes dans le processus de refroidissement du four rotatif représente une avancée prometteuse, avec un potentiel considérable pour des applications industrielles futures.

# Bibliographie

- [1] Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment. Technical report, 2008. Étude publiée en mai 2008.
- [2] *Rotary Kilns : Transport Phenomena and Transport Processes*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [3] 5 principales raisons de la sérieuse formation de croûtes du four à ciment en court-circuit. Technical report, 2020.
- [4] Abdulkadhun J K Al-Yasiri and 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*, 12(3), 2012.
- [5] Youcef Attou. *Etude numerique et thermique d'un écoulement turbulent dans un espace annulaire d'un rotor stator*. PhD thesis, 2018-2019.
- [6] Akwasi A. Boateng. *Rotary Kilns : Transport Phenomena and Transport Processes*. 2008.
- [7] Akwasi Acheampong Boateng. *Rotary Kilns, Second Edition : Transport Phenomena and Transport Processes*. Elsevier, 2016.
- [8] 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*, 32(2) :519–529, 2015.
- [9] C. Csernyei and A. G. Straatman. Numerical modeling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102 :610–621, 2016.
- [10] W. J. Du, Q. Yin, and L. Cheng. Experiments on novel heat recovery systems on rotary kilns. *Applied Thermal Engineering*, 139 :535–541, 2018.
- [11] A. Gallo, E. Alonso, C. Pérez-Rábago, E. Fuentealba, and M. I. 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 :1013–1030, 2019.
- [12] Fathi Habashi. History of the rotary kiln. *Laval University, Quebec City, Canada*, 2010.
- [13] Irsyadi yani Hasan Basri. Fatigue analysis of rotary cement kiln welded using finite element method. 2016.
- [14] Eero Immonen. Advanced multiphase simulation of rotary kilns : Coupling of ansys fluent and a third party solver. Technical report.
- [15] Prasad Ingawale and Kiran Narkar. *Contact Stress Analysis of Kiln Tyre and Thrust Roller by Using Normal Loading*. PhD thesis, 2015.
- [16] K. I. Janati, E. El Kennassi, and L. Bousshine. Hot rotary kiln deformability for cement plant, experimentation, and numerical simulation. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, 14(1) :14–22, 2017.

- 
- [17] Q. Luo, P. Li, L. Cai, P. Zhou, D. Tang, P. Zhai, and Q. Zhang. A thermoelectric waste-heat-recovery system for portland cement rotary kilns. *Journal of Electronic Materials*, 44 :1750–1762, 2015.
- [18] Ai-chun Ma, Jie-min Zhou, Jian-ping Ou, and 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 :75–79, 2006.
- [19] M. Mirhosseini, A. Rezaia, and L. Rosendahl. Power optimization and economic evaluation of thermoelectric waste heat recovery system around a rotary cement kiln. *Journal of Cleaner Production*, 232 :1321–1334, 2019.
- [20] Ricardo Araujo Mosci. Refractories in cement manufacturing. 2015.
- [21] K. Moussi. *Modélisation d'un four rotatif à ciment : Cas de l'unité de Sour El-Ghozlane*. PhD thesis, 2007.
- [22] Kurt E. Peray. *The Rotary Cement Kiln*. Chemical Publishing Co., 1986.
- [23] Maxime Pito. *Récupération de la chaleur fatale : Application aux fours rotatifs*. PhD thesis, Ecole des Mines de Nantes, 2015.
- [24] Sepehr Sadighi, Mansoor Shirvani, and Arshad Ahmad. Rotary cement kiln coating estimator : Integrated modelling of kiln with shell temperature measurement. *Chemical Engineering Department, University of Science and Technology, Tehran, Iran*, 2011.
- [25] Phillips Kiln Services. Calculating cold gap using temperature differences. Technical report, 2012.
- [26] J. Smagorinsky. General circulation experiment with the primitive equations i. the basic experiment. *Mon. Weather Rev*, 91(3) :99–164, 1963.
- [27] Synergia. *Préchauffeur multicyclone avec calcinateur allongé*.
- [28] M. 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*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2011.
- [29] K. Wang, J. Li, P. Wang, and L. Cheng. Experimental and numerical studies on the air-side flow and heat transfer characteristics of a novel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 123 :830–844, 2017.
- [30] Indra D. Winarko. Ring and snow ball formation in the kiln. 2016.
- [31] S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss, M. Schiemann, S. Schaefer, and 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.
- [32] P. J. Witt, M. D. Sinnott, P. W. Cleary, and M. P. Schwarz. A hierarchical simulation methodology for rotary kilns including granular flow and heat transfer. *Minerals Engineering*, 119 :244–262, 2018.
- [33] W. N. Wu, X. Y. Liu, Z. Hu, R. Zhang, and X. Y. 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 :132–141, 2019.
- [34] H. D. Yun, J. W. Lee, Y. I. Jang, S. J. Jang, and W. Choi. Microstructure and mechanical properties of cement mortar containing phase change materials. *Applied Sciences*, 9(5), 2019.
- [35] K. Zouai. *Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières : Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement*. PhD thesis, Abdelkader BOUGARA, 2011.