



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 : électromécanique

Spécialité : *Maintenance en électromécanique.*

Thème

**Simulation numérique du refroidissement de la
Virole d'un four rotatif à travers un jet d'eau**

Présenté et soutenu publiquement par :

Safir Mohamed Abdelhadi & Nemla Amine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Adjeloua abdelaziz	MCA	IMSI	Président
Hemmami zineb	MCA	IMSI	Examinateur
Bouhafs Mohammed	MCB	IMSI	Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

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

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

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

*Nous tenons également à remercier Ms « **Delil** » et Mme « **H.Z** » pour son aide et son soutien.*

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

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

DEDICACES

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

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

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

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

Résumé

Cette étude a pour objet la modélisation et la simulation numérique du refroidissement de la virole d'un four rotatif dans ANSYS Fluent. Le modèle existe en réel dans l'usine : la Géométrie et les conditions aux limites ainsi que les conditions d'exploitations ont servi pour valider les calculs numériques. Les résultats de la simulation numérique sont en bonne concordance avec ceux mesurés dans l'usine. Pour améliorer le refroidissement de la virole et alors on à proposer une solution. En effet l'ajout des injecteurs d'eau à la virole a permis une diminution considérable de la température de 52°C.

Abstract

The purpose of this study is the modelling and the numerical simulation of the cooling of a shell of a rotary kiln in ASYS Fluent. The model exists in real life in the factory: the geometry and the boundary conditions as well as the operating conditions were used to validate the numerical calculations. The results of the numerical simulation are in good agreement with those measured in the factory. A solution to improve the cooling of the shell and then proposed. Indeed, the addition of the injectors to the ferrule allowed a considerable decrease in temperature of 52 ° C

تلخيص

الغرض من هذه الدراسة هو نمذجة المعطيات والمحاكاة العددية لتبريد غلاف القرن الدوار الموجود في الحياة الواقعية في المصنع باستخدام برنامج Ansys Fluent. تم استخدام الهندسة والشروط القياسية بالإضافة إلى ظروف التشغيل للتحقق من الحسابات الرقمية. تتوافق نتائج المحاكاة العددية مع تلك التي تم قياسها في المصنع. تم اقراح حل لتحسين تبريد قشرة الفرن الدوار، أدت إضافة مرشات المياه إلى الفرن الدوار إلى انخفاض في درجة الحرارة بمقدار 52 درجة مئوية،

Sommaire

Liste des figures	1
Liste des tableaux	3
Nomenclature	4
Introduction générale.....	6
Chapitre I : Généralité sur les fours rotatifs.....	8
1 Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie :	9
2 Le Ciment :	10
2.1 Extraction et concassage (1-2) :	12
2.2 Séparation et surbroyage du calcaire (3) :	12
2.3 L'obtention de la farine brute :	12
2.4 La production de clinker (5).....	12
2.5 Production de ciments (6) :	12
2.6 Expédition du ciment (7) :	13
3 Types de ciment :	15
3.1 Le ciment Portland :	15
3.2 Le ciment Portland composé :	15
3.3 Le ciment de haut fourneau :	15
3.4 Le ciment pouzzolanique :	15
3.5 Le ciment composé :	15
4 Description du Four Rotatif :	15
5 Les éléments intérieurs principaux du four rotatif :	18
5.1 Briques réfractaires :	18
5.2 Bruleur de four rotatif :	20
5.3 Croutage :	21
6 Les éléments extérieurs principaux du Four rotatif :	22
6.1 La virole :	22
6.2 Bandages :	23
6.3 Le Galet :	25
7 Conclusion :	27
Chapitre II : Transfert de chaleur	28
1 Transfert de chaleur dans le four :	29
2 Modèles mathématiques :	30

2.1	Transfert de chaleur entre le gaz et les briques réfractaires (paroi interne) :.....	30
2.2	Transfert de chaleur entre le gaz et le solide (lit de matière) :.....	32
2.3	Transfert de chaleur entre la paroi et le solide :.....	33
3	Conclusion :.....	34
Chapitre III : Méthode Numérique		35
1	Introduction :.....	36
2	Méthode des différences finies :.....	36
3	Méthode des éléments finis :.....	37
4	La méthode des volumes finis :.....	37
4.1	Formulation Bidimensionnelle de l'Equation de Poisson par la MVF :.....	38
4.2	Équations gouvernantes :.....	39
4.2.1	Conservation de la masse.....	39
4.2.2	Conservation de quantité de mouvement :.....	39
4.2.3	Équation de conservation d'énergie :.....	39
4.2.4	Principales méthodes d'approches pour la turbulence : [26]	40
4.2.5	Choix du modèle de turbulence :.....	40
4.2.6	Modèles du premier ordre :.....	40
4.2.7	Modèles du deuxième ordre :.....	41
4.2.8	Le modèle ($k - \epsilon$) :.....	41
4.2.9	Modèle $k - \epsilon$ standard :.....	41
5	Description du problème :.....	41
6	Présentations du logiciel ANSYS :.....	43
7	Présentation du WORK-BENCH :.....	44
8	Présentation de l'ANSYS Fluent CFX :.....	44
9	Modélisation dans ANSYS :.....	45
9.1	Création de géométrie :.....	46
9.2	Maillage :.....	46
9.3	Optimisation du maillage :.....	47
9.4	Conditions aux limites :.....	49
10	Conclusion :.....	49
Chapitre VI : Resultats Et Discussion		50
1	Introduction :.....	51
2	Résultats et discussion :.....	51
3	La validation :.....	51

4	Etude de cas :	52
4.1	Contour de température (section du four) :	54
4.2	Contour des lignes de vitesse :	55
4.3	Contour de pression :	56
5	Virole refroidis avec jet d'eau :	61
5.1	Distribution de température :	62
5.2	Distribution des lignes de vitesse d'eau :	62
	• Variation de la vitesse d'injection d'eau :	63
	• Variation de température intérieure du four :	64
	• Variation de température d'air ambiant :	65
6	Comparaison entre injection d'air et injection d'eau :	66
	• La température de la virole avec injecteur d'eau :	66
	• La température extérieure en fonction de la vitesse moyenne d'air et eau :	67
	• La température extérieur de la virole en fonction de la température intérieure moyenne du four refroidis par l'air et refroidis par l'eau :	68
7	Conclusion :	71

Liste des figures

Figure I.1 : le premier four était utilisé pour grillage du sulfure.....	10
Figure I.2 : Le flux technologique de la fabrication du ciment.....	11
Figure I.3 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment.....	14
Figure I.4 : Four rotatif de cimenterie 1	16
Figures I.7 : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.	19
Figures I.8 : Bruleur de four rotatif.	21
Figure I.9 : différentes zones du four rotatif.	21
Figure I.10 : croutage dans la partie cuisson dans le four rotatif	22
Figure I.11 : virole du four rotatif	22
Figure I.12 : Épaisseurs de virole.....	23
Figure I.13 : bandage frottant d'un four rotatif	24
Figure I.14 : bandages flottants.	24
Figure I.15 : bandage cranté.....	25
Figure I.16 : fixation latérale.....	25
Figure I.17 : Station des galets.	26
Figure I.18 : Différentes catégories des galets.	27
FigureII-1 : Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale (condition stationnaire).....	29
Figure III-1 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel	38
Figure III-2 : Description bidimensionnel d'un volume fini.....	38
Figure (III.3) : four rotatif d'usine (LafargeHolcim-Mascara)	42
Figure III.4 : profile de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d'usine (LafargeHolcim).	43
Figure III.5 : L'interface de Ansys Workbench	44
Figure III.6 : L'interface d'Ansys Fluent CFX	45
Figure III.7 : ANSYS Workbench interface.....	46
Figure III.8 : géométrie du four rotatif	46
Figure III.9 : maillage quadratique.....	47
Figure III.10 : Comparaison des différents maillages	48
Figure IV.1 : la validation des températures de la virole de notre étude par rapport celle du l'usine.	52
Figure IV.2 : les contours des températures dans la section du four rotatif.....	55
Figure IV.3 : Contour des lignes de courant de four rotatif.	56
Figure IV.4 : Contour de pression de four rotatif.....	57
Figure IV.5 : Evolution de la température de la virole en fonction de la vitesse d'air.	58
Figure IV.6 : Température de la virole en fonction de température intérieur du four.	59
Figure IV.7 : Température de la virole en fonction de la température d'air ambiant.	60
Figure IV.8 : Four avec injecteur d'eau.	61
Figure IV.9 : contour de température de virole avec injection d'eau.....	62
Figure IV.10 : Contour des lignes de courant de la virole avec l'injection d'eau.....	63
Figure IV.11 : la température de la virole en fonction des vitesses d'injection d'eau.	64
Figure IV.12 : la variation de la température de virole en fonction température intérieur du four.	65
Figure IV.13 : variation de température de la virole en fonction de la température d'air ambiant	66

Figure IV.14 : La comparaison entre la température de la virole et la température de la virole avec injection d'eau..... 67

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les dimensions du four rotatif d'usine (LafargeHolcim).....	42
Tableau III.2 : Paramètre de maillage.	47
Tableau III.3 : Les conditions aux limites de la partie cuisson du four.	49
Tableau IV.1 : Température de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air.....	58
Tableau IV.2 : Température de la virole en fonction de Température intérieur du four.....	59
Tableau IV.3 : Température de virole en fonction de la vitesse d'injection d'air.....	63
Tableau IV.4 : la variation de la température de virole en fonction température intérieur du four.	64

Nomenclature

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

Symboles grecs

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

Indices

p	Parois
G	gaz
f	fluide
s	solide
W	mur
sh	virole
cv	convective comb Combustion
c	réaction chimique
c	centre
ch	croûtage
a	air
a	ailette
i	initiale
r	radiative
b	rupture

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds
Gr	Grashof
Pr	nombre de Prandtl

Opérateur mathématique

∂	Dérivée partielle
Δ	variation

Introduction générale

Le ciment Portland est le matériau de construction le plus utilisé, dont la consommation à l'échelle mondiale est estimée aux environs de 200 kg de ciment par personne par an.

Le défi de l'industrie de ciment consiste à produire un ciment performant, à coût compétitif et avec un impact environnemental minimal. La production d'une tonne de ciment nécessite 1.65 tonnes de matières premières.

L'industrie du ciment, en Algérie, a connu, ces dernières années, une amélioration progressive vue le nombre de ligne de production de ciment qui a augmenté.

Le four rotatif est un équipement principal dans une industrie cimentière employée pour convertir le cru en clinker calciné. La farine crue pour la production de ciments est un mélange des proportions prédéterminées de pierre à chaux, de silice, et de petites quantités d'oxyde d'alumine et de fer.

Le four rotatif se compose d'un tube produit à partir de la plaque en acier, souvent 5 mètres de diamètre et plus de 100 mètres de longueur, garnie de la brique réfractaire. Le tube est légèrement incliné ($1 - 4^\circ$) et tourne lentement sur son axe à environ 30 à 250 révolutions par heure.

Dans le présent travail, nous étudions le refroidissement de la virole d'un four rotatif et le mécanisme de transfert de chaleur dans un four en considérant les phénomènes de transfert rencontrés à l'intérieur et à l'extérieur de la virole à savoir la conduction et la convection. Les calculs par simulation, deviennent un outil indispensable à l'étude des phénomènes physiques complexes.

La présente étude a été réalisée avec le solveur ANSYS (FLUENT)-CFX validée avec des mesures réelles au niveau de l'entreprise (LafargeHolcim OGGAZ Sig-mascara) pendant le stage pratique.

L'objectif est de contribuer à l'étude de l'amélioration du refroidissement de la partie cuisson de la virole du four par une simulation numérique d'un four rotatif par la méthode des volumes finis, l'utilisation des capacités de simulation qui offrent dans le logiciel FLUENT(ANSYS) représente une partie non négligeable de le présent travail .la construction de model géométrique est généré par le logiciel ICEM CFD.

Des solutions ont été donc proposées pour cette usine. Pour bien comprendre ce modeste travail, nous allons eu l'occasion de faire un stage pratique dans LafargeHolcim de Oggaz, et suivis les diverses étapes de fabrication du ciment gris et blanc pour avoir une idée globale sur le processus de système de production du ciment et les étapes de fabrication de ce dernier. Nous

avons pu examiner attentivement les divers appareils et machines qui jouent un rôle fondamental dans l'industrie du ciment.

On parle des fours rotatifs qui sont très utilisés dans l'industrie. Ils sont utilisés dans la cuisson du clinker dans la cimenterie, fabrication de la chaux, fabrication des charbons.

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

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

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

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

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

Chapitre I : Généralité sur les fours rotatifs

1 Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie :

Les fours rotatifs sont des équipements omniprésents dans les industries chimiques, métallurgiques et pharmaceutiques. Ils sont généralement utilisés à trois fins : le chauffage, la réaction et le séchage de matières solides, et dans de nombreux cas, ils sont utilisés pour obtenir une combinaison de ces trois objectifs. Ces dernières années, les fours rotatifs ont été largement utilisés pour le traitement thermique des déchets, l'incinération de déchets dangereux, La combustion des pneus usagés ou de bois pour obtenir du charbon actif et l'adsorption thermique de sols carbonatés. Cette utilisation répandue peut être attribuée à des facteurs tels que la capacité à traiter des matières premières variées, des boues ou des matériaux granulaires ayant de grandes variations dans la taille des particules, ou la capacité de maintenir des environnements distincts, des conditions réductrices à l'intérieur du lit coexistant avec un franc-bord oxydant.

Dans la conception et la modélisation des fours rotatifs, du point de vue de l'ingénierie des procédés, il y a deux aspects importants : le transfert de chaleur et la cinétique de la réaction, ce dernier est le plus important de ces aspects, car dans de nombreux cas pratiques, le transfert de chaleur limite les performances des fours rotatifs.

Les fours rotatifs sont très utilisés dans l'industrie du ciment. Ils sont utilisés dans la production du clinker. Ils possèdent plusieurs avantages sur d'autres types de fours comme les lits fixes notamment le fait d'être des fours continus (permettant donc une production continue) et le fait que les débits de production peuvent être élevés.

Les fours rotatifs ont été synonymes de fours à ciment et à chaux, probablement en raison de l'histoire de leur évolution et de leur développement. [1]

Aux États-Unis, des projets tels que la construction d'un système de canaux dans la première moitié du 19^{ième} siècle, en particulier les canaux d'Eire en 1818, ont créé la première demande à grande échelle de ciment dans ce pays, ce qui a conduit diverses entreprises de production de ciment à se disputer les parts de marché.

En 1824, le ciment Portland a été inventé et mis au point par Joseph Aspdin, en Angleterre. [2]

À l'époque, on utilisait des fours fixes et on dit que le produit fritté était inutilement laissé à refroidir après chaque combustion avant d'être broyé. À la fin des années 1870, Thoman Millen et ses deux fils, alors qu'ils expérimentaient la fabrication du ciment Portland à South Bend, dans l'Indiana, ont brûlé leur premier ciment Portland dans un morceau de tuyau d'égout [1].

Ce site peut-être la première utilisation expérimentale d'un four rotatif en Amérique. En 1885, un ingénieur anglais, F. Ransome, avait breveté un four horizontal légèrement incliné qui

pouvait être tourné de manière à ce que le matériau puisse passer progressivement d'un four à l'autre.

Aujourd'hui, les fours rotatifs sont utilisés par l'industrie pour effectuer un large éventail d'opérations de traitement des matériaux, la réduction de l'humidité et de la température, la réduction des minerais oxydés, la calcination du coke de pétrole, la récupération des déchets dangereux, etc. Ces utilisations répandues peuvent être attribuées à des facteurs tels que la capacité de traiter des boues aux matériaux granulaires présentant de grandes variations de taille de particule, et la capacité de maintenir des environnements distincts, en réduisant les émissions de gaz, des conditions réductrices à l'intérieur du lit coexistant avec un franc-bord oxydant (une caractéristique unique du four rotatif qui n'est pas facile à réaliser dans d'autres réacteurs).

La nature du four rotatif, qui permet des temps de séjour des flammes de l'ordre de 2 à 5 s et des températures de plus de 2000 K, fait de ces fours une alternative compétitive aux incinérateurs commerciaux de déchets organiques et de solvants.

Bien que le long temps de séjour du matériau dans le four (généralement supérieur à une heure) permette d'obtenir un produit uniformément acceptable, comme le souhaitaient les premiers utilisateurs, il est possible d'améliorer considérablement cet aspect des performances du four.

Afin de réaliser cette amélioration, une compréhension plus quantitative des phénomènes de transport au sein du matériau du lit est nécessaire, en particulier du transport de la quantité de mouvement, qui détermine le mouvement des particules et le transport de l'énergie, qui détermine le taux vitesse de chauffage des particules individuelles [3].

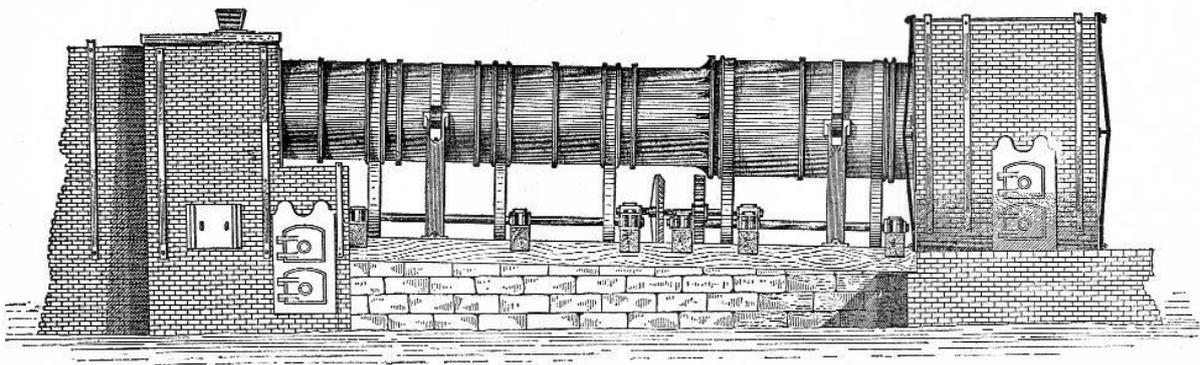


Figure I.1 : le premier four était utilisé pour grillage du sulfure.

2 Le Ciment :

Le ciment est un système composé de minéraux de clinker et de gypse qui réagissent avec l'eau à des vitesses différentes, donnant des produits d'hydratation de composition et de cristallinité différentes. Le type et le volume des produits d'hydratation formés influencent la porosité, la

résistance et d'autres propriétés techniques du produit final durci (Taylor, 1998). L'utilisation du seul ciment Portland (PC) génère certains problèmes indésirables concernant le comportement de retrait/expansion, la résistance chimique et la durabilité des composites de ciment. C'est pourquoi, ces dernières années, une grande attention a été accordée au développement d'un nouveau type de ciments mélangés dans le but d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques, la résistance chimique et environnementale, l'imperméabilité et la durabilité des produits finaux.

Il en existe plusieurs types dont les plus répandus sont : ciment blanc, gris, alumineux

« Prise mer » et spécial, il est fabriqué à partir du clinker. [4]

Ce processus est réalisé par la méthode sèche, qui génère le plus faible niveau d'émissions et est la plus efficace. Les matières premières et auxiliaires utilisées dans la fabrication du ciment et des sous-produits sont le calcaire, l'argile, la pyrite, la pouzzolane naturelle, le gypse, les déchets de sable provenant d'autres industries. Les matières premières de base pour la production de ciment (calcaire et argile) sont extraites dans des mines à ciel ouvert, d'où, après un concassage primaire, elles sont transportées sur le site de l'usine pour être stockées et préparées. Ayant un taux d'humidité élevé, l'argile nécessite un processus de déshumidification et de séchage.

Les autres matières premières proviennent de diverses sources, comme le minerai de fer (cendres de pyrite), la cendre de four granulé, etc.

Le produit de base est le ciment, 80 % est du clinker fabriqué selon une procédure sèche qui permet une production de 1.026.563 t/an de clinker. Le flux technologique peut être synthétisé dans un schéma présenté dans la figure (I.2).

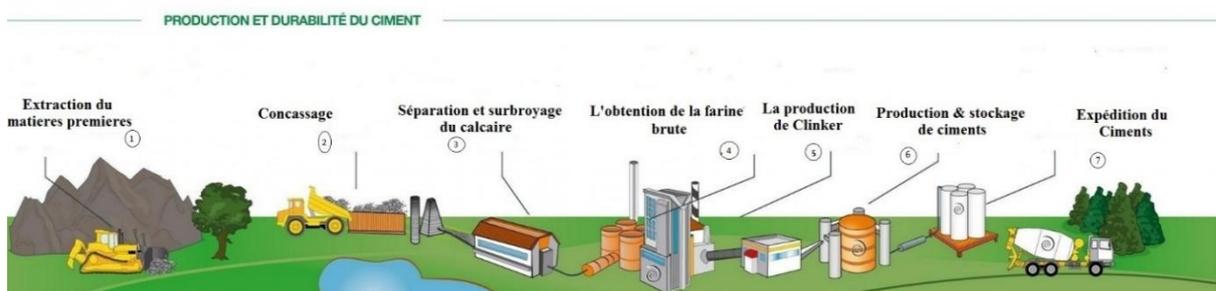


Figure I.2 : Le flux technologique de la fabrication du ciment

2.1 Extraction et concassage (1-2) :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 150 mm. Le calcaire et l'argile

2.2 Séparation et surbroyage du calcaire (3) :

Où les tailles comprises du calcaire entre 0 – 50mm et 100 - 150 mm sont transportées vers le concasseur, où leur diamètre est réduit à la valeur nécessaire pour la production de ciment, à savoir 0 - 25 mm, et ensuite sont stockées dans trois silos de calcaire.

2.3 L'obtention de la farine brute :

Pour le clinker (4) se fabrique à l'aide d'une réception évaluée en laboratoire, le calcaire, l'argile et les cendres de pyrite sont formées.

2.4 La production de clinker (5)

à partir de la farine brute contenue dans les silos de stockage est dosée et transportée vers l'échangeur de chaleur, où la farine brute passe de 60 °C à 800°C, à travers la chaleur récupérée des gaz chauds du four traversant l'échangeur de chaleur, à contre-courant de la farine crue préchauffée et partiellement décarbonatée traversé toutes les zones du four rotatif, dans une zone spéciale le clinker étant obtenu, à 1450 °C de température. Du four rotatif, le clinker est déchargé dans le refroidisseur à grille, où, grâce à l'air forcé dans le système par 9 ventilateurs, il est refroidi de 1350 °C à environ 100 °C. La chaleur nécessaire à l'obtention du clinker est fournie par l'incinération de combustibles comme les gaz naturels, l'huile lourde, l'huile usée, l'éco-carburant sur la partie chaude du four, et les caoutchoucs et les pneus usagés sont fournis par l'extrémité froide à l'échangeur de chaleur du four à colonne ascendante. Trois silos sont en place pour le stockage du clinker. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le four à clinker fonctionne selon la procédure sèche.

2.5 Production de ciments (6) :

Les crasses provenant du hall d'adjuvants est ensuite stocké dans les silos à clinker. La cendre est séchée avec des gaz chauds provenant du refroidisseur à grille ou, lorsque le four à clinker ne fonctionne pas, en brûlant des gaz naturels dans la chambre de combustion du bruleur. Le gypse est transporté depuis le hall des adjuvants jusqu'aux silos à gypse situés à proximité des broyeurs à ciment. Le clinker, la cendre et le gypse contenus dans les silos, après une réception en laboratoire, sont extraits, dosés et fournis aux moulins à ciment. Les broyeurs à ciment sont

des moulins tubulaires à boulets, disposant de deux chambres et fonctionnant en circuit fermé, le matériau est amené à un séparateur à haut rendement où il est séparé, la fraction fine (ciment) étant prise en charge dans un relais de transport et stockée dans 9 silos à ciment, la fraction lourde étant recyclée dans le broyeur.

2.6 Expédition du ciment (7) :

Après le processus de broyage, le ciment est acheminé via des goulottes de convoyeur aérien vers les silos de stockage situés dans la zone d'expédition. Sous forme de ciment en vrac la plupart du temps, il est ensuite chargé dans des wagons-silos ou des camions-citernes. Seule une petite partie est conservée en sacs dans l'usine ou expédiée par voie ferrée. [5]

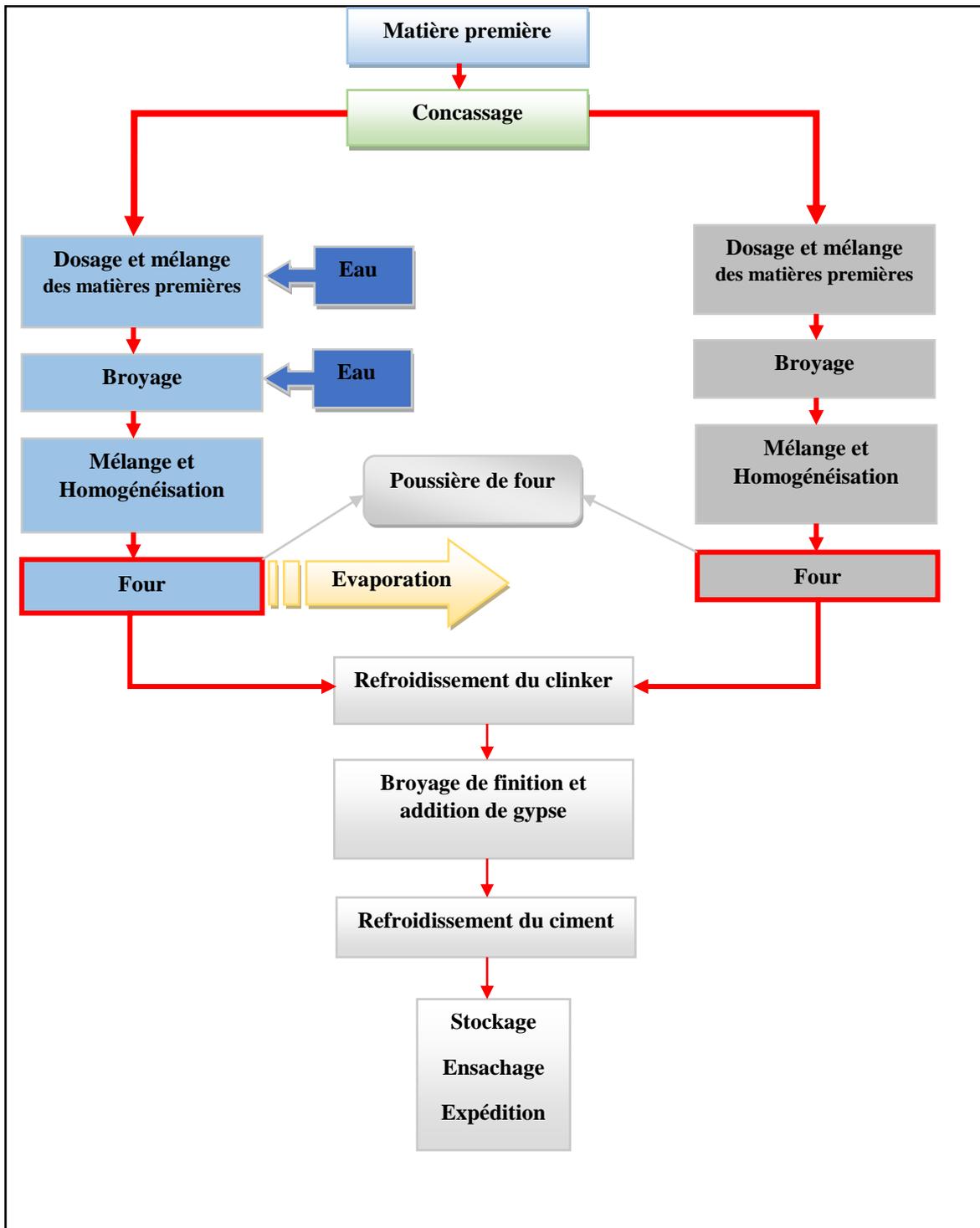


Figure I.3 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment.

3 Types de ciment :

Le ciment est accessible en deux catégories : le ciment Gris et le ciment Blanc. Il est classé en cinq grandes familles et 27 variantes principales

3.1 Le ciment Portland :

Il contient au moins 95% de clinker et 5% de constituants secondaires.

3.2 Le ciment Portland composé :

Il contient au moins 65% de clinker et 35% d'autres constituants : crasses, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

3.3 Le ciment de haut fourneau :

2 types :

- contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64% de clinker.
- contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

3.4 Le ciment pouzzolanique :

Il contient 45 à 89% de clinker et 11 à 55% pouzzolanes.

3.5 Le ciment composé :

Il contient 20 à 64% de clinker, 18 à 49% de laitier et 18 à 49 de cendres volantes ou de pouzzolanes. [6]

4 Description du Four Rotatif :

Un four rotatif est constitué d'une enveloppe cylindrique à revêtement réfractaire montée de manière légèrement inclinée par rapport au plan horizontal. Le four est mis en rotation à très faible vitesse autour de son axe longitudinal et la charge brute comprenant du clinker hydraté sous forme de gâteau humide est introduite à joint amont du cylindre et un mélange de gaz de combustion chauds à 1000 m³/h s'écoule par joint avale [7]

Dans la conception des fours, il y a quatre aspects importants à considérer d'un point de vue de technologie de processus, à savoir le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides granulaires à travers le four, le transfert de masse gaz-solide et les réactions. Le transfert thermique est le plus important parmi ces aspects, parce que dans beaucoup de cas, c'est le transfert thermique qui limite la performance du four rotatif.



Figure I.4 : Four rotatif de cimenterie 1

Le four rotatif est le composant principal de la ligne de production de ciment. Les fours rotatifs sont largement utilisés dans l'industrie, de la calcination du calcaire à la fabrication du ciment en passant par la calcination du coke de pétrole, etc. La longueur du four rotatif est environ de 100 m et de 4 à 7 m de diamètre qui pèse plus de 300 tonnes, figure (I.5). Le four rotatif est constitué d'un tube fabriqué à partir de plaques d'acier et revêtu de briques réfractaires. Le tube est légèrement incliné (3 %) et tourne lentement sur son axe à une vitesse comprise entre 3.9 tour/min. La farine crue est introduite à joint amont et la rotation du four le fait descendre progressivement vers le bas. Le matériau à descendre progressivement vers le joint avale du four, le combustible sous forme de gaz est insufflé par le "tuyau du brûleur", produisant une grande flamme concentrique dans la partie inférieure du tube du four. Lorsque le matériau se déplace sous la flamme, il atteint sa température maximale, avant de tomber du tube du four dans le refroidisseur. L'air est d'abord aspiré dans le refroidisseur, puis dans le four pour la combustion du carburant. Dans le refroidisseur, le clinker qui se refroidit réchauffe l'air, de sorte qu'il peut atteindre 400 à 800 °C de telle manière l'air extrait de refroidisseur est utilisé dans le four, provoquant ainsi une combustion intense et rapide du carburant. Les dimensions et paramètres du four sont les suivants :

Dimensions \emptyset 5 x 80 m, angle 3 %, points d'appui 3, capacités de production

$Q = 3.125$ t/jour, entraînement principal $P = 500$ KW, $n = 750$ rot/ min,

Deuxième entraînement $P = 500$ KW, $n = 750$ rot/ min. [8]



Figure I.5 : Four rotatif de cimenterie.

Des problèmes tels qu'une faible efficacité thermique et une qualité de produit médiocre ont affecté l'exploitation des fours rotatifs. Pourtant, ces machines ont résisté et ont été continuellement améliorées (efficacité énergétique, automatisation) depuis plus d'un siècle. L'accent étant mis de plus en plus sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation continue ou accrue des fours rotatifs ne peut se faire qu'en réduisant la consommation d'énergie thermique et électrique utilisée dans ces procédés. Un calcinateur ou un sécheur permet d'obtenir un séchage rapide grâce à l'important coefficient de transfert de chaleur obtenu par la circulation d'un grand volume d'air. L'inconvénient est l'augmentation de l'énergie électrique nécessaire pour faire circuler ce grand volume d'air. Les fours rotatifs, en revanche, présentent des coefficients de transfert de chaleur médiocres, d'où une demande d'énergie thermique plus élevée, en raison de la nécessité d'utiliser des dispositifs plus grands et donc d'augmenter les possibilités de perte de chaleur.

Dans la plupart des opérations des fours rotatifs, les réactions chimiques dans le lit nécessitent une température élevée, les fours à ciment nécessitent des températures d'environ 1500 °C. L'énergie nécessaire à l'augmentation de la température et aux réactions endothermiques provient de la combustion de divers combustibles tels que le gaz naturel, le charbon et d'autres combustibles. [9]

Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permettant le déplacement du

matériau. Un bruleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau.

La virole du four rotatif se compose de plusieurs tronçons de tailles différentes assemblés par soudage et revêtus de briques réfractaires. Chaque tronçon du four a une épaisseur spécifique et les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. La température de service à l'intérieur du four dépasse les 1450 °C.

5 Les éléments intérieurs principaux du four rotatif :

5.1 Briques réfractaires :

La production de clinker de ciment dans des fours rotatifs à sec est l'étape centrale de traitement à haute température de la production de ciment. La brique réfractaire des fours rotatifs joue un rôle essentiel pour assurer l'isolation thermique et la sécurité.

En commençant par l'entrée du four rotatif, la brique réfractaire peut être divisé en cinq parties : 1-zone d'entrée du matières , 2- zone de préchauffage, 3- zone de calcination, 4- zone de cuisson (comprenant la zone de transition supérieure, la zone de combustion, la zone de transition inférieure) et 5- la zone de décharge, comme le montre la figure (I.7).

Le brique dans la zone de transition supérieure doit résister à une corrosion par le clinker et les sels alcalins à haute température, mais le brique n'est pas encore protégé par une couche de Croutage. La zone de transition supérieure est donc la partie la plus vulnérable du brique réfractaire. Pour résister à ces conditions difficiles, les briques à spinelle d'aluminate de magnésium et de périclase sont généralement utilisées dans la zone de transition supérieure, car ils présentent d'excellentes propriétés thermomécaniques (résistance mécanique et résistance aux chocs thermique) et généralement une bonne résistance à la corrosion. Pour augmenter la durée de vie de ces réfractaires et d'améliorer l'efficacité de fonctionnement des fours rotatifs à ciment, il est très important de comprendre les mécanismes de dégradation de ces réfractaires.

[10]

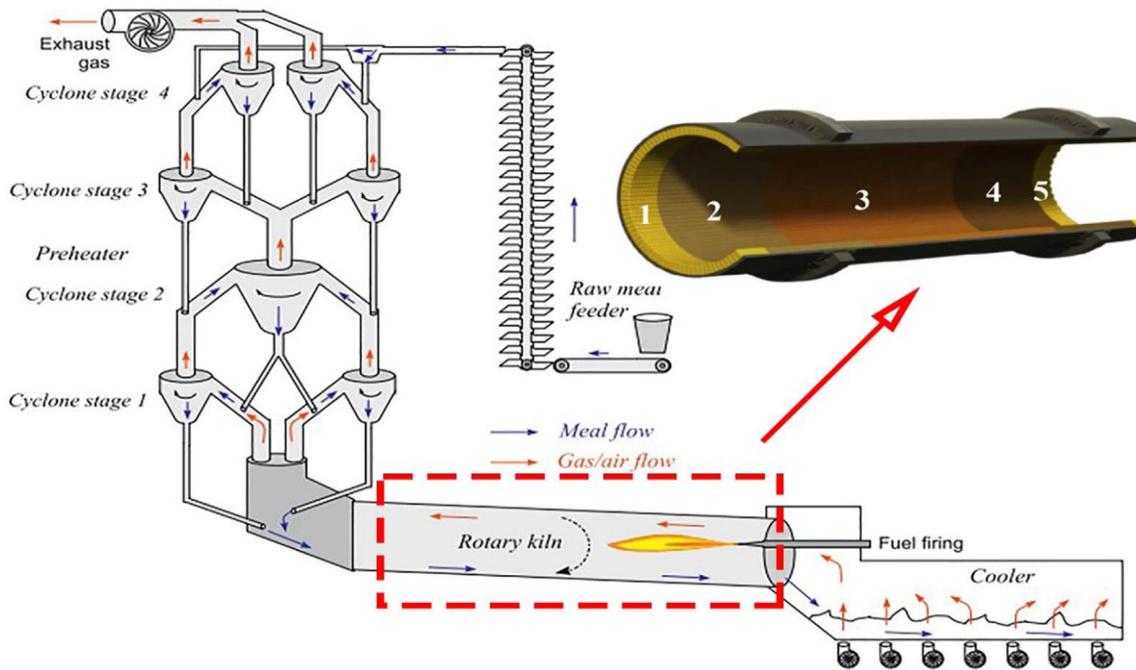


Figure I.6 : Illustration schématique d'un four de cimenterie [10]

- Le brique sert à isoler et à protéger la virole du four des hautes températures à l'intérieur et sans brique cet température cause la destruction et fusion de l'acier au carbone de la virole
 - Protégé la virole du four contre l'abrasion, le clinker est une matière très abrasive et sans brique la virole serait endommagée par l'abrasion.
 - Pour minimiser les pertes de chaleur à travers la virole du four : Une partie de la chaleur fournie est perdue sous forme de radiation à travers la virole en acier.
 - Les réfractaires réduisent les pertes de chaleur en raison de leur faible conductivité thermique.
- [11]



Figures I.7 : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.

5.2 Brûleur de four rotatif :

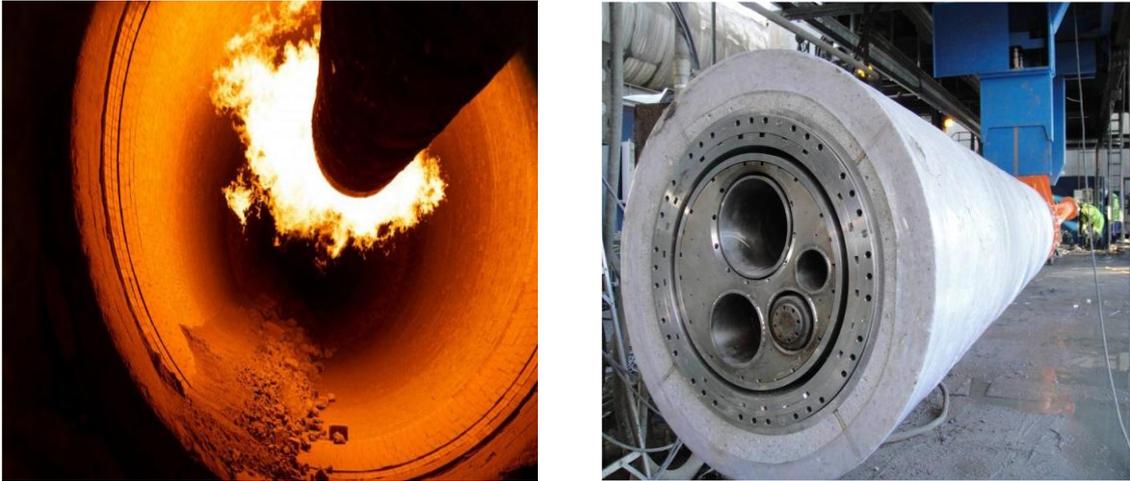
Le brûleur est l'une des pièces les plus importantes d'un four rotatif. Car il détermine le champ d'écoulement de l'air, la distribution de la température, la consommation d'énergie, et même la durée de vie du four. À la fin des années 1980, les brûleurs à haut rendement ont été développés, avec lesquels la longueur et la forme de la flamme peuvent être réglées de façon flexible et le rapport est augmenté entre l'air secondaire à haute température et l'air primaire à basse température. En outre, ils peuvent également fournir une poussée suffisante pour permettre l'utilisation d'un combustible. [12]

Le but d'un brûleur est de mélanger l'air et le combustible (gaz naturel) dans le four. Le mélange intensif du combustible et de l'air permet une combustion rapide et complète. Le brûleur contrôle la flamme : pour une bonne dispersion de la chaleur dans la zone de cuisson et pour ne produire aucun contact entre flamme et la brique et la virole.

Le brûleur doit être capable de réaliser la combustion de gaz naturel, de charbon, de gasoil ou n'importe quel mélange de ce dernier, il doit assurer encore une combustion complète, à excès d'air bas et à formation minimum d'oxyde de carbone (CO) et d'oxyde de nitrogène (NO_x). Il doit produire une flamme courte, étroite et fortement radiante, ces critères représentent les conditions adéquates pour un bon transfert thermique de la flamme aux matériaux en écoulement de la zone de cuisson (clinkérisation) du four. [13]

Les conditions requises pour avoir une bonne flamme sont :

1. Le brûleur doit être capable de brûler le combustible avec un faible excès d'air et avec une production minimale de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et de recyclage volatil comme le SO₂, etc.
2. Le brûleur doit être capable de produire une flamme courte, étroite et fortement rayonnante, ce qui est nécessaire pour un bon transfert de chaleur de la flamme au matériau dans la zone de frittage du four.
3. La formation de la flamme doit être propice à la formation d'une brique dense et stable dans la zone de combustion du four.
4. Il doit utiliser un peu d'air primaire sans pour autant compromettre la stabilité de fonctionnement normal ou surcharge du four. L'air primaire est habituellement exprimé en pourcentage d'air de combustion stœchiométrique requis pour brûler la quantité du Combustible mise en feu par le brûleur. [14]



Figures I.8 : Bruleur de four rotatif.

5.3 Croutage :

La protection de l'épaisseur du Brique dans la zone de combustion d'un four à ciment rotatif pendant le fonctionnement est important du point de vue de la productivité du four. Le croutage est une masse de clinker ou de particules de poussière qui adhère à la face chaude des briques posées dans le four, après être passée de l'état liquide ou semi-liquide à l'état solide. [15]

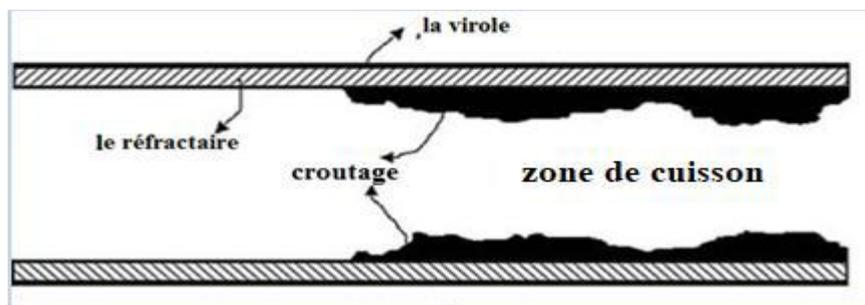


Figure I.9 : différentes zones du four rotatif.

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

Le croutage doit être bien adhérent pour résister aux conditions fluctuantes du four, qui feraient tomber le croutage et exposeraient ensuite la surface libre des briques à des températures extrêmement élevées et à un environnement corrosif agressif. [16]



Figure I.10 : croutage dans la partie cuisson dans le four rotatif

6 Les éléments extérieurs principaux du Four rotatif :

6.1 La virole :

La coque du four rotatif est une structure soudée à grande échelle de plus de 80 m de long et d'environ 5m Diamètre. Elles sont fabriquées à partir de tôles en acier de qualité E 24.2 ou A42 CP. Les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. Les tôles d'une largeur de 2200 mm environ sont arrondies au diamètre intérieur du four ; les demi-viroles ainsi obtenues sont ensuite soudées suivant leurs deux génératrices. L'assemblage des viroles bout à bout s'effectue en équilibre de manière à ne pas avoir un alignement des soudures longitudinales. [17]



Figure I.11 : virole du 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 ;

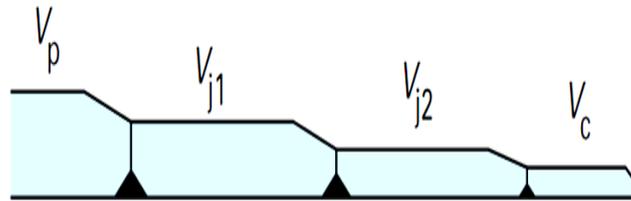


Figure I.12 : Épaisseurs de virole.

Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

- Contrainte pour une virole courante : ≤ 2 da N/mm² ;
- Contrainte pour une virole intermédiaire ou porteuse : ≤ 1.5 da N/mm² ;
- Variation de contrainte au changement d'épaisseur des viroles : ≤ 0.8 da N/mm². [17]

6.2 Bandages :

Les bandages de four ou les anneaux de roulement sont normalement constitués d'une seule pièce moulée en acier, d'une surface cylindrique usinée et lisse. Le réglage du jeu au sommet entre le bandage et la virole est réalisé à travers l'adjonction des cales sous bandages. Ces fixations exigent une conception parfaite, car le bandage doit s'adapter correctement à la coque, mais aussi permettre un déplacement thermique. Le bandage se déplace sur des paires de galet en acier, usinés pour obtenir une surface cylindrique lisse. Les galets doivent soutenir le four rotatif et permettre une rotation aussi peu frictionnelle que possible. La masse d'un four typique de 4,6 m de diamètre et 80 m de longueur, y compris les briques réfractaires et l'alimentation, est d'environ 750 tonnes, et est portée par trois appuis de bandage et des ensembles de roulement de galet, situé sous le four rotatif. [18]

Au niveau des bandages, la virole est renforcée (tôle jusqu'à 100 mm d'épaisseur) pour limiter les déformations dues à la pression des galets. La largeur de bandage et de galet est calculée pour assurer la répartition de la charge et éviter :

- la déformation locale du bandage et du galet.
- les fissures du bandage ou du galet.
- l'ovalisation plastique sous la pression. [19]

Le diamètre intérieur des bandages est légèrement supérieur au diamètre extérieur de la virole avec des cales sous bandage pour permettre une dilatation différente, car la température de la

virole est toujours plus élevée que celle du bandage. On utilise deux techniques différentes pour le positionnement radial du bandage, selon qu'il est du type flottant ou cranté [20].



Figure I.13 : bandage frottant d'un four rotatif

La virole du four repose sur le diamètre intérieur du bandage par l'intermédiaire de cale sous bandage. Ainsi, les forces d'appui lui sont appliquées dans une direction radiale par l'intermédiaire des cales sous bandage. Les bandages flottants doivent être suffisamment rigides et avoir un mouvement relatif très faible pour que l'ovalisation de la virole soit maintenue à des valeurs acceptables [20].

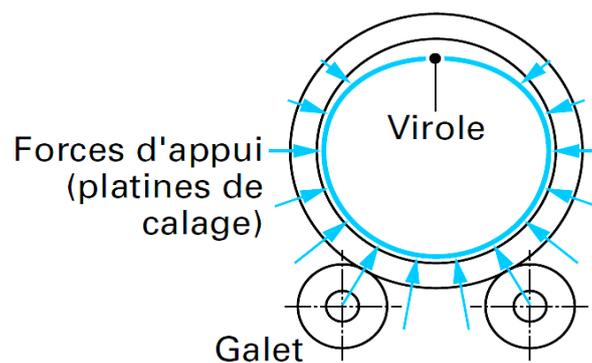


Figure I.14 : bandages flottants.

La virole du four est positionnée de manière quasi concentrique par rapport au diamètre intérieur du bandage. Les forces d'appui sont appliquées tangentiellement par l'intermédiaire des crans ou bretelles répartis sur le diamètre intérieur du bandage. Les bretelles peuvent faire partie du corps du bandage à l'intérieur de celui-ci ou bien être rapportées et fixées latéralement

au bandage par boulons. Le choix entre bandage flottant et bandage cranté résulte d'un compromis entre :

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

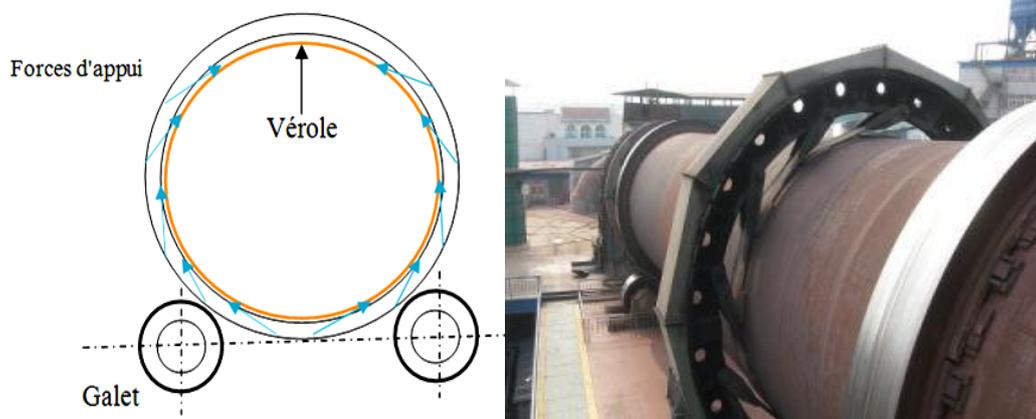


Figure I.15 : bandage cranté.

Le positionnement axial du bandage est assuré soit par deux cerces continues de part et d'autre du bandage s'appuyant sur des taquets d'arrêt soudés sur la virole, soit par des blocs guides latéraux positionnés alternativement de part et d'autre du bandage et soudés sur la virole [20].

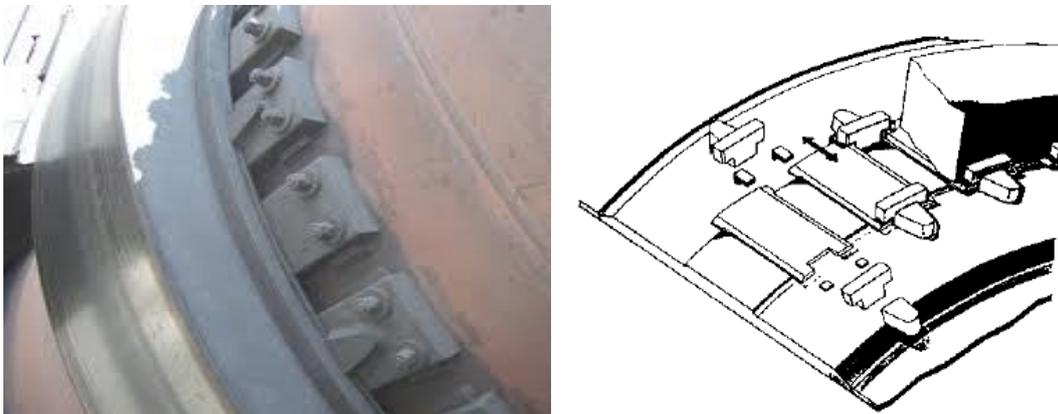


Figure I.16 : fixation latérale.

6.3 Le Galet :

Le galet du four rotatif supporte tout le poids et les charges axiales du corps rotatif et équilibre le mouvement axial et contre la pente du four et assure une utilisation uniforme de la surface de contact entre le bandage et le galet du four. La qualité du galet détermine si l'ensemble de l'équipement du four rotatif fonctionne sans problème. En raison de son poids élevé et de sa section épaisse, la qualité du moulage et la précision de l'usinage doivent être élevées. Habituellement, les matériaux utilisés sont l'acier moulé et la fonte ductile. [21]

Le galet est composé d'un arbre et d'un corps, qui est assemblés avec un ajustement serré. Le galet est soutenu par deux palier, sur lequel est interposé un coussinet ou bague de frottement, le contact est constamment lubrifié par bain d'huile, qui est refroidie par un système de refroidissement à eau. Ils permettent de minimiser le frottement par un faible coefficient de frottement de surface, ils sont de même nature que les bandages avec lesquels ils sont en contact, ce qui permet d'avoir une usure uniforme. [22]



Figure I.17 : Station des galets.

Il existe quatre types de galet : rigides, rotules rigides, auto-alignantes et auto-alignantes rotule. Pour les fours avec deux supports, il est recommandé d'utiliser une station de roulement à billes et douilles à alignement automatique (Figure I.19). En cas de déformation accidentelle du four (vilebrequin), la surface de contact entre le bandage et le galet ne sera pas perdue, évitant ainsi des contraintes excessives, qui peuvent provoquer des fissures et la formation de petites cavités (piqûres). Les pressions Hertz calculées à ces stations sont 25 % plus élevées que celles considérées dans les stations de laminage traditionnelles. Le matériau utilisé pour fabriquer les galets est de l'acier moulé, qui a subi un traitement thermique normalisé puis revenu. En raison de la dilatation du four, il est nécessaire de prévoir une largeur de galet de 40 à 80 mm plus large que le bandage.

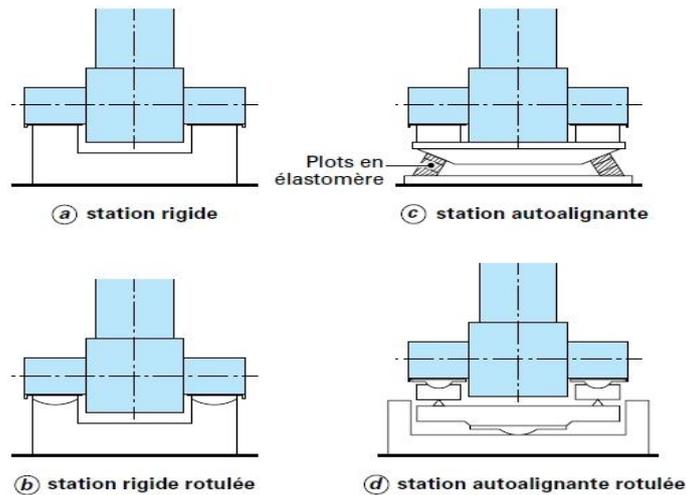
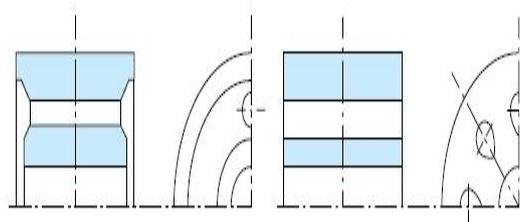


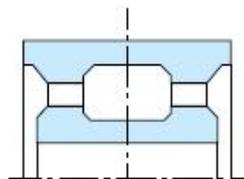
Figure I.18 : Différentes catégories des galets.

Les galets sont du type plein, la tendance étant d'abandonner les galets type creux pour des raisons de fragilité. Ils ont, en général un diamètre extérieur compris entre 1 et 2 m.

- Deux types de galet plein :



- Types de galet creux :



7 Conclusion :

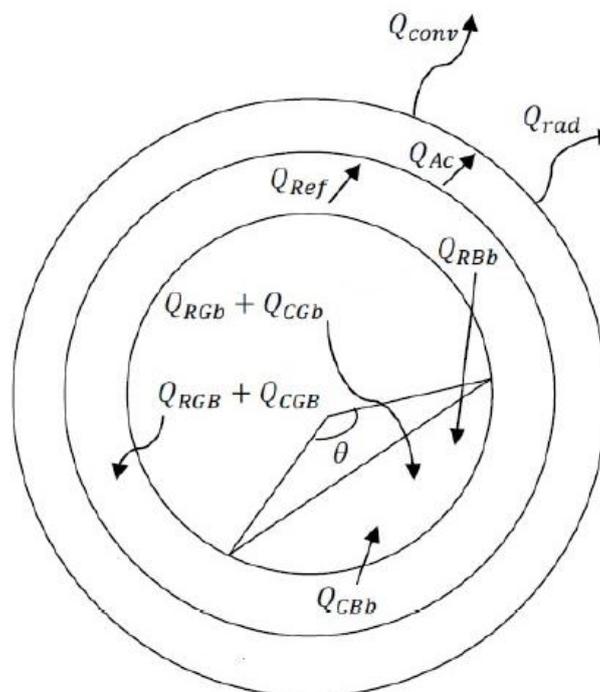
Dans ce chapitre nous avons vu la procédure de la production du ciment et les éléments les plus importants et leur rôle dans le four rotatif. Ce dernier est l'élément central du procédé de production du ciment. Il est le siège des réactions chimiques et opère sous des conditions de pression et de température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

Chapitre II : Transfert de chaleur

1 Transfert de chaleur dans le four :

Dans toutes les zones, à l'exception de bloc de recouvrement, le four reçoit de la chaleur du gaz et des briques réfractaires, et le gaz transmet de la chaleur au solide et aux briques réfractaires. Car au niveau de la zone de récupération, les réactions qui s'y déroulent peuvent être négligées tant au niveau du gaz que du solide (clinker). C'est ce processus qui occasionne le refroidissement du clinker à son entrée dans les tueurs (sa sortie du four). La chaleur qui règne dans le four est produite au niveau de la zone de combustion (clinkérisation). C'est dans cette zone que le lit de matière est transformé en clinker. Ce processus de transformation exige plusieurs types de réactions qui sont possible grâce à l'importante source de chaleur que dégage la combustion du fuel, l'oxygène des airs et autres combustibles (alternatif ou de substitution) en présence de la flamme. Cette importante chaleur doit être gérée afin de permettre les autres types de réactions qui ont lieu dans les autres zones du four, ce qui oblige l'opérateur à avoir un procédé auto-suffisant en énergie.

Le gaz chaud cède une partie de sa chaleur au lit de matière pour la formation de la chaux dans les zones de calcination et préchauffage, et une partie dans la zone de séchage pour l'évaporation de l'eau. Soulignons que les échanges de chaleur sont de trois genres à savoir : la radiation, la convection et la conduction.



FigureII-1 : Représentation des principaux échanges de chaleur dans un four à travers une section transversale (condition stationnaire)

2 Modèles mathématiques :

Nous présenterons les grandes approches utilisées par la plupart des travaux dans l'étude du four rotatif de clinker. La première approche s'appuie sur un modèle à une dimension (1D) et est basée sur l'équation de conservations de la matière et de l'énergie, la dernière approche se démarque des deux autres par le fait qu'elle fait intervenir le concept de fonctions opératoires.

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

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

$$Q_{GB} = h_{GB} A_{GB} (T_G - T_B). \quad (\text{II-1})$$

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

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

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

$$A_{GB} = 2\pi R_B - A_{BC} \quad (\text{II-3})$$

Avec

$$A_{BC} = 2.44 \left(\frac{M_{lit} \cdot T}{L_t \cdot \rho_{lit}} \right)^{0.35} \quad (\text{II-4})$$

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

h_{GB} : est un coefficient global de transfert de chaleur (convection et rayonnement). [29]

- **Convection :**

Nous avons retenu l'expression de Kreith et Black :

$$h_{GB} = 0,036 \frac{kg}{D} Re^{0,33} Pr^{0,33} \left(\frac{D}{L} \right)^{0,055} \quad (\text{II-5})$$

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

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

$$h_{GB} = 1,54 \frac{k_g}{D_e} Re_D^{0,575} Re_D^{-0,292} \quad (\text{II-6})$$

Par ailleurs, ils ont montré que h_{GB} est indépendant du taux de remplissage volumique. [30]

- **Rayonnement :**

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

$$h_{GB} = 2\sigma\varepsilon_G\varepsilon_B(T_G^3 - T_B^3) \quad (\text{II-7}) \quad \text{celle de}$$

Lyons et al.

Et

$$h_{GB} = \sigma\varepsilon_G(T_G^4 - T_B^4)/(T_G - T_B) \quad (\text{II-8})$$

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

$$h_{GB} = \sigma\Psi(T_G^4 - T_B^4)/(T_G - T_B) \quad (\text{II-9})$$

Avec

$$\Psi = \varepsilon_G\varepsilon_B[1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]\Omega, \quad (\text{II-10})$$

où

$$\Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \theta/2} \quad (\text{II-11})$$

et

$$\Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi[1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]]} \quad (\text{II-12})$$

Toutefois, Hottel et sarofim proposent une expression également précise de la quantité de chaleur échangée entre le gaz et le mur intérieur lorsque [31] : $\varepsilon_B \geq 0,8$

$$Q_{GB} = \sigma A_{GB}(\varepsilon_B + 1)(\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_B^4)/2 \quad (\text{II-13})$$

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

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

$$Q_{GC} = h_{GC} A_{GC} (T_G - T_c), \quad (\text{II-14})$$

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

$$A_{GC} = 2R_B \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (\text{II-15})$$

h_{GC} : Coefficient global de transfert de chaleur (convection et rayonnement). [32]

- **Convection :**

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

$$h_{GC} = 0,46 \frac{k_g}{D_e} Re_D^{0,535} Re_\omega^{0,104} \eta^{-0,341}. \quad (\text{II-16})$$

- **Rayonnement :**

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

$$h_{GC} = 2\sigma \varepsilon_G \varepsilon_C (T_G^3 + T_C^3) \quad (\text{II-17}) \quad \text{Celle}$$

de Lyons et al

Et

$$h_{GC} = \sigma \varepsilon_G (T_G^4 - T_C^4) / (T_G - T_C) \quad (\text{II-18}) \quad \text{Celle}$$

de Sass

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

$$h_{GC} = \sigma \Psi (T_G^4 - T_C^4) / (T_G - T_C) \quad (\text{II-19})$$

$$\text{Avec} \quad \Psi = \varepsilon_G \varepsilon_C [1 + \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)] \Omega, \quad (\text{II-20})$$

$$\text{Où} \quad \Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \theta/2} \quad (\text{II-21})$$

$$\text{Et} \quad \Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi(1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]}. \quad (\text{II-22})$$

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

$$Q_{GC} = \sigma A_{GC} (\varepsilon_C + 1) (\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_C^4) / 2. \quad (\text{II-23})$$

2.3 Transfert de chaleur entre la paroi et le solide :

L'équation générale est :

$$Q_{BC} = h_{BC} A_{BC} (T_B - T_C). \quad (\text{II-24})$$

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

$$A_{BC} = 2,44 \left(\frac{M_{lit.T}}{L_T \cdot \rho_{lit}} \right) \quad (\text{II-25})$$

$$\text{Ou à :} \quad A_{BC} = \theta R_B \text{ ou à } A_{BC} = 2R_B \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{II-26}) \text{ (Perron).}$$

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

- **Conduction :**

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

$$h_{BC} = 118,2 \left(\frac{M_G}{A_G} \right)^{0,67} . \quad (\text{II-27})$$

- **Rayonnement :**

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

$$h_{BC} = 2\sigma\varepsilon_B\varepsilon_C \frac{A_B}{A_C} (T_C^3 + T_B^3) \quad (\text{II-28})$$

et
$$h_{BC} = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon_C(T_B^4 - T_C^4)/(T_B - T_C). \quad (\text{II-29})$$

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

$$h_{BC} = \sigma\Psi(T_B^4 - T_C^4)/(T_B - T_C) \quad (\text{II-30})$$

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

Où
$$\Omega = \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_B)[1 - \Phi[1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_C)]]} \quad (\text{II-31})$$

Et
$$\Phi = \frac{\sin(\pi - \frac{\theta}{2})}{\pi - \theta/2}. \quad (\text{II-32})$$

3 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a vu le four rotatif de clinker a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche comme en témoigne notre étude bibliographique non exhaustive. Le bilan thermique du four rotatif contient les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) entre le gaz, les briques réfractaires, paroi et solide

Chapitre III : Méthode Numérique

1 Introduction :

La dynamique des fluides computationnelle (CFD) est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes et des algorithmes numériques pour résoudre et analyser des problèmes. La dynamique des fluides computationnelle (CFD) concerne la solution numérique des équations différentielles régissant le transport de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans les fluides en mouvement. La dynamique des fluides computationnelle est un prototype virtuel qui guide la construction de modèles d'écoulement précis en résolvant des équations de transport.

La caractéristique des flux de combustion peut être analysée en détail avec la dynamique des fluides computationnelle. La conception (du souci du dimensionnement, du fonctionnement économique et de la sécurité) des équipements d'ingénierie tels que les échangeurs de chaleur, les fours, les tours de refroidissement, les moteurs à combustion interne, les moteurs à turbine à gaz, les pompes et turbines hydrauliques, les corps d'avions, les navires de mer et les fusées dépendait de informations empiriques minutieusement générées.

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution de l'équation aux dérivées partielles dans un domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs à l'intérieur du domaine d'étude.

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

2 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution.

Cette méthode est plus facile à comprendre lorsque la grille physique est cartésienne. La discrétisation se traduit par un système d'équations de la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, nous avons une représentation discrète de la solution. [23]

- Avantages de la méthode
 - Mise en œuvre relativement simple,
 - Prise en considération des non-linéarités

- Inconvénients de la méthode
- Difficile à utiliser dans le cas géométrique complexe,
- Tailles des systèmes algébriques importantes,
- Temps de résolution relativement élevés.

3 Méthode des éléments finis :

La méthode de résolution par éléments finis permet de calculer des grandeurs physiques pour tous les points d'une structure donnée. Pour obtenir un résultat sur un domaine continu, il est nécessaire de discrétiser le volume ou la surface d'étude par un maillage, en la subdivisant en sous éléments : les éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds [24].

Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel. [25]

Cette méthode se décompose en deux étapes :

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

4 La méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel,

(E, W, S, N) dans le cas bidimensionnel, et (E, W, S, N, T, B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer

l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales.

4.1 Formulation Bidimensionnelle de l'Equation de Poisson par la MVF :

La formulation monodimensionnelle ci-dessus de la méthode des volumes finis peut être étendue au cas bidimensionnel. La formulation bidimensionnelle consiste à subdiviser le domaine d'étude (Ω) en un nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds. Un volume fini entoure chaque nœud (Figure III-2)

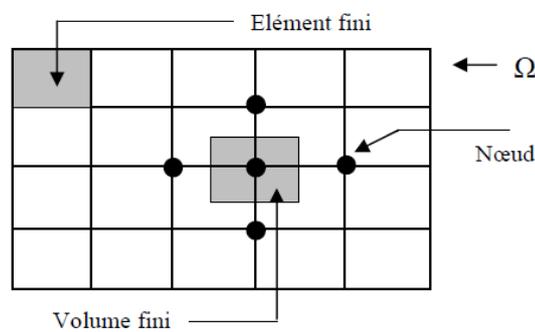


Figure III-1 : Discretisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel

Le nœud principal "P" est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord "N", celui du Sud "S" (Dans la direction y) et celui de l'Ouest "W", celui de l'Est "E" (dans la direction x. [23])

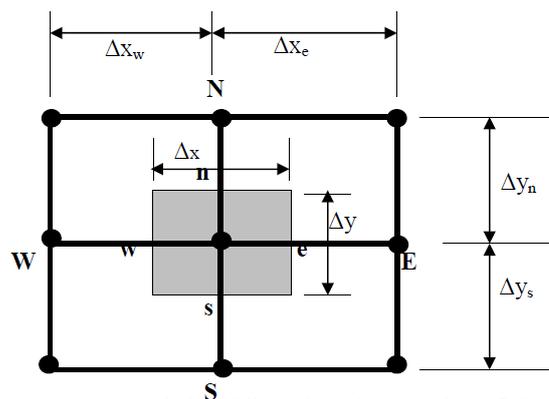


Figure III-2 : Description bidimensionnel d'un volume fini.

4.2 Équations gouvernantes :

Les équations gouvernantes sont présentées sous la forme différentielle, qui a été dérivée en considérant un volume de contrôle fixe infiniment petit. Ces équations de conservation (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont des équations aux dérivées partielles non linéaires, les analyses différentielles des écoulements de fluides et de transfert de chaleur ne peuvent être résolues numériquement qu'en utilisant un code CFD (par exemple ANSYS FLUENT ou ANSYS CFX, ANSYS >WorkBench...).

4.2.1 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:

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

4.2.2 Conservation de quantité de mouvement :

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

- Selon la coordonnée radiale :

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

- Selon la coordonnée axiale :

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

4.2.3 Équation de conservation d'énergie :

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

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

4.2.4 Principales méthodes d'approches pour la turbulence : [26]

- Simulation numérique directe (DNS) :

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

- Simulation des grandes échelles (LES) :

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

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

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

4.2.5 Choix du modèle de turbulence :

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

Le modèle ($k - \epsilon$)

Les modèles ($k - \omega$)

Les modèles de Transition SST. [27]

4.2.6 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, Réalisable, les modèles ($k - \omega$) Standard et SST).

4.2.7 Modèles du deuxième ordre :

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

4.2.8 Le modèle ($k - \epsilon$) :

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

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

4.2.9 Modèle $k - \epsilon$ standard :

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

- Le modèle $k - \omega$ standard :

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

- Le modèle $k - \omega$ SST :

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

5 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 refroidir la partie cuisson du four rotatif. Nous avons utilisé la méthode des volumes finis dans logiciel (ANSYS WORK-BENCH et ANSYS FLUENT).

Le four étudié dans ce projet d'usine (LafargeHolcim OGGAZ –SIG MASCARA) figure (III.3) avec dimensions présentés dans le tableau (III.1), phénomène que j'ai vécu dans mon stage pratique.



Figure (III.3) : four rotatif d'usine (LafargeHolcim-Mascara)

Dimensions du four	Valeur
Longueur	80 m
Longueur de la partie cuisson	20 m
Diamètre intérieur	5 m
Epaisseur de la virole	25 mm
Epaisseur de Brique	220 mm
Epaisseur de Croutage	200 mm
Inclinaison	2.40°

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

Cette étude est réalisée avec un modèle mathématique (3D). Le domaine cylindrique est considéré comme un fluide. Le centre du four placé à 20 m de l'entrée du domaine de calcul et la longueur du domaine de calcul du centre du four à la limite de la sortie est égale à 40 m. L'étude est basée sur le transfert de chaleur à l'intérieur du four 1400 °C jusqu'à la paroi extérieure.

Notre but c'est de refroidir la virole du four rotatif avec deux fluides différents (air-eau) et déterminer la valeur de température dans la virole Dans un deuxième temps.

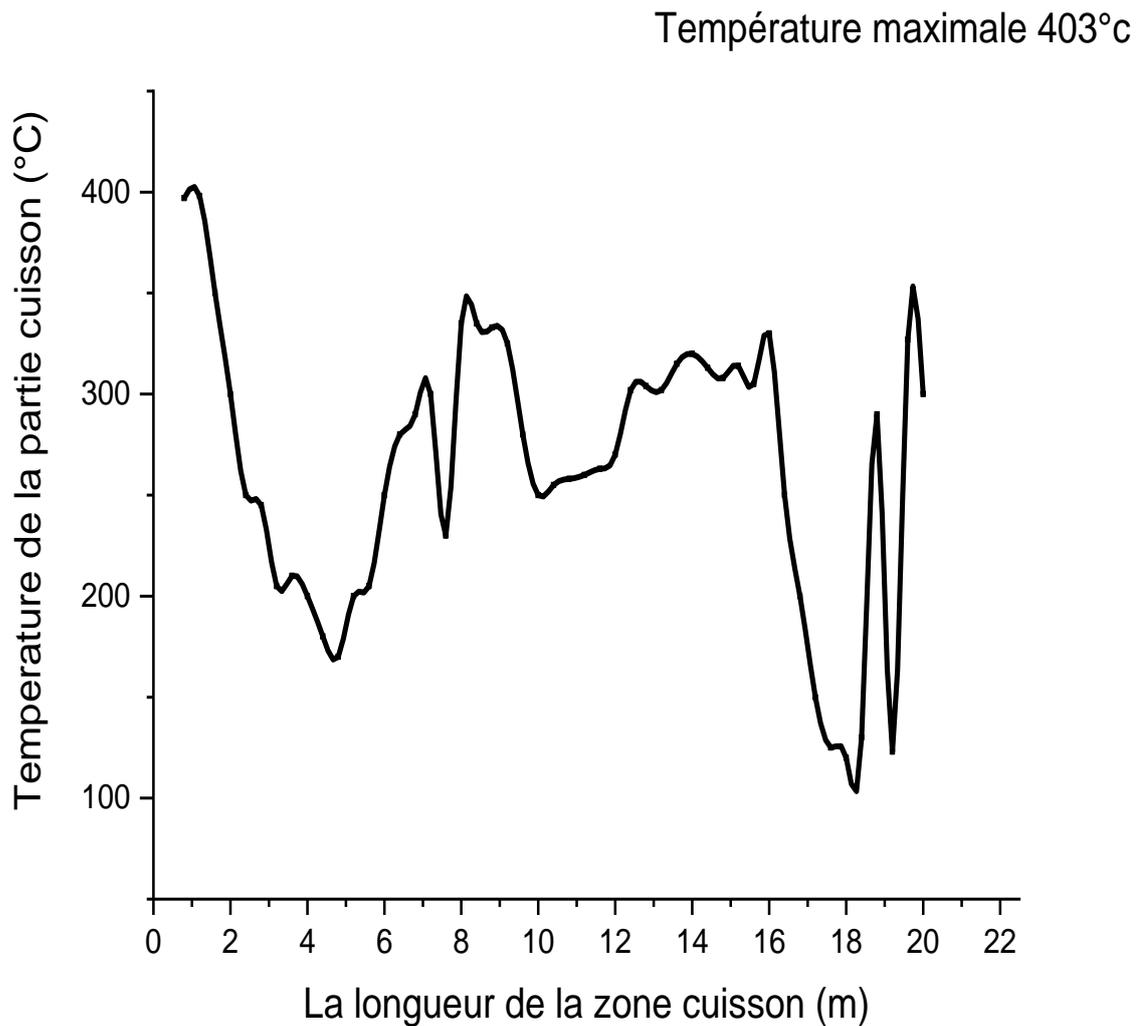


Figure III.4 : profil de température de la virole (partie cuisson) dans la salle de commande d'usine (LafargeHolcim).

La figure III.4 représente la température de virole de la zone de cuisson extrait des données expérimentales de salle de control d'usine la fargeHolcim.

6 Présentations du logiciel ANSYS :

C'est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. ANSYS développe, promeut et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés.

Généralement, les logiciels de calcul par éléments finis sont très peu abordables et nécessitent d'importantes connaissances en calcul. Cet outil permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures, Ses principales capacités sont : l'analyse statique, l'analyse modale, l'analyse harmonique (réponse forcée), l'analyse temporelle. [28]

7 Présentation du WORK-BENCH :

ANSYS Workbench est au centre de l'environnement de simulation ANSYS. Il facilite la saisie des entrées pour la résolution de calculs. Grâce aux commandes APDL, les fonctions classiques d'ANSYS peuvent aussi être utilisées dans Mechanical. Des scripts automatisant les tâches et les procédures de contrôle d'ANSYS Workbench. ANSYS séduit par son incroyable efficacité révélée au quotidien, avec une interface utilisateur uniforme, une technologie réseau complète, sa connexion directe avec tous logiciels majeurs de la CAO et un large éventail de physiques. Ansys Workbench facilite la prise de décisions de conception plus éclairées en coordonnant toutes vos données de simulation en un seul endroit. [29]

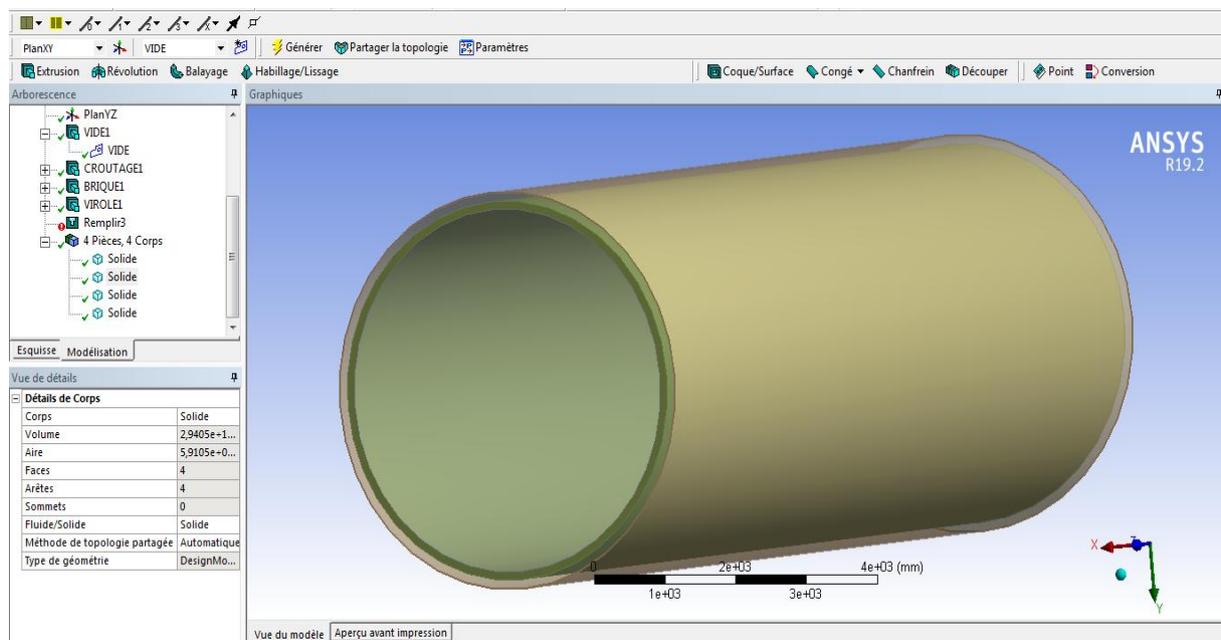


Figure III.5 : L'interface d'Ansys Workbench

8 Présentation de l'ANSYS Fluent CFX :

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Ce logiciel est un solveur : il ne comporte pas de maillage (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, ICEM CFD par exemple). ICEM CFD est un logiciel utilisé pour la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et la génération de maillage. Il permet de créer des maillages structurés, non structurés, multi-blocs ainsi que des réseaux hybrides avec différentes géométries de cellules.

Les maillages créés peuvent ensuite être exportés vers différents logiciels de CFD tels que Fluent ou STARCCM+. ICEM CFD est un mailleur et n'est normalement pas destiné à créer des géométries trop élaborées. Toutefois, lorsque la géométrie est simple, il suffit amplement. [29]

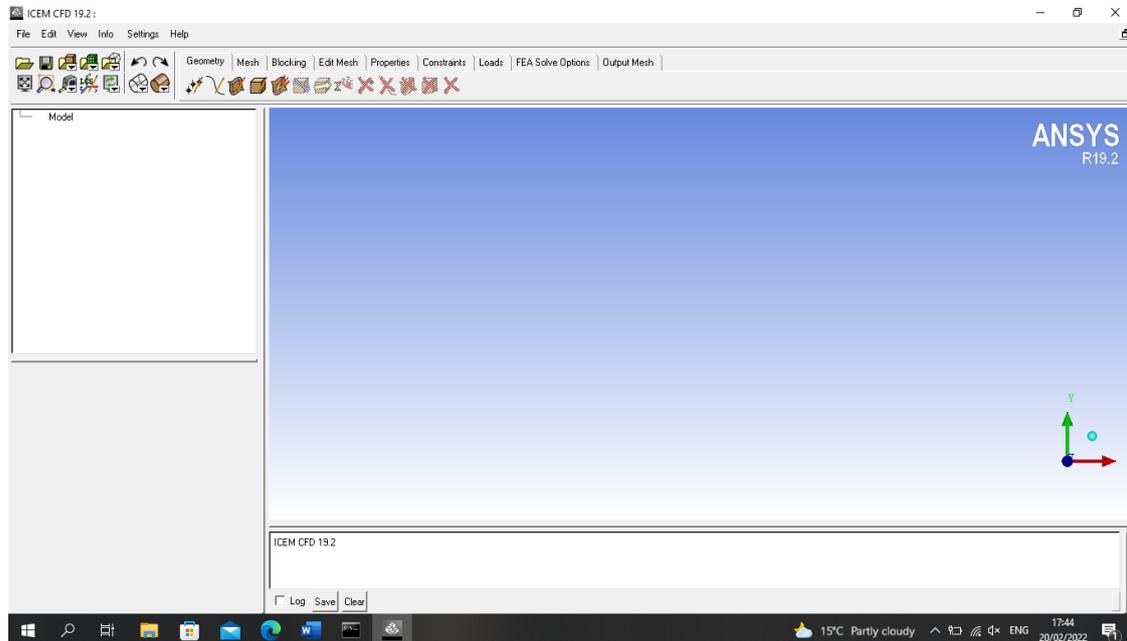


Figure III.6 : L'interface d'Ansys Fluent CFX

9 Modélisation dans ANSYS :

L'analyse du problème du comportement thermique d'un four rotatif de cimenterie, est faite par des équations d'énergie dans ANSYS workbench et mécanique des fluides (Fluent CFX). Ce programme à rendement élevé et d'usage universel de mécanique de fluides qui a été appliqué pour résoudre des problèmes thermiques [29]. Sa technologie avancée permet de réaliser des solutions fiables et précises. Ce modèle est tellement complexe qu'il prend beaucoup de temps dans les calculs. Il faut simplifier le modèle pour obtenir une solution assez précise.

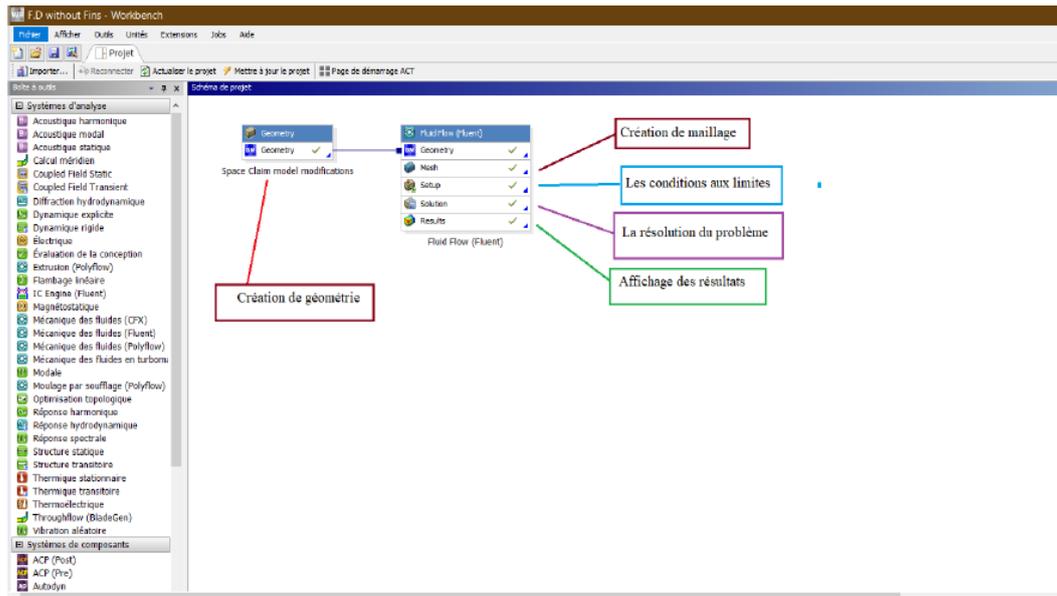


Figure III.7: ANSYS Workbench interface

9.1 Création de géométrie :

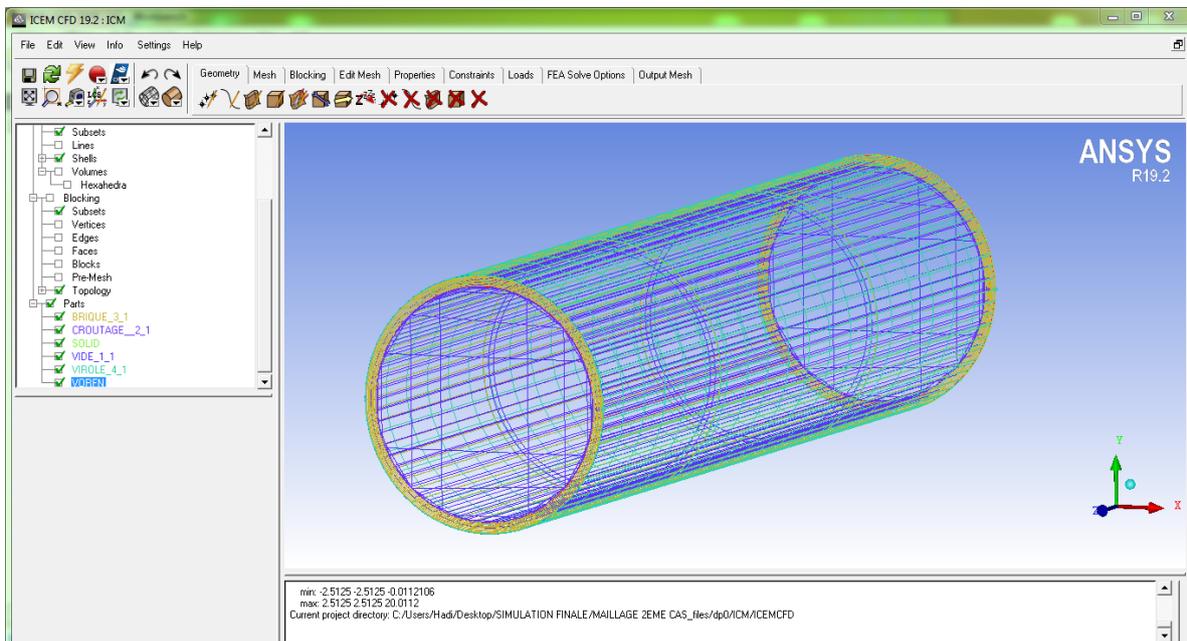


Figure III.8 : géométrie du four rotatif

9.2 Maillage :

La réalisation des maillages est en général l'étape la plus longue en temps de travail humain dans les simulations numériques de l'ingénieur. Elle est de plus une des plus importantes afin d'obtenir de bons résultats, il faut donc concevoir des maillages propres qui puissent capter tous les phénomènes physiques que l'on cherche à observer.

On a deux types de maillage :

- Maillage triangulaire et tétraédrique
- Maillage quadrangulaire et hexaédrique

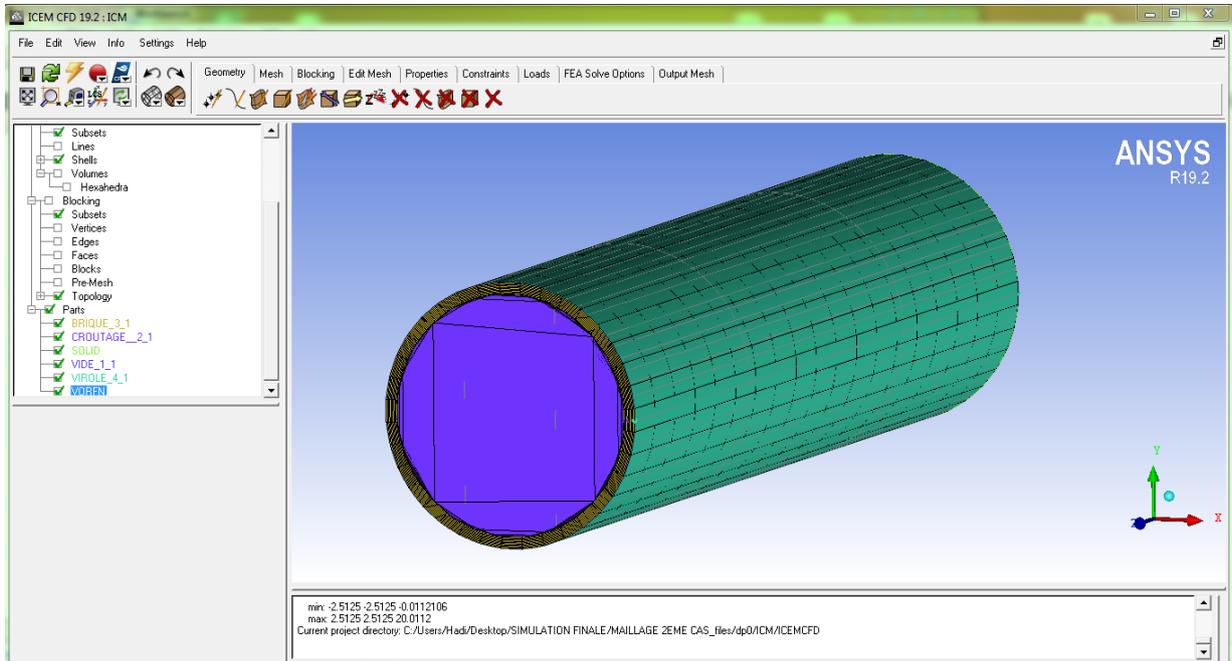


Figure III.9 : maillage quadratique.

9.3 Optimisation du maillage :

Pour déterminer la taille optimale et le nombre d'éléments dans les deux directions circonférentielle et longitudinales, nous avons fait un certain nombre d'expériences avec différents nombres d'éléments et d'itérations.

On a conclu qu'un maillage trop fin serait augmenter de façon exponentielle le temps de calcul, pour un maillage trop grossier serait sacrifier l'exactitude des résultats. Il Ya toujours un intervalle où la précision des résultats est acceptée.

	Eléments	Nœuds
Maillage 1	209562	200000
Maillage 2	512356	500000
Maillage 3	713568	700000

Tableau III.2 : Paramètre de maillage.

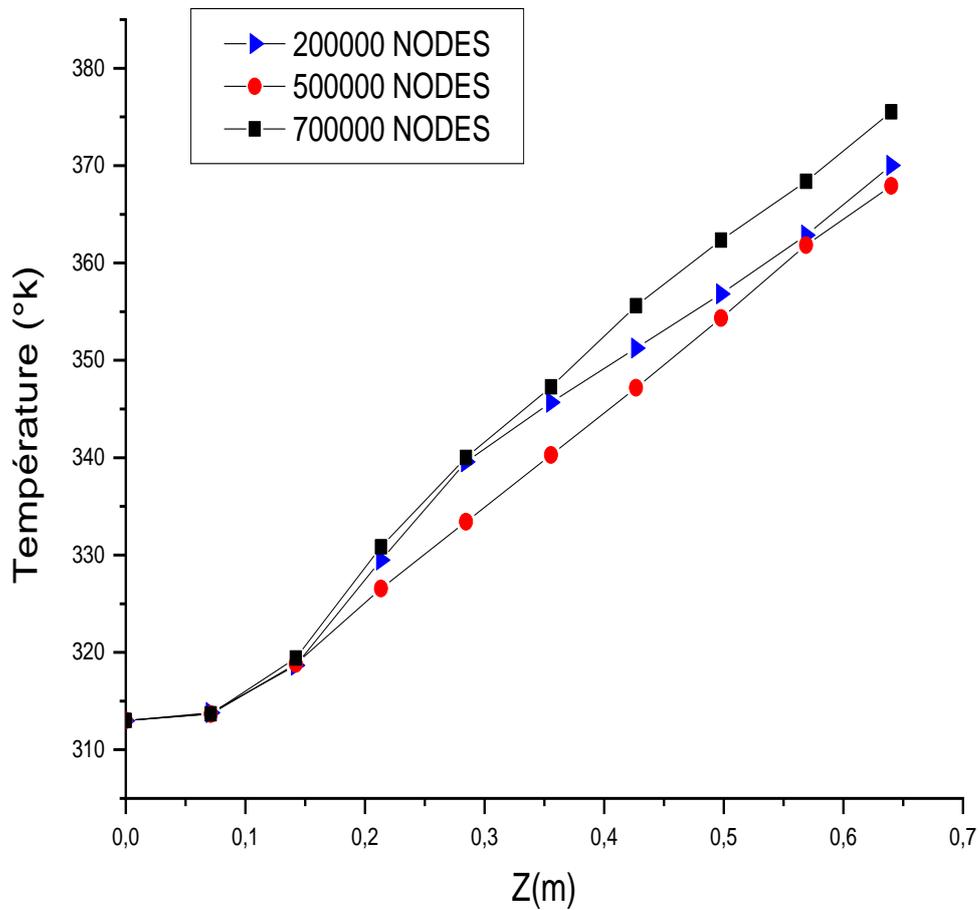


Figure III.10 : Comparaison des différents maillages

L'optimisation du maillage consiste à choisir la grille qui converge le mieux, donnant de bons résultats, et qui consomme le moins possible de temps CPU. C'est pour cela qu'une bonne optimisation du maillage s'est avérée nécessaire pour aboutir à un bon compromis entre cette étude et les moyens qu'on a déployé pour la réaliser. Pour ce faire, différents maillages ont été essayés dans notre investigation (figures III-8), classés selon le nombre de nœuds en trois catégories : 200000 nœuds, 500000 nœuds et 700000 nœuds.

Les résultats trouvés indiquent que la grille (200000 nœuds) est celle qui optimise le mieux ce calcul. Soulignons aussi que le nombre réduit des nœuds de ce maillage est avantageux en temps de calcul et en espace mémoire pour la machine de calcul.

9.4 Conditions aux limites :

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

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

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

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

10 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des outils numériques utilisés pour la résolution de notre problème à savoir workbench ANSYS Fluent. Les différentes méthodes numériques de discrétisation telle que la méthode des volumes finis, ainsi que, la modélisation de la turbulence et les étapes de faire la simulation, on a créé une géométrie de la virole du four rotatif, puis on a appliqué un maillage quadratique passant par une optimisation du maillage pour un choix bien fini du maillage et des résultats précis et rapide . Les résultats et leurs interprétations seront détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre VI : Résultats Et Discussion

1 Introduction :

L'étape la plus importante de cette étude est la mise en évidence de notre simulation, ainsi que l'interprétation des résultats trouvés. Comme première phase de notre travail, il est impératif de passer par une validation. Ensuite on va aller vers l'étude d'autres cas ou on a remarqué l'influence des différents paramètres de notre système à savoir l'effet de changement de vitesse d'injection d'air et la température et en fin le changement du fluide de refroidissement.

Alors dans ce chapitre on va voir la présentation de notre cas d'étude qui consiste à déterminer la valeur de température dans la virole. Dans un deuxième temps, la même virole sera reproduite avec les mêmes conditions aux limites avec un changement de fluide de refroidissement en utilisant l'eau... par les injecteurs pour déduire l'effet de l'eau. Dans ce travail, on a utilisé le code de calcul ANSYS Fluent.

2 Résultats et discussion :

Les résultats obtenus par la simulation numérique réalisée sous le logiciel ANSYS Fluent sont représentés. La variation de température intérieure du four, la variation de température ambiante, l'effet de variation de vitesse d'injection d'air sont discutés.

3 La validation :

Comme première étape, on passe par une validation pour donner une crédibilité à ce travail. La figure VI.1 montre les valeurs des températures de notre étude comparées par rapport aux valeurs de température de la virole (partie cuisson) prises dans la salle de commande de l'usine OGGAZ (LAFARGE-sig mascara). On remarque que les deux courbes ont une certaine ressemblance, au début il y a une diminution jusqu'à 165°C, en suite une augmentation jusqu'à 350°C à l'usine et 305°C à notre étude, en fin on remarque une diminution de température extérieure de virole à l'usine 120°C par rapport à notre étude une diminution jusqu'à 180°C.

Il y a une différence entre le résultat de notre étude et le profil de température de l'usine. On remarque que la température extérieure maximale de la virole de notre étude augmente jusqu'à 390°C celle de température de l'usine jusqu'à 403°C et après une diminution de température des deux graphes.

Il existe de 10% à 15% d'erreurs maximale à notre étude par rapport à la validation car notre étude c'est une simulation numérique et l'autre c'est un phénomène réel, et l'épaisseur de croutage prise dans la simulation de notre étude est une estimation bien définie, aussi l'état de briques réfractaires dans le four est qu'il est neuf ou déjà fondu. C'est tous des facteurs affectant le fonctionnement du four et aussi la simulation

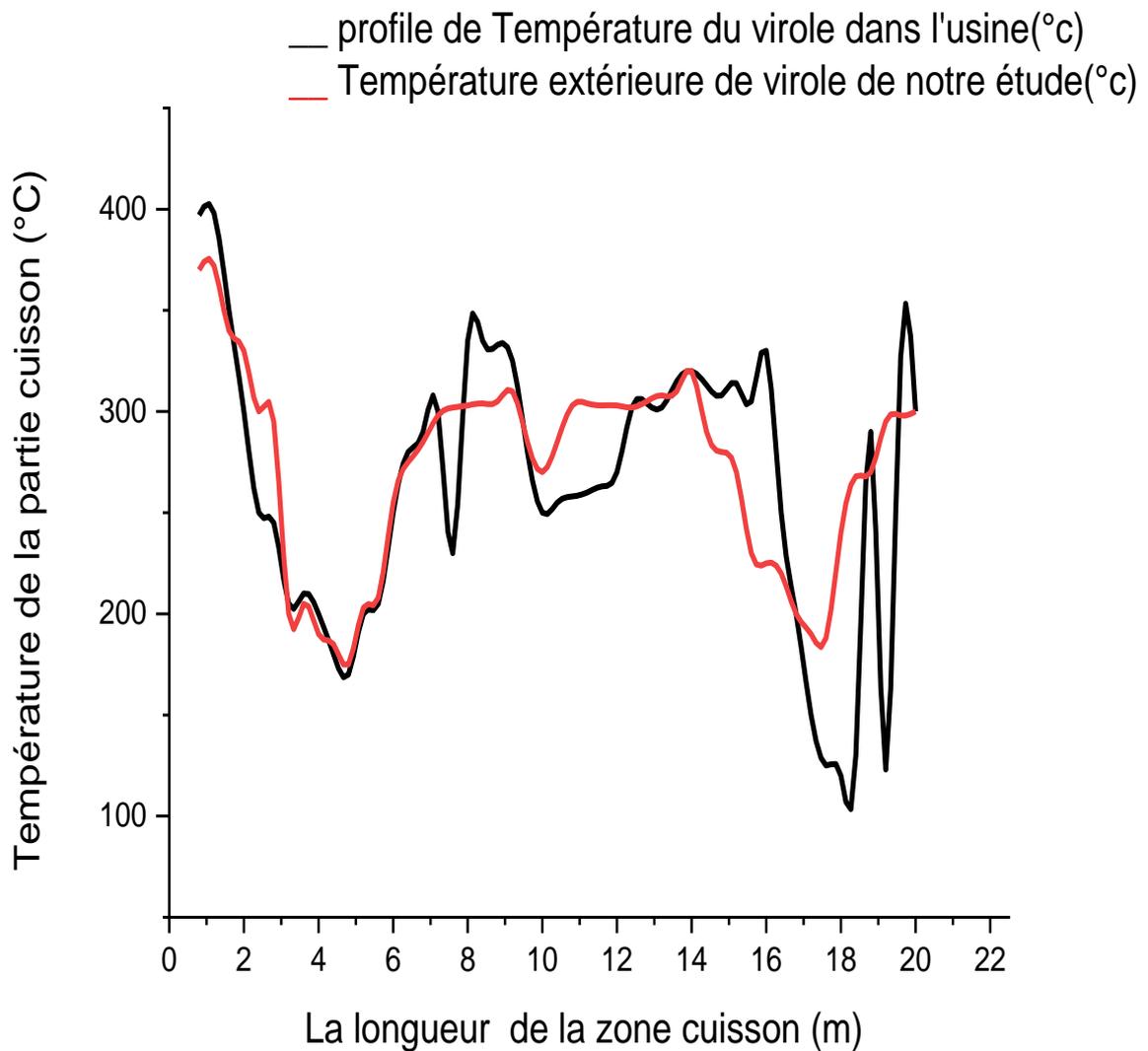


Figure IV.1 : la validation des températures de la virole de notre étude par rapport celle du l'usine.

4 Etude de cas :

Dans le but de déterminer l'effet de l'air de refroidissement sur la température de la virole de four rotatif comme celle du cas réelle dans l'usine, on a créé un maillage du four rotatif assez semblable du cas réel dans l'usine, pour une simulation parfaite.

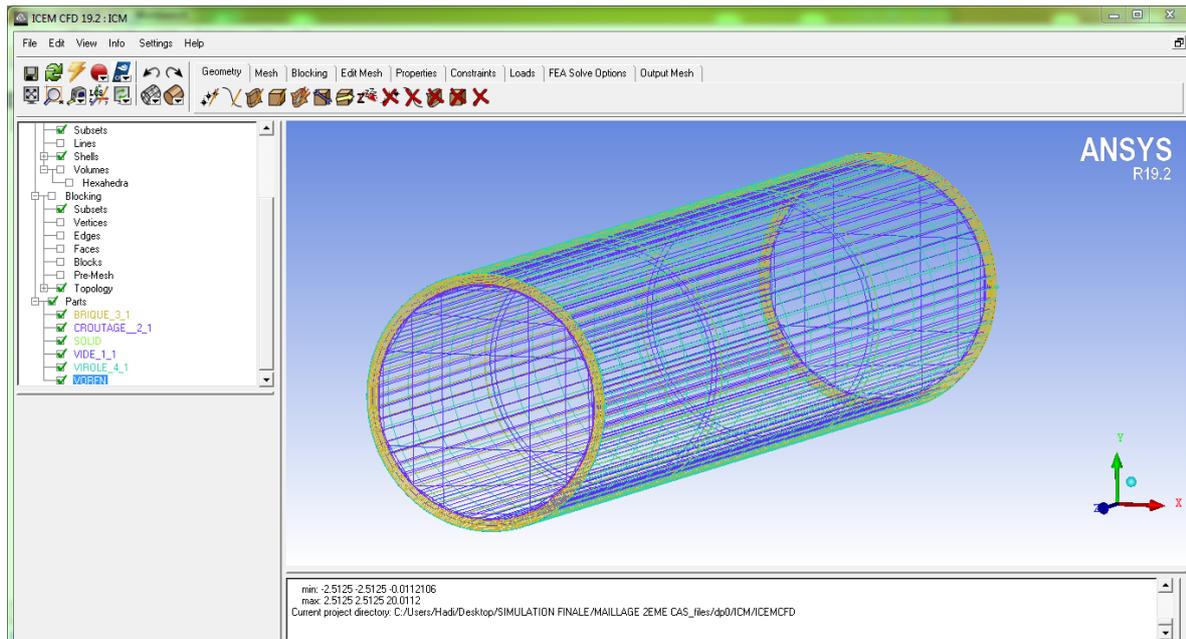
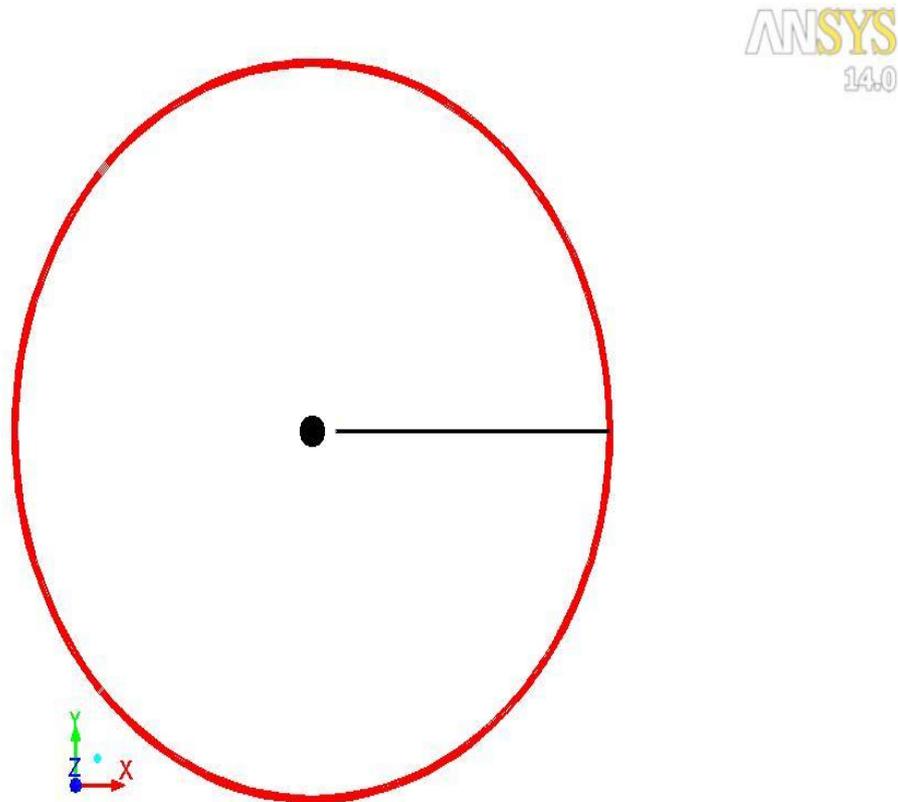


Figure IV.2 : La géométrie du four rotatif

Ce cas d'étude de travail fait partie à l'analyse thermique d'une coupe partielle de virole représentée dans la figure IV.3. La figure IV.3 montre la nouvelle géométrie de la virole de four rotatif étudié, elle est munie de plusieurs ventilateurs de 1m de longueur, 50cm de largeur, devisés dans la partie cuisson le long de la virole. On a pris une coupe partielle du four rotatif de 5 m de diamètre et 2 m de longueur et faite une symétrie le long du four, pour faciliter la simulation et ne prend pas beaucoup de temps dans les calculs. (La figure IV.3). On a pris les mêmes conditions aux limites celle de réel modèle pour déduire l'effet de l'air injecté sur la température extérieure de la virole.



Mesh

Sep 29, 2022
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dp, pbns, rke)

Figure IV.3 : coupe partielle de la géométrie de la virole du four rotatif

4.1 Contour de température (section du four) :

Figure IV.4 montre la distribution de température à l'intérieur et à la couche de brique ainsi à la couche de virole du four du four rotatif. On constate que la température est maximale à l'intérieur, elle atteint $1450(C^{\circ})$ et la paroi de brique atteint de $700(C^{\circ})$ jusqu'à $800(C^{\circ})$, et la paroi de virole atteint environ $(400C^{\circ})$.

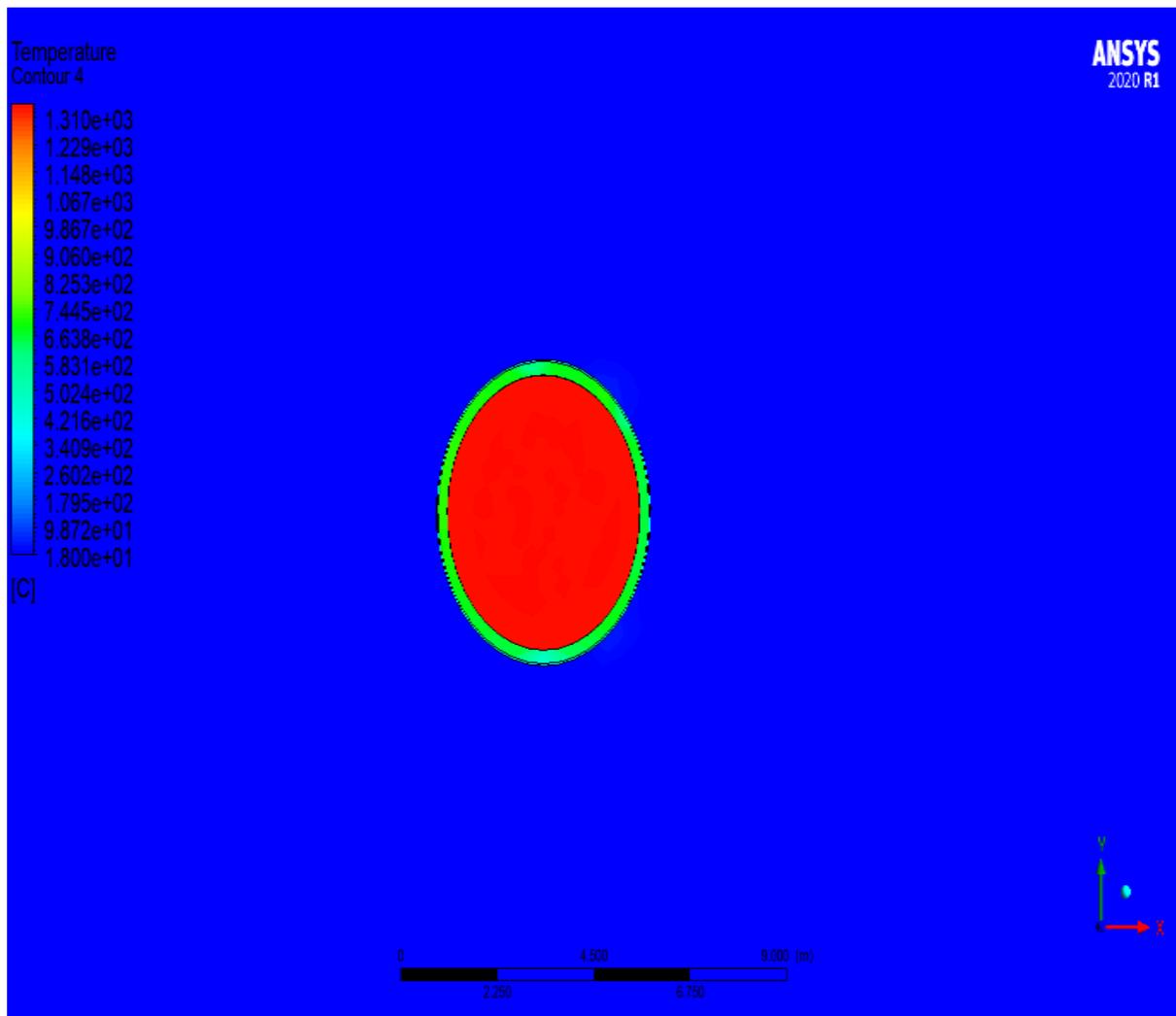


Figure IV.4 : les contours des températures dans la section du four rotatif

4.2 Contour des lignes de vitesse :

La figure IV.5 montre la distribution des lignes de vitesse, on remarque que le contact des particules d'air d'injection avec la virole provoque une diminution de la température. On remarque que le contact des particules d'air avec la paroi de four rotatif dans les points de séparation situés derrière la virole, on observe l'apparition des vortex due à l'écoulement turbulent lors de la séparation de la paroi de virole.

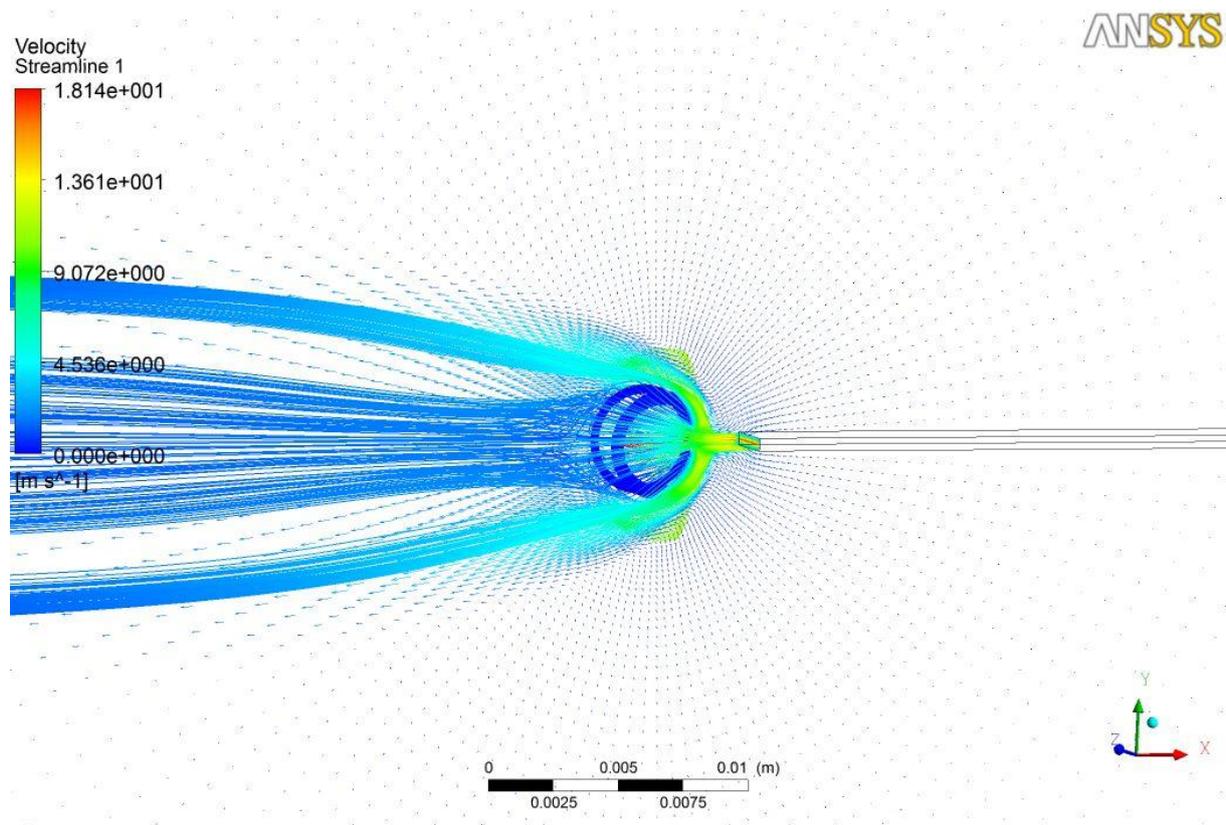


Figure IV.5 : Contour des lignes de vitesse de four rotatif.

4.3 Contour de pression :

La figure VI.6 montre la répartition de la pression autour de l'intérieur, brique, virole de four rotatif.

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

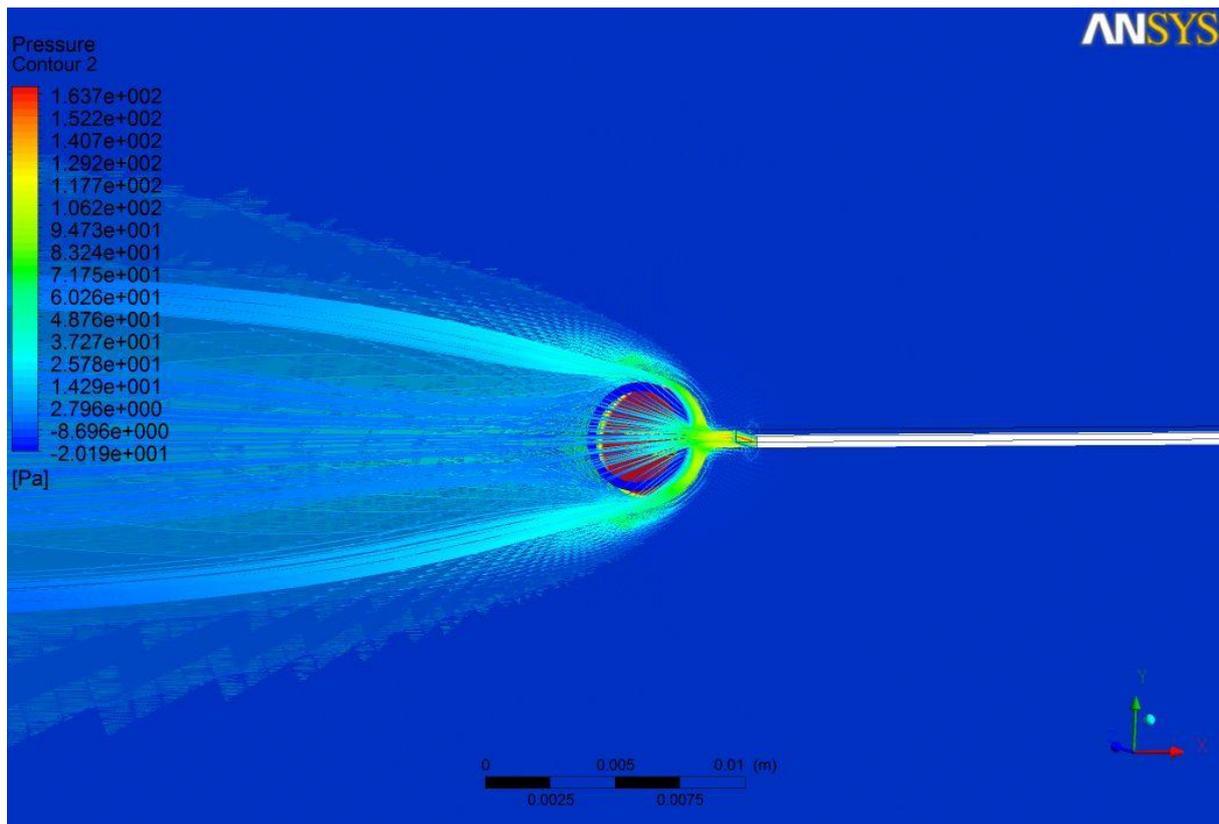


Figure IV.6 : Contour de pression de four rotatif

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

- **Variation de la vitesse d'injection d'air :**

Le but de ce cas d'étude est de déterminer l'effet de la vitesse d'air d'injection des ventilateurs sur le comportement thermique de la virole. Trois essais ont été effectués, on a varié la vitesse d'air de 18m/s m/s à 38m/s pour déduire la valeur maximale de température de la virole.

Cette étape consiste à déduire l'effet de la vitesse d'air injecté sur la température maximale de la virole. Le tableau IV.1 montre l'évolution de la température en fonction de la vitesse d'air. En remarque que la température diminue relativement quand on augmente la vitesse d'injection d'air.

Vitesse d'air d'injection (m/s)	18	28	38
Température extérieure de la virole (°C)	370	340	315

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

La figure IV.7 montre la variation de la température extérieure de la virole en fonction de différentes vitesses d'injection d'air. Les profils de température ont la même tendance et la même forme. La température de virole diminue de 25 C° (de 18 m/s à 38 m/s).

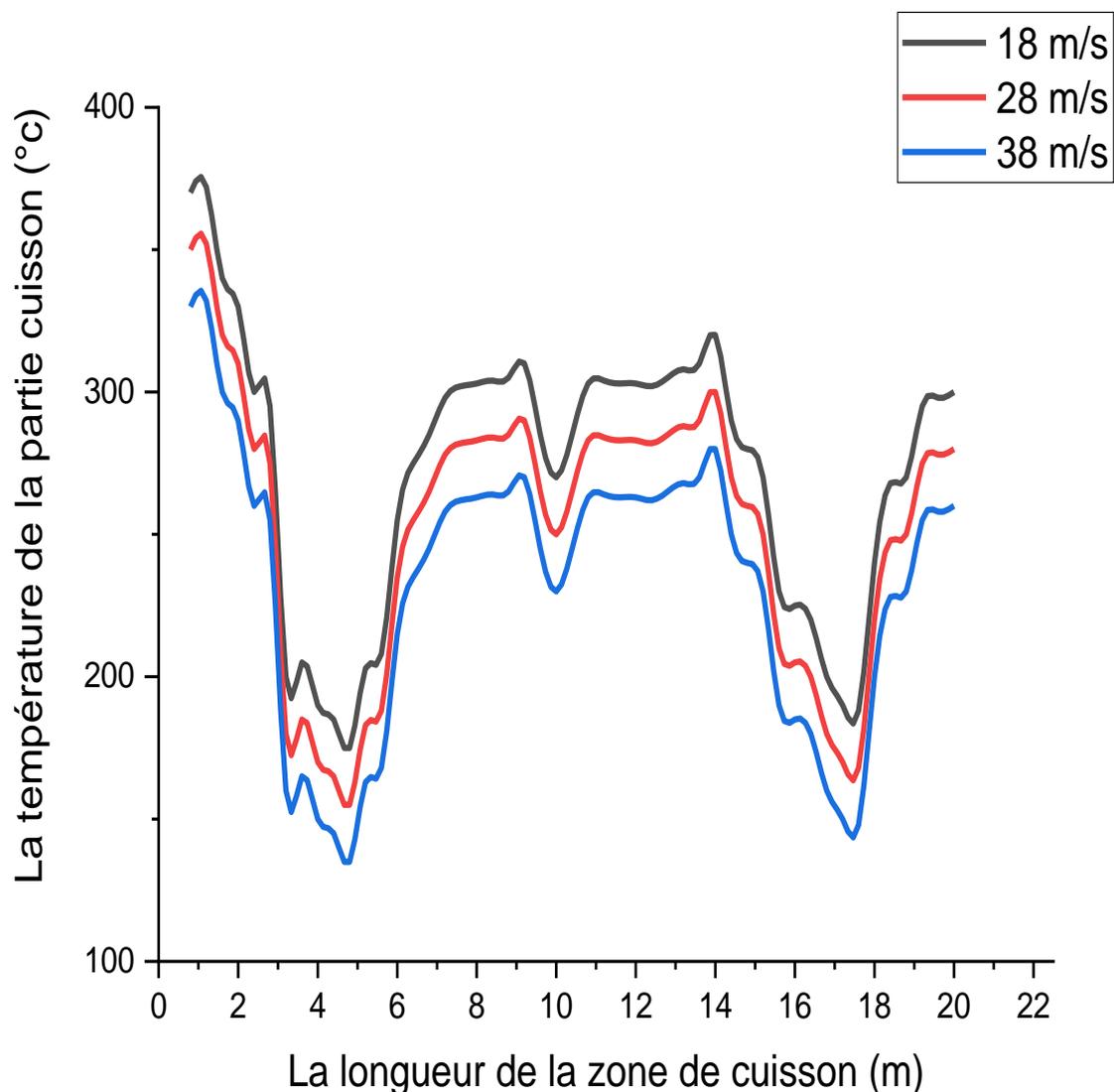


Figure IV.7 : Evolution de la température extérieure de la virole en fonction de la vitesse d'air injecté.

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

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

Température intérieure du four (C°)	1150	1300	1450
Température extérieur de la virole (°C)	390	430	470

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

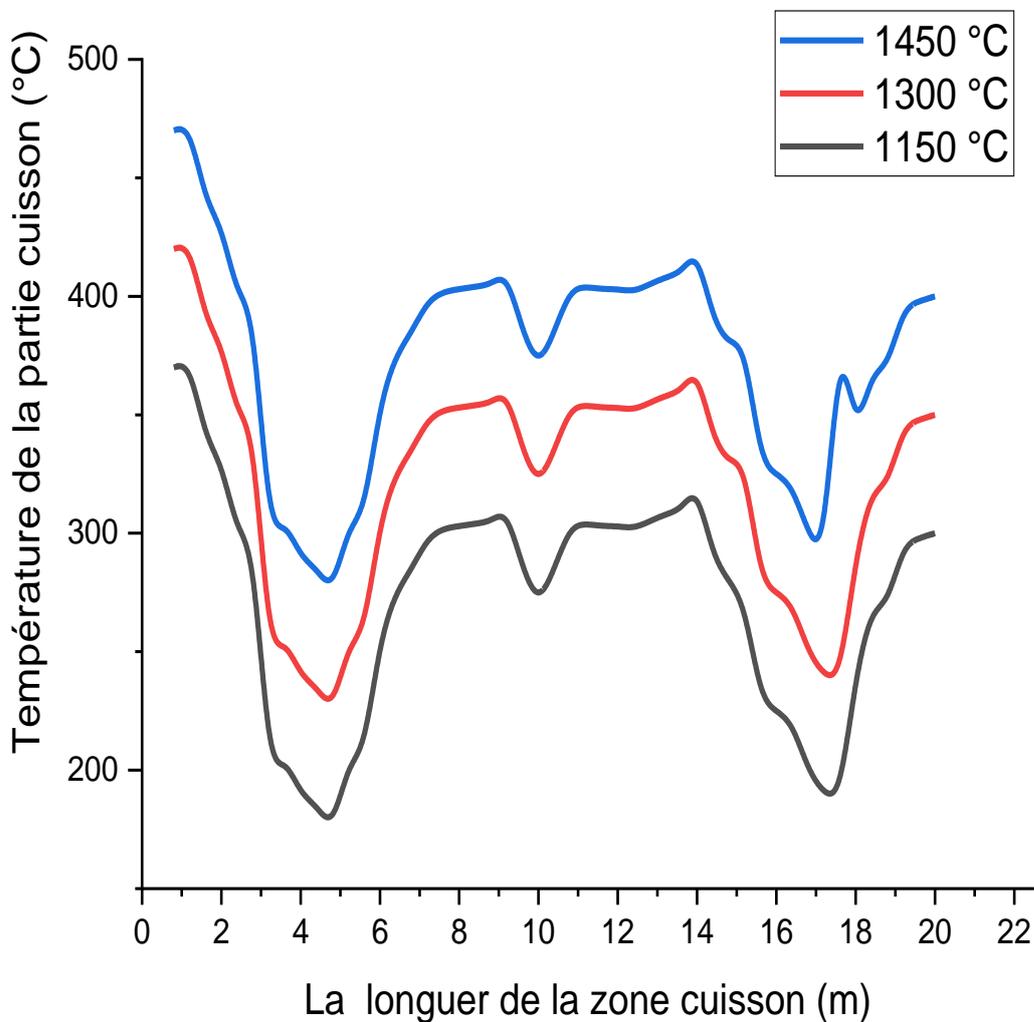


Figure IV.8 : Température extérieur de la virole en fonction de température intérieur du four.

La figure IV.8 représente la variation de la température extérieure maximale de la virole en fonction de température d'air chaud du bruleur, On remarque une augmentation de 40 C° (de 1150 °C à 1450°C) de la température de la virole.

- **Variation de température d'air ambiant :**

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'injection d'air Ambiant, de 5°C à hiver jusqu'à 40°C à l'été.

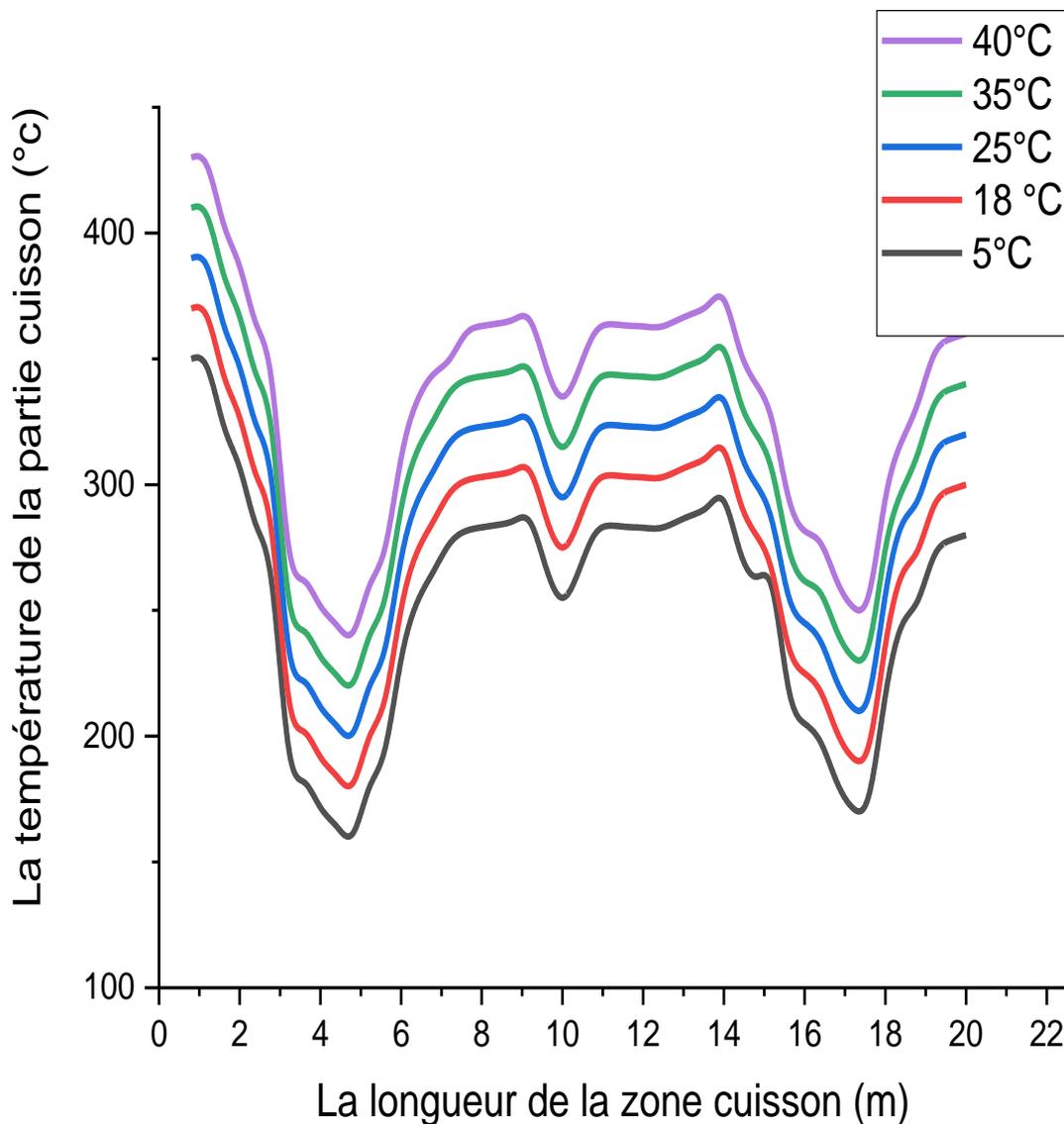


Figure IV.9 : Température de la virole en fonction de la température d'air ambiant.

La figure IV.9 représente la variation de la température extérieure de la virole en fonction de température d'air ambiant, On remarque une diminution de 10 C° (de 40 C° à 5 C°) de la température de la virole, en été la température ambiante est élevée 40 c , donc la température extérieur de la virole monte au 440 c , contrairement à l'hiver, la température ambiante est basse 5 c , par conséquent la température extérieur de la virole tombe à 350 c .

5 Virole refroidis avec jet d'eau :

Dans le but de déterminer l'effet de l'eau de refroidissement sur la température de la virole de four rotatif, ce cas d'étude de travail fait partie à l'analyse thermique d'une coupe partielle de virole représentée dans la figure IV.8. La figure IV.8 montre la même géométrie de la virole de four rotatif étudié dans le cas de l'air, elle est munie de plusieurs injecteurs d'eau de 1m de longueur, 50cm de largeur, et 15 cm de la hauteur devisés dans la partie cuisson le long de la virole. On a pris le même coupe partielle du four rotatif de 5 m de diamètre et 2 m de longueur et faite une symétrie le long du four, pour facilite la simulation et ne prend pas beaucoup de temps dans les calculs. (La figure IV.10). On a pris les mêmes conditions aux limites celle de réel modèle pour déduire l'effet de jet d'eau sur la température de la virole.

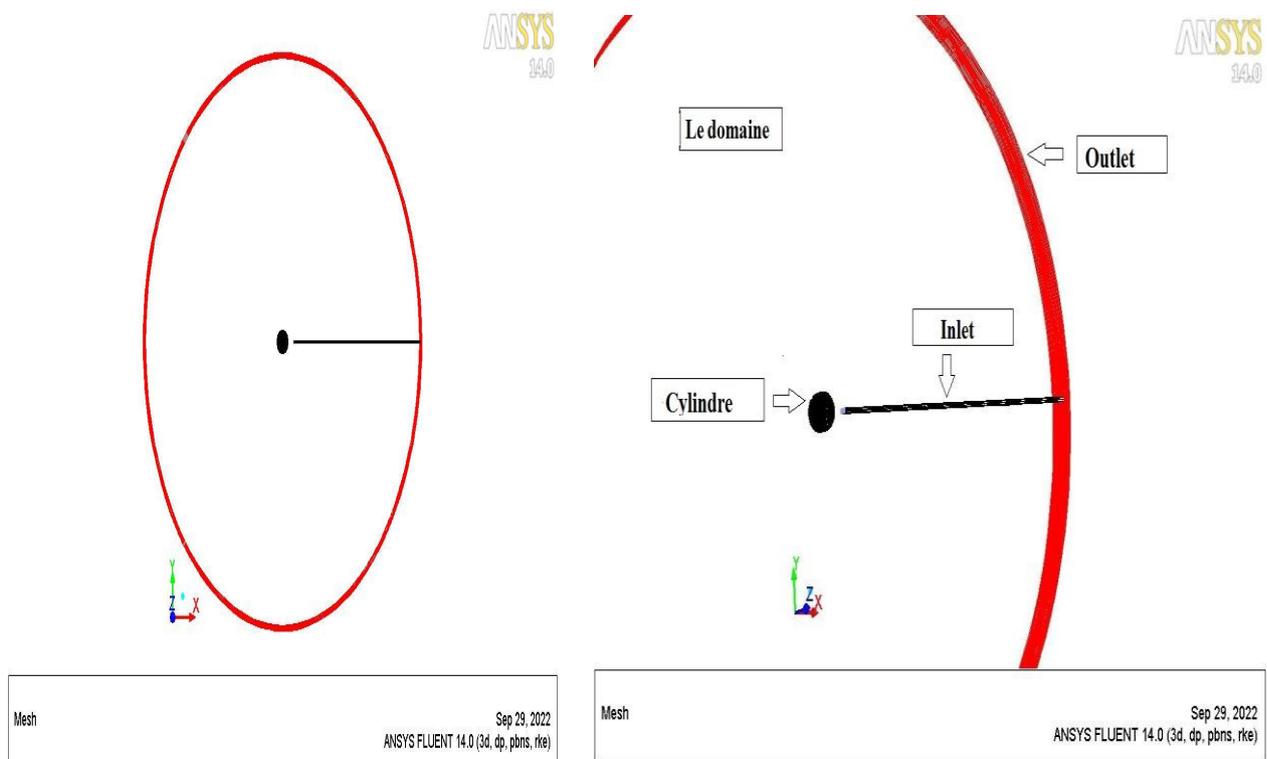


Figure IV.10 : Géométrie de Four avec injecteur d'eau.

5.1 Distribution de température :

Figure IV.11 montre la distribution de température autour la virole de four rotatif. On constate que la température diminue brusquement après l'injection de l'eau à la virole.

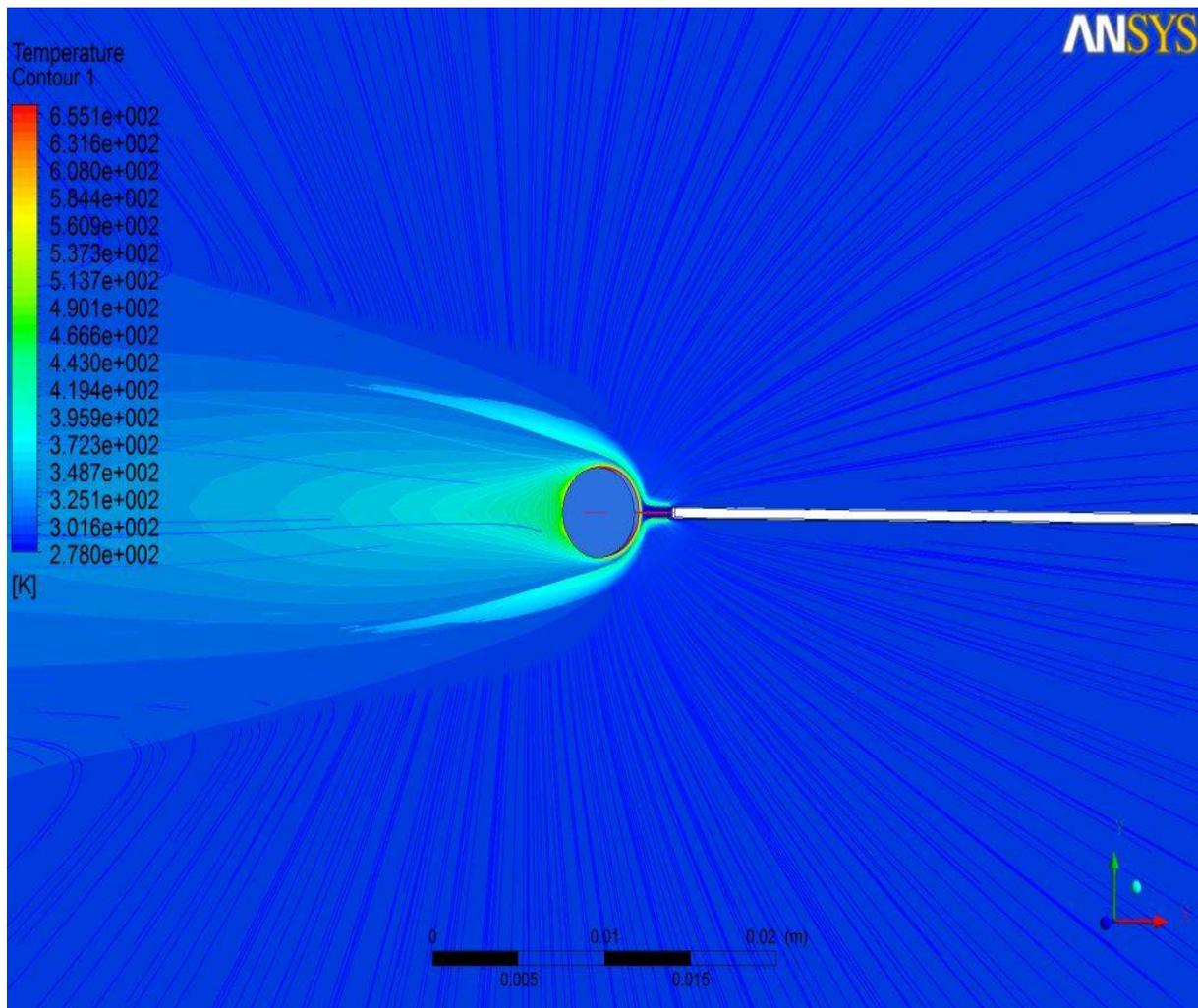


Figure IV.11 : contour de température de virole avec injection d'eau.

5.2 Distribution des lignes de vitesse d'eau :

La distribution des lignes de vitesse d'eau est représentée dans la figure IV.12. On remarque que la collision des particules d'eau avec le four rotatif provoque une augmentation de la vitesse à l'amant de la virole, on observe aussi l'apparition des vortex plus nombreux que celle de virole refroidis avec l'air, ces vortex proviennent de la turbulence de l'écoulement derrière de la virole.

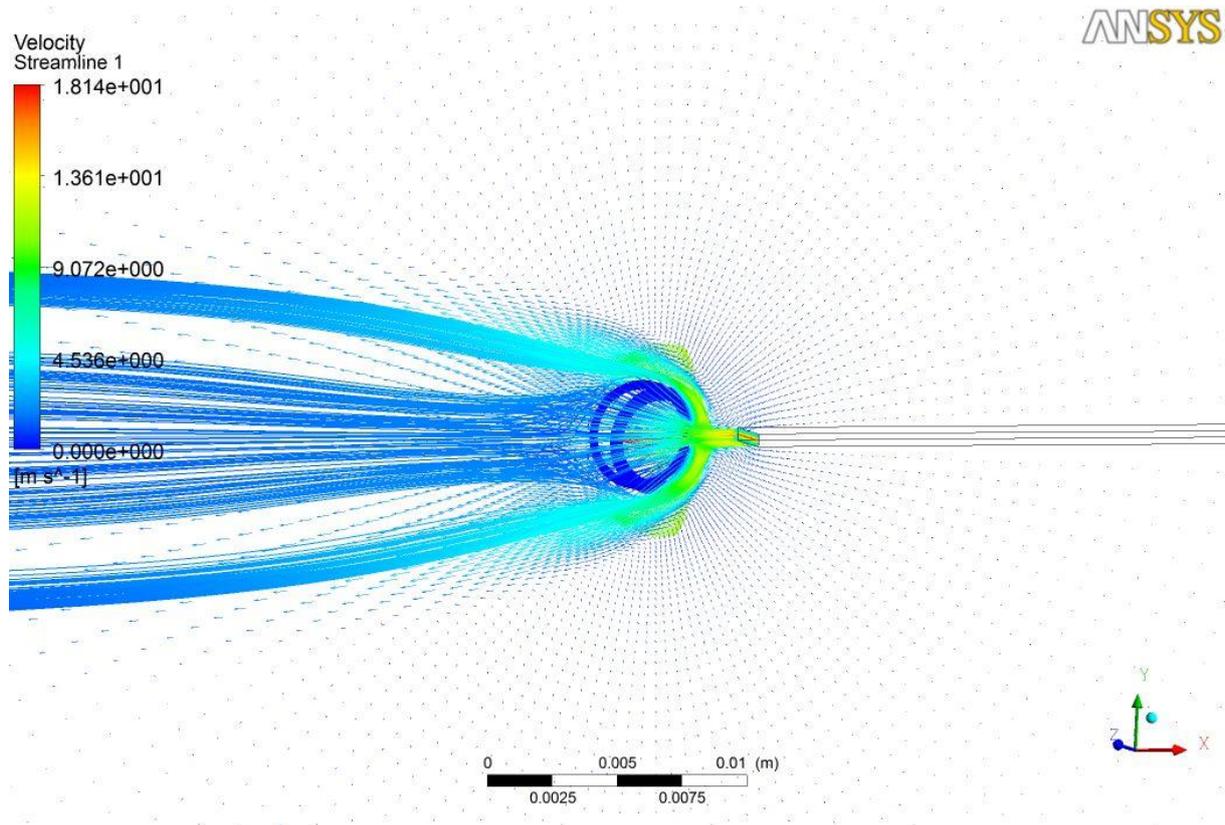


Figure IV.12 : Contour de vitesse de la virole avec l'injection d'eau.

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

- **Variation de la vitesse d'injection d'eau :**

Pour les mêmes conditions de cas de la virole refroidi avec l'air. Trois essais ont été effectués pour déduire la valeur maximale de température extérieure de la virole.

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

Vitesse d'eau (m/s)	18	28	38
Température extérieur de la virole (°C)	350	330	310

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

La figure IV.13 montre la variation de la température de la virole en fonction de différentes vitesses d'injection d'eau. Les profils de température ont la même tendance due à la position de ligne d'extraction des résultats.

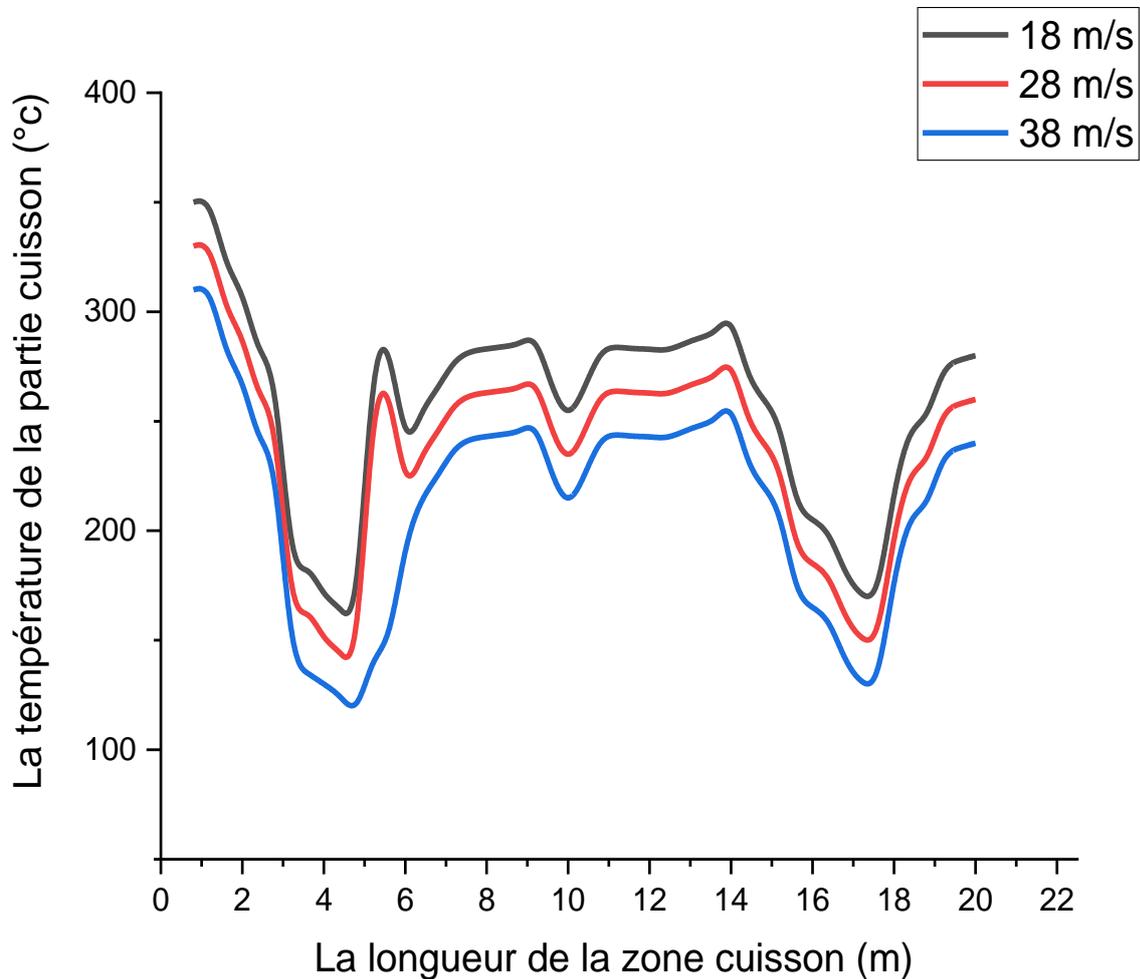


Figure IV.13 : la température de la virole en fonction des vitesses d'injection d'eau.

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

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'air chaud du brûleur sur la température extérieure de la virole du four rotatif.

Température intérieure du four (C°)	1115	1300	1450
Température extérieur de la virole (°C)	300	350	450

Tableau IV.4 : la variation de la température extérieure de virole en fonction de température intérieur du four.

La figure IV.14 représente la variation de la température extérieure de la virole en fonction de température intérieure du four. On remarque que lorsque la température intérieure du four augmente de (1150°C à 1450°C), la température de la virole augmente en parallèle de (350°C à 450°C)

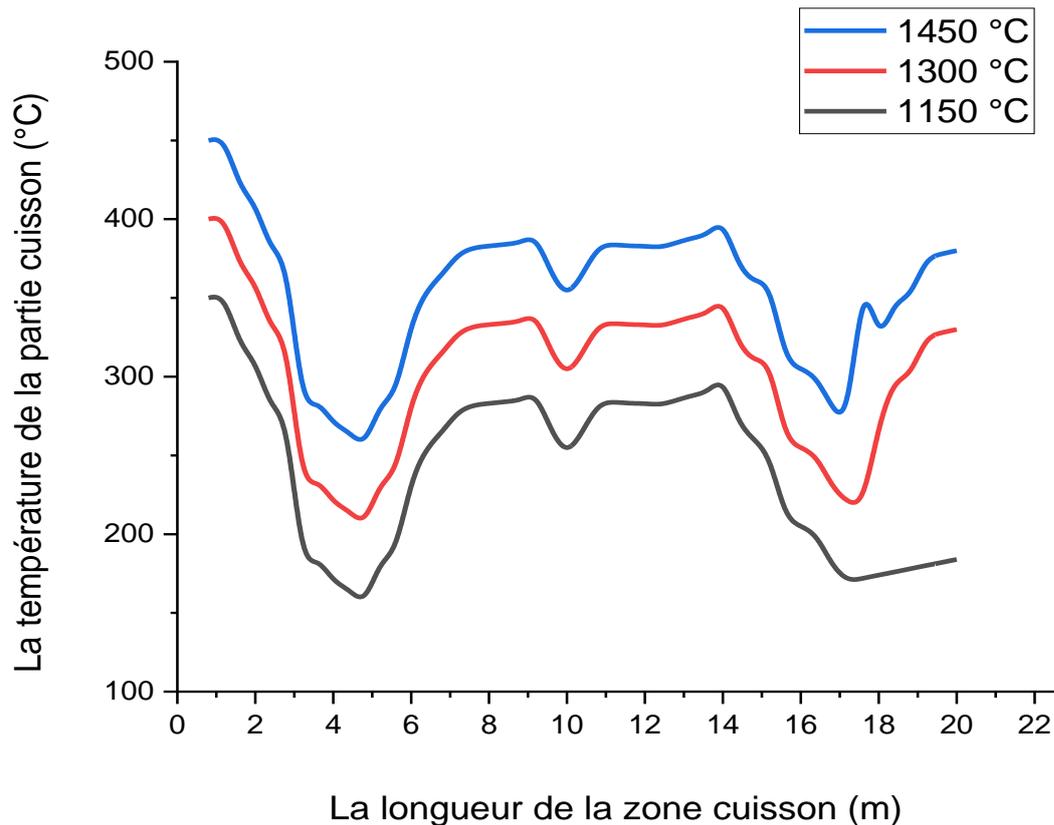


Figure IV.14 : la variation de la température extérieure de virole en fonction température intérieur du four.

- **Variation de température d'air ambiant :**

Dans cette partie, on a voulu savoir l'effet de la variation de la température d'air ambiant de l'environnement sur la température extérieure de la virole du four rotatif.

La figure IV.15 représente la variation de la température extérieure de la virole en fonction de température d'air ambiant, On remarque une diminution de 25 C° (de 40°C à 5°C) de la température de la virole, en été la température ambiante est élevée 40°C, donc la température extérieur de la virole monte au 410°C, contrairement à l'hiver, la température ambiante est basse 5°C, par conséquent la température extérieur de la virole tombe à 325°C.

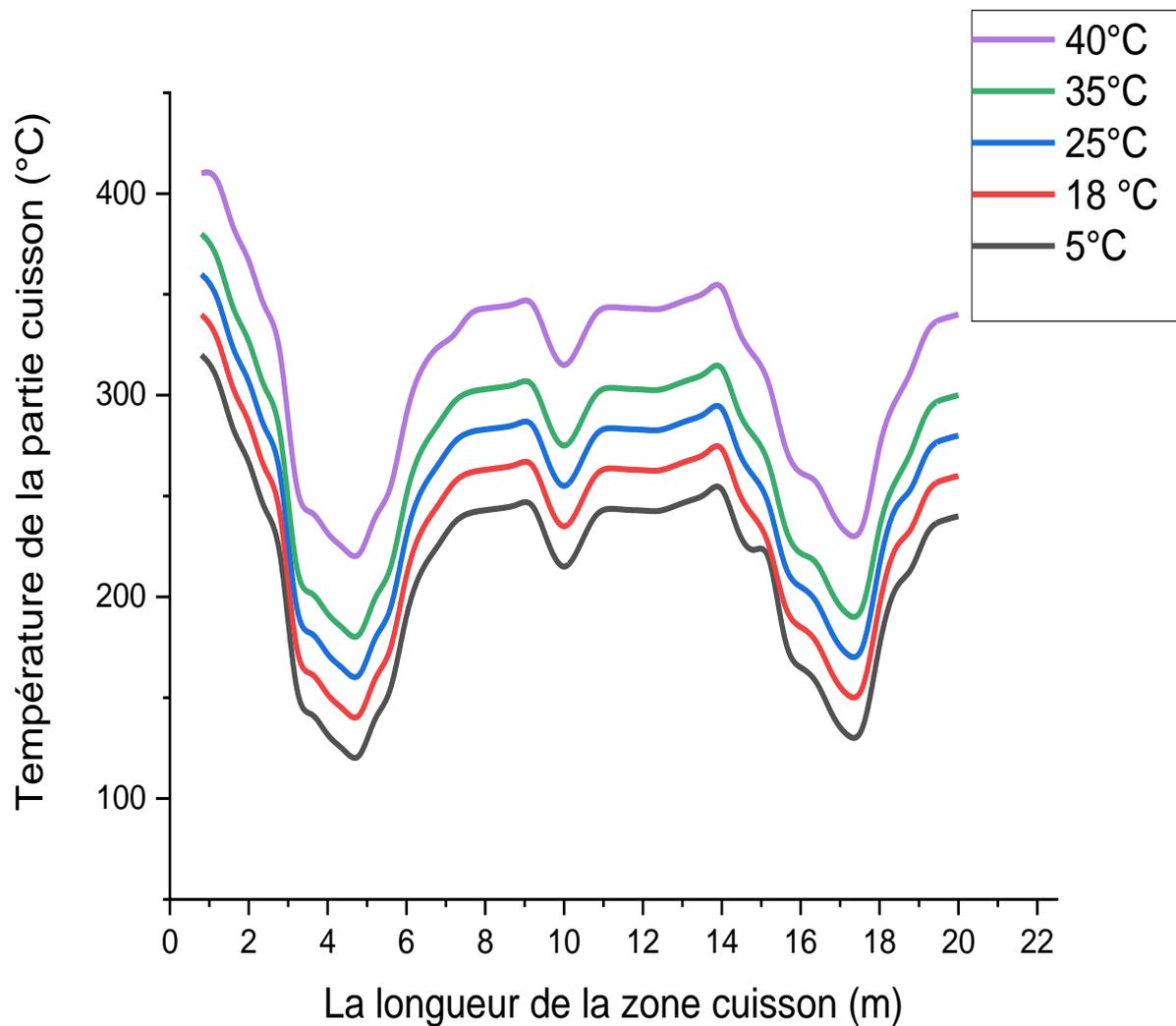


Figure IV.15 : variation de température extérieure de la virole en fonction de la température d'air ambiant

6 Comparaison entre injection d'air et injection d'eau :

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

- **La température de la virole avec injecteur d'eau :**

Nous avons effectué une comparaison de l'évolution de la température extérieure de la virole dans les deux cas : une virole refroidis par l'air et une virole refroidis par l'injection d'eau. La figure IV.16 représente l'évolution de la température des deux cas cités précédemment. On

remarque que l'insertion des injecteurs d'eau provoque une diminution de la température de la virole, elle diminue 52 C° dans le point critique de (de 370°C à 318 °C).

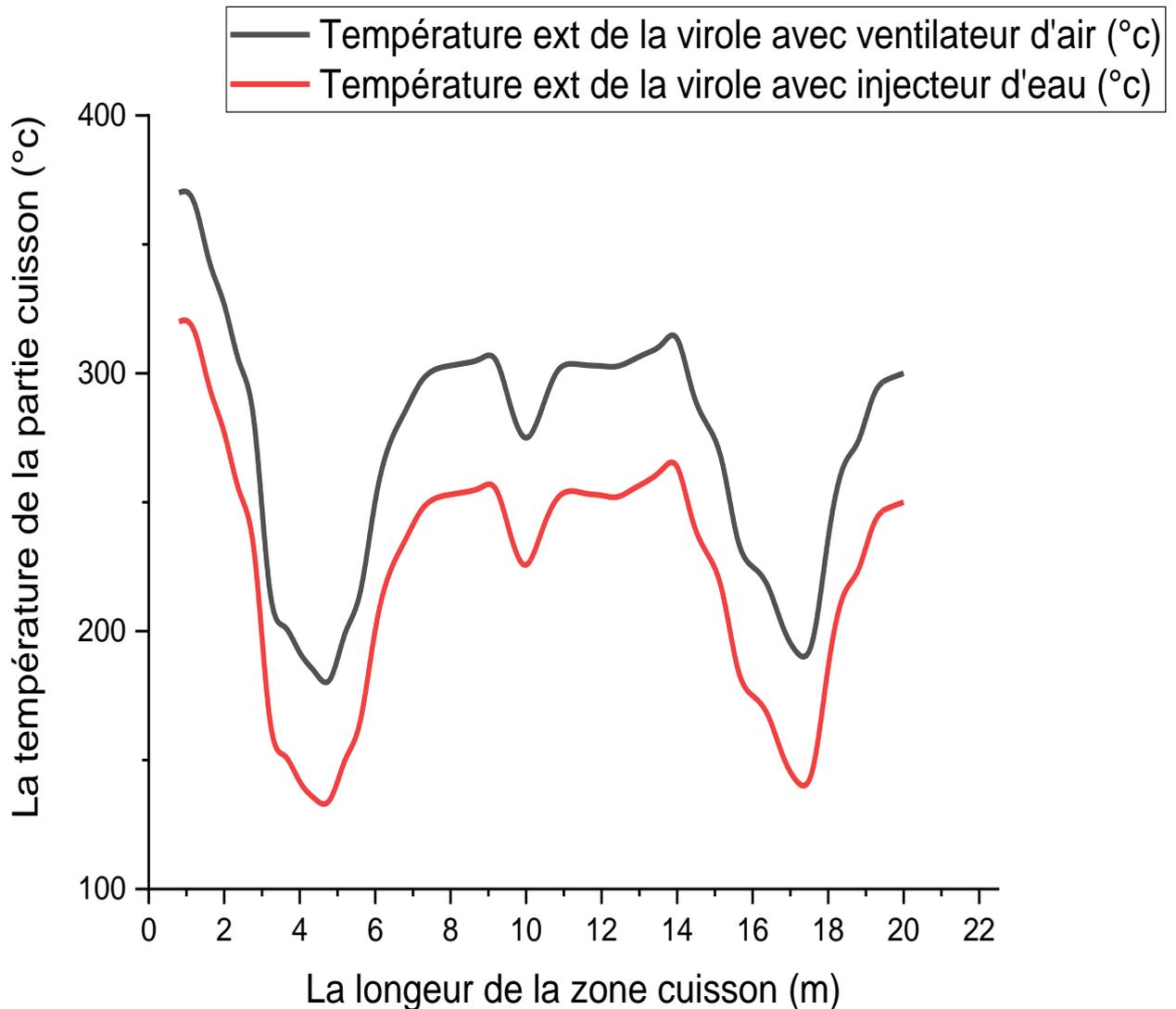


Figure IV.16 : La comparaison entre la température extérieure de la virole et la température extérieure de la virole avec injection d'eau

- **La température extérieure en fonction de la vitesse moyenne d'air et eau :**

La figure IV.17 représente l'évolution de la température extérieure de la virole des deux cas cités précédemment. On remarque que l'insertion des injecteurs d'eau provoque une diminution de la température extérieure de la virole, elle diminue 52 C° dans le point critique de (de 370°C à 318 °C).

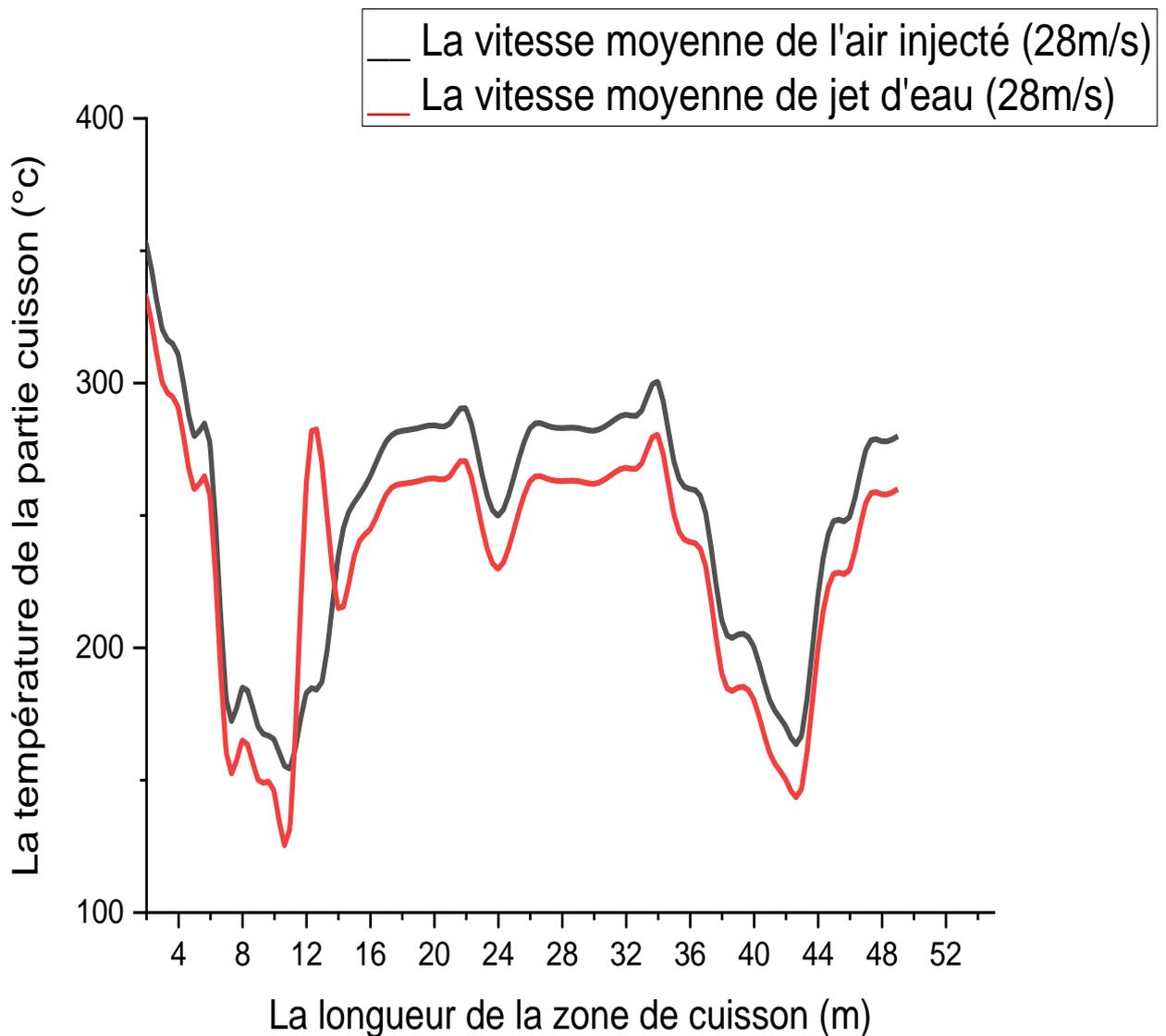


Figure IV.17 : La comparaison entre la température extérieure de la virole en fonction de la vitesse moyenne de l'air injecté et l'eau injecté.

- **La température extérieure de la virole en fonction de la température intérieure moyenne du four refroidis par l'air et refroidis par l'eau :**

La figure IV.18 représente l'évolution de la température extérieure de la virole des deux cas cités précédemment. On remarque que l'insertion des injecteurs d'eau provoque une faible diminution de la température extérieure de la virole, elle diminue 15 C° dans le point critique de (470°C à 460 °C) dans les premiers mètres de partie cuisson et de (370°C à 358°C) au milieu et de (280°C à 270°C) à la fin de la partie cuisson.

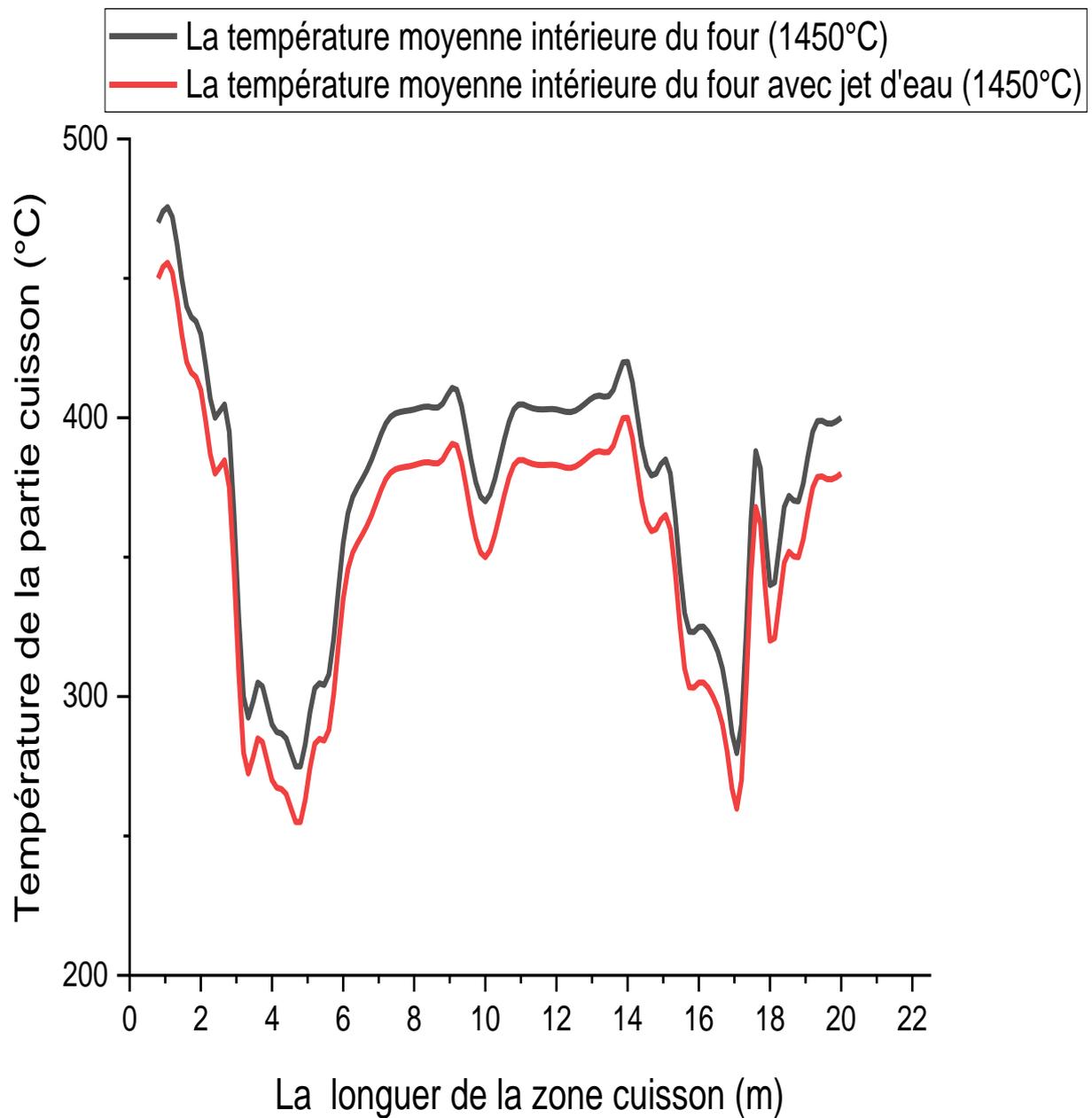


Figure IV.18 : La comparaison entre la température extérieure de la virole en fonction de température intérieure moyenne du deux cas l'air et l'eau injectée.

- **La température extérieure de la virole en fonction de la température moyenne de l'air ambiant du four refroidis par l'air et refroidis par l'eau :**

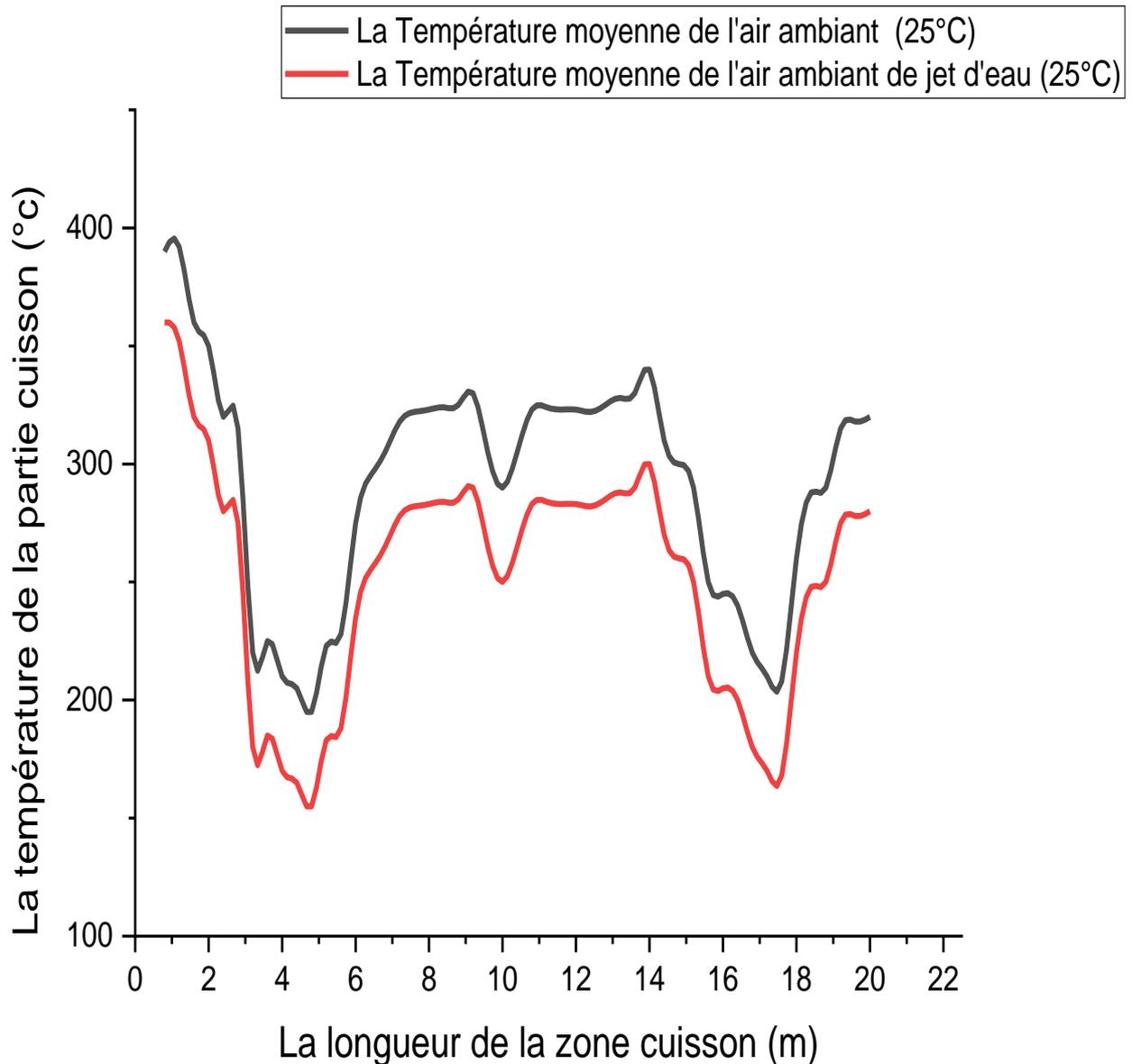


Figure IV.19 : La comparaison entre la température extérieure de la virole en fonction de température ambiante moyenne du four rotatif refroidis par l'air et l'eau.

La figure IV.19 représente l'évolution de la température extérieure de la virole des deux cas cités précédemment. On remarque que l'insertion des injecteurs d'eau provoque une faible diminution de la température extérieure de la virole, elle diminue 25 C° dans le point critique de (390°C à 365°C) dans les premier mètres de partie cuisson et de (280°C à 355°C) au milieu et de (210°C à 185°C) à la fin du partie cuisson.

7 Conclusion :

L'augmentation de la vitesse d'injection d'air provoque une diminution de la température de la virole de (25 °C), ainsi la température l'intérieur du four démunissions (40 °C) de la température de la virole mais la vitesse d'air de l'environnement influence juste (15 °C) de la température de virole. L'insertion des injecteurs d'eau sur la virole contribuée par une diminution considérable de la température de la virole (une nette diminution de 52 C° de 370 °C à 318 °C). Cependant, L'augmentation de la vitesse d'injection d'eau n'a pas un effet important sur la température de la virole. Donc les injecteurs d'eau provoquent un refroidissement très important et satisfait de la virole.

Partie bibliographie :

X.YANG et al [27] Selon la structure du four et les caractéristiques de mouvement des matériaux, le modèle de conduction de chaleur transitoire du lit de matériau et le modèle de transfert de chaleur de contact à l'interface de la paroi couverte du four et du lit de matériau sont construits. Compte tenu de leur contribution au transfert de chaleur par convection du lit de matériau, le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi couverte du four et le lit de matériau est proposé, et sa formule est obtenue, avec lequel le transfert de chaleur convectif entre la paroi couverte du four et le lit de matériau peut être calculé de manière pratique, de sorte que la prédiction de transfert de chaleur dans le four rotatif peut être effectuée plus facilement.

A. Agrawal et al [28] a présenté un modèle de calcul de transfert de chaleur d'un four rotatif utilisé pour la production de dioxyde de titane rutilé par calcination de dioxyde de titane hydraté pâteux. Les travaux détaillent la modélisation de plusieurs réactions chimiques survenant dans la région du lit solide ainsi que la convection turbulente

du gaz, l'échange de chaleur de rayonnement entre le gaz chaud, la paroi réfractaire et la surface solide, et la conduction dans la paroi réfractaire.

Des techniques de différence finies sont utilisées et les conditions thermiques stationnaires sont supposées. Le four est divisé en segments axiaux de longueur égale. La solution est de type va et viens de l'entrée solide à la sortie solide. La direction du flux de gaz est opposée à celle des solides. Le bilan massique de chaque espèce dans la charge solide, et le bilan massique et énergétique du solide et du gaz dans un segment axial sont utilisés pour obtenir les températures des solides et des gaz, et la concentration des espèces à la sortie de ce segment. Les données de sortie comprennent la distribution de la température de la paroi réfractaire, les profils de température des solides axiaux et des gaz, le profil de composition des solides axiaux, la longueur requise pour le séchage de la charge solide et la longueur totale du four nécessaire pour obtenir une conversion de 98 % de l'anatase TiO_2 en rutilé TiO_2 . Une étude paramétrique détaillée portant sur les paramètres de contrôle, tels que le pourcentage de contenu en eau (par rapport aux solides secs), le débit de solides, le débit de gaz, l'angle d'inclinaison du four et la vitesse de rotation du four, a permis d'obtenir une bonne connaissance physique du rutilé-Procédé de production TiO_2 dans un four rotatif.

M. Gradeck et al [29] ont supervisé l'expérience suivante : chauffer un cylindre chauffé (en rotation) à 500-600 °C, puis le refroidir avec un jet d'eau plat Collision avec une droite parallèle à l'axe de symétrie.

La température de la paroi en fonction du temps a été mesurée L'utilisation de thermocouples en ligne et le flux thermique de paroi correspondant ont été estimés par Méthode de livraison inversée. Dans cet article récent, ils ont montré que les vitesses de refroidissement dépendent du sous-refroidisseur, La température de l'avion, la vitesse de l'avion et le rapport de vitesse d'une surface à un avion. Depuis la température initiale La température du cylindre était supérieure à celle de Leidenfrost, ils ont observé tous les systèmes d'ébullition De l'ébullition pelliculaire à l'ébullition basique.

Cet article vise d'abord à décrire les conditions actuelles C'est dans l'établi des laminoirs à chaud, et d'autre part pour le bilan d'expérience principal Des études de refroidissement par jet qui ont conduit à la modélisation du transfert de chaleur dans des conditions d'ébullition et enfin Proposez de nouveaux liens en tenant compte de la vitesse du mur.

W.Mohammed Abed et al [30] ont analysé Le transfert de chaleur par convection naturelle dans une région bidimensionnelle formée par un tube plat horizontal à flux thermique constant situé concentriquement dans un cylindre horizontal refroidi est étudié numériquement. Le modèle a été résolu à l'aide du progiciel FLUENT CFD. Les simulations numériques ont couvert une gamme de rapports de rayon hydraulique (5, 7.5, et 10) à des angles d'orientation de (0° à 90°). Les résultats ont montré que le nombre moyen de Nusselt augmente avec le rapport de rayon hydraulique, les angles d'orientation et le nombre de Rayleigh. De même, le taux d'augmentation du nombre de Nusselt pour un angle d'orientation de 90° et un rapport de rayon hydraulique de 7,5 est égal à 24,87%. Les caractéristiques de l'écoulement du fluide et du transfert de chaleur pour différents cas sont illustrées par les vecteurs de vitesse et les contours de température obtenus à partir du code CFD. Les résultats pour les nombres de Nusselt moyens sont comparés aux travaux précédents et montrent un bon accord.

D. Shi et al [31] ont élaboré que les écoulements granulaires lents ont fait l'objet de recherches actives ces dernières années, le transfert de chaleur dans les systèmes particuliers en écoulement a reçu relativement peu d'attention. Ils ont utilisé une technique de calcul qui combine la méthode des éléments discrets (DEM), la dynamique des fluides numérique (CFD) et les calculs de transfert de chaleur pour simuler un transfert de chaleur réaliste dans un four rotatif. Pour maintenir la simplicité, tout en simulant le four cylindrique, ils ont utilisé une grille non uniforme dans notre code. Différents matériaux, tailles de particules et vitesses de rotation sont utilisés pour suivre la transition entre un transfert de chaleur dominé par la convection et un transfert de chaleur dominé par la conduction. Aux faibles conductivités des particules, le

transfert de chaleur est dominé par la conduction gaz-solide ; cependant, aux conductivités plus élevées des particules, la conduction solide-solide joue un rôle plus important. De plus, nos résultats suggèrent que le taux de changement de la température moyenne du lit peut présenter une transition lorsque la conductivité du milieu interstitiel est augmentée.

Lorsque les taux de transport interstitiel sont faibles, comme dans le vide, les particules à haute conductivité et à haute capacité thermique sont chauffées plus rapidement, mais lorsque les coefficients de transport interstitiel augmentent, les matériaux à faible capacité thermique peuvent être chauffés plus rapidement malgré des valeurs de conductivité plus faibles.

H.Liu et al [32] ont présenté Une approche à deux fluides et divers modèles de transfert de chaleur est appliquée à une section transversale bidimensionnelle d'un four rotatif couplée à la théorie cinétique de l'écoulement granulaire, qui traite le mouvement granulaire aléatoire comme un mouvement moléculaire thermique. Les modèles sont validés par comparaison avec les données expérimentales disponibles.

Les résultats montrent que le pic caractéristique de la vitesse à la surface du lit est situé au centre et le long des bords. La température la plus élevée se trouve à la surface du lit et le gradient de température dans le lit est inférieur à celui de la paroi du four rotatif. Les principaux facteurs qui affectent la distribution de la température sont la température initiale du gaz et la vitesse de rotation du four.

Dr. R. K. Patil [33] a réalisé une comparaison des géométries (cylindrique et rectangulaire) pour différents angles d'inclinaison avec le même diamètre hydraulique. La convection naturelle est un mécanisme de transport de la chaleur, dans lequel le mouvement du fluide se fait naturellement, sans source externe. Le gradient de température se produit en raison de la différence de densité. La convection forcée est un mécanisme de transport de la chaleur dans lequel le fluide est déplacé par une source externe. C'est l'un des mécanismes de transfert de chaleur les plus importants, dans lequel des quantités maximales d'énergie thermique peuvent être transférées très efficacement. Nous comparons en calculant le coefficient de transfert de chaleur moyen et le nombre de Nusselt pour les deux géométries, pour l'angle d'inclinaison (c'est-à-dire 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°). Il est conclu que le nombre de Nusselt moyen, pour les angles (15° , 30° , 60° , 75° , 90°) montre le taux de chaleur maximum pour la section d'essai cylindrique et pour l'angle (45°) montre le taux de chaleur maximum pour la section d'essai carrée et aussi nous avons trouvé que le taux de coefficient de transfert de chaleur augmente avec l'angle d'inclinaison dans les deux cas.

Luo. Li et al [34] ont proposé un nouveau système thermoélectrique de récupération de la chaleur résiduelle pour réduire les pertes de chaleur des fours rotatifs à ciment.

Ce système est configuré comme un ensemble d'unités de production thermoélectrique disposées longitudinalement sur une coque coaxiale secondaire avec le four rotatif. Ainsi, un modèle mathématique a été élaboré pour l'estimation de la performance de la récupération de la chaleur résiduelle. Les résultats de la simulation montrent qu'avec un four rotatif à ciment ϕ 4,8 x 72 m à titre d'exemple, une production d'électricité d'environ 211 kW peut-en économiser 3283 kW d'énergie en perte de chaleur en utilisant un système de récupération d'énergie thermique hybride Bi₂Te₃. Par rapport au four sans système de récupération thermoélectrique, plus de 32,85% de la chaleur résiduelle est économisée de la surface du four. La contribution de la production thermoélectrique est d'environ 2%.

Sachant que le four rotatif à ciment est l'équipement crucial utilisé pour la production de ciment. Environ 10 à 15 % de l'énergie consommée dans la production du clinker de ciment est directement dissipée dans l'atmosphère à travers la surface externe du four rotatif.

Q.Fenglei et al [35] ont démontré que le transfert de chaleur dans les écoulements granulaires joue un rôle important dans le traitement des matériaux particuliers tels que la production alimentaire, les produits pharmaceutiques et la production d'énergie bio-renouvelable. Une meilleure compréhension de la thermodynamique dans les écoulements granulaires est essentielle pour la conception des équipements et le contrôle de la qualité des produits. Dans cette recherche, ils ont développé un modèle de transfert de chaleur à l'échelle des particules dans le cadre de la méthode traditionnelle des éléments discrets (DEM), qui prend en compte le transfert de chaleur par conduction et le transfert de chaleur par rayonnement entre les particules. Un modèle de transfert thermique particule-paroi a également été proposé pour résoudre le transfert thermique conductif et radiatif particule-paroi. Le modèle DEM thermique développé a été validé en modélisant le transfert de chaleur dans des lits tassés et en comparant les prédictions de simulation avec les mesures expérimentales. Le modèle DEM thermique a été appliqué avec succès à la simulation du transfert de chaleur dans des flux granulaires à composants binaires dans un réacteur à double vis conçu pour la pyrolyse rapide de la biomasse afin de mieux comprendre le transfert de chaleur dans le système.

L'existence d'oscillations de température à la fois spatiales et temporelles est observée dans le réacteur à double vis. Les effets des conditions de fonctionnement sur le profil de température moyen, la distribution de probabilité de la température des particules de biomasse, le flux de chaleur et le coefficient de transfert de chaleur sont analysés. Les résultats indiquent que les voies de transfert de chaleur par conduction particule-fluide-particule sont les principaux contributeurs au flux thermique total, qui représente environ 70 à 80 % du flux thermique total. Le transfert de chaleur radiatif contribue pour 14 à 26 % au flux thermique total et le transfert de chaleur par conduction à travers la surface de contact ne représente que 1 à 5 % du flux

thermique total. Le coefficient de transfert de chaleur total dans le réacteur à double vis est également rapporté. Varie de 70 à 110W/ (m² - K) en fonction des conditions de fonctionnement.

G. Rodríguez et al [36] ont présenté une méthodologie pour obtenir les zones de transfert de chaleur d'un réacteur à tambour rotatif en présence de chicanes sont déterminées. Différents flux de solides sont évalués entre 3,4 et 7,6 g / s, et deux vitesses de rotation, et 14,7 et 11,6 mpr.

Depuis l'imagerie du profil du réacteur à tambour rotatif, une procédure mathématique pour étudier l'influence de ces variables sur la valeur des surfaces de transfert de gaz des zones de transfert et de la chaleur de la paroi solide est proposée. Les résultats montrent que, dans le cas d'une paroi de contact solide, en augmentant le flux entrant de solides dans le réacteur, la valeur de la surface de transfert de gaz est plus élevée. Solides dans le réacteur, l'angle augmente, il y a une relation directe. De plus, ils ont observé que les angles de contact sont plus grands lorsque la vitesse de rotation augmente pour les mêmes valeurs de débit étudiées. Un effet opposé est observé dans le cas de la paroi gazeuse.

J. P. GOROG et al [37] ont modélisé mathématiquement le flux de chaleur dans la zone de flamme d'un four rotatif à chauffage direct. La flamme a été supposée être de forme cylindrique, mélangée radialement et se déplaçant axialement dans un écoulement piston.

Le site longueur de la flamme et le taux d'entraînement de l'air secondaire ont été caractérisés par des équations empiriques publiées dans la littérature. Ils ont montré que la composante axiale du rayonnement peut être raisonnablement négligée puisqu'elle est relativement faible par rapport à la composante radiale.

Le modèle unidimensionnel qui en résulte modèle unidimensionnel résultant est capable de prédire les profils axiaux de température de la flamme et de la paroi, ainsi que les profils axiaux du flux de chaleur vers le lit de solides et la paroi réfractaire.

Le modèle a été utilisé pour étudier l'influence des variables suivantes sur le flux de chaleur vers le lit : type de combustible (fuel, gaz naturel, gaz de Le modèle a été utilisé pour étudier l'influence sur le flux de chaleur vers le lit des variables suivantes : type de combustible (fuel, gaz naturel, gaz de production), taux d'allumage, température de l'air secondaire, air primaire et enrichissement en oxygène. Parmi les trois combustibles, la combustion du fuel donne la flamme la plus longue et l'apport de chaleur le plus important aux solides de la zone de la flamme. L'augmentation de la température de l'air secondaire accroît la longueur de la flamme de manière significative. Mais n'a qu'un faible effet sur la température maximale de la flamme et le flux de chaleur vers les solides. L'augmentation du pourcentage d'air primaire diminue la longueur de la flamme et augmente les valeurs maximales de la température de la flamme et du

flux thermique des solides, mais réduit la quantité de chaleur émise par les solides dans la zone de la flamme. L'enrichissement en oxygène entraîne une flamme plus courte, une température de flamme maximale plus élevée et une augmentation de la chaleur transférée aux solides dans la zone de la flamme.

A. Agrawal et al [38] ont présenté un modèle de calcul de transfert de chaleur d'un four rotatif utilisé pour la production de dioxyde de titane rutil par calcination de dioxyde de titane hydraté pâteux. Les travaux détaillent la modélisation de plusieurs réactions chimiques survenant dans la région du lit solide ainsi que la convection turbulente du gaz, l'échange de chaleur de rayonnement entre le gaz chaud, la paroi réfractaire et la surface solide, et la conduction dans la paroi réfractaire.

Des techniques de différence finies sont utilisées et les conditions thermiques stationnaires sont supposées. Le four est divisé en segments axiaux de longueur égale. La solution est de type va et viens de l'entrée solide à la sortie solide. La direction du flux de gaz est opposée à celle des solides. Le bilan massique de chaque espèce dans la charge solide, et le bilan massique et énergétique du solide et du gaz dans un segment axial sont utilisés pour obtenir les températures des solides et des gaz, et la concentration des espèces à la sortie de ce segment. Les données de sortie comprennent la distribution de la température de la paroi réfractaire, les profils de température des solides axiaux et des gaz, le profil de composition des solides axiaux, la longueur requise pour le séchage de la charge solide et la longueur totale du four nécessaire pour obtenir une conversion de 98 % de l'anatase TiO_2 en rutil TiO_2 . Une étude paramétrique détaillée portant sur les paramètres de contrôle, tels que le pourcentage de contenu en eau (par rapport aux solides secs), le débit de solides, le débit de gaz, l'angle d'inclinaison du four et la vitesse de rotation du four, a permis d'obtenir une bonne connaissance physique du rutil-Procédé de production TiO_2 dans un four rotatif.

J.P. GOROG et al [39] ont développé Un modèle mathématique pour déterminer la distribution de la température dans la paroi d'un four rotatif. Le modèle, qui incorpore une formulation détaillée des coefficients de transfert de chaleur radiatif et convectif dans un four, a été utilisé pour examiner l'effet de différentes variables du four sur le transfert de chaleur régénératif et global vers les solides.

Les variables comprennent la vitesse de rotation, le chargement en pourcentage, la température des gaz et des solides, l'émissivité de la paroi et des solides, les coefficients de transfert de chaleur par convection au niveau de la paroi exposée et de la paroi couverte, et la diffusivité thermique de la paroi. Le modèle montre que le flux de chaleur régénératif est le plus important dans la partie froide d'un four rotatif, mais qu'en général, la distribution de la température et les flux de chaleur sont les mêmes. Mais en général, la distribution de la

température et les flux de chaleur sont largement indépendants de ces variables. Grâce à cette insensibilité, il a été possible de simplifier le modèle à l'aide d'un analogue résistif.

Les calculs présentés indiquent que la perte de l'enveloppe et le flux de chaleur total vers le lit peuvent être estimés à 5 % près en utilisant ce modèle simplifié.

G.D Silcox et al [40] ont développé Un modèle mathématique du transfert de chaleur dans un four rotatif à combustion directe et utilisé pour examiner les effets des paramètres de fonctionnement et de conception sur la température de charge. Le modèle comprend un modèle de rayonnement de longueur moyenne du faisceau et un zonage axial. Le transfert de chaleur par conduction et par convection est également inclus. Le rayonnement entre les zones immédiatement adjacentes est autorisé. Le calcul des flux de chaleur est facilité par l'utilisation d'un schéma électrique analogique. Une procédure de solution itérative est adoptée pour résoudre les équations du bilan énergétique. Aux conditions examinées, le modèle prédit que le regroupement de flux de gaz et de flux solides entraîne des températures de charge moyennes plus élevées que celles des flux à contre-courant. Le niveau d'humidité de l'alimentation devrait être un paramètre de fonctionnement clé. Les effets de la longueur du four, du temps de résidence, de la cadence de combustion et de la longueur de la flamme sont également examinés.

P. GOROG et al [41] ont étudié le transfert radiatif de chaleur entre un gaz de franc-bord non gris et les surfaces intérieures d'un four rotatif en évaluant les intégrales fondamentales de l'échange radiatif à l'aide de méthodes numériques. L'échange direct entre le gaz et la surface, la réflexion du rayonnement du gaz par la paroi du four, et l'échange entre la paroi du four et les solides ont été considérés. Des représentations graphiques des résultats ont été développées pour faciliter la détermination de la longueur moyenne du faisceau de gaz et du flux thermique total vers la paroi et les solides.

Ces graphiques peuvent être utilisés pour tenir compte à la fois de la taille du four et du taux de remplissage des solides, ainsi que de la composition et de la température du gaz. Les calculs effectués à l'aide de ces tableaux et d'un mélange équimolaire CO₂-H₂O à 1110 K indiquent que l'échange gaz-surface est un phénomène très localisé. Le rayonnement vers un élément de surface à partir d'un gaz situé à plus d'un demi-diamètre du four est assez faible et, par conséquent, même de grands gradients axiaux de température du gaz ont un effet négligeable sur le flux thermique total. Des résultats sont également

Les résultats présentés montrent que l'énergie radiante réfléchie ou émise par un élément de surface est limitée à des régions situées à moins de 0,75 diamètre de four. Les intégrales d'échange radiatif ont été utilisées, ainsi qu'une méthode de réflexion modifiée, pour développer un modèle pour le flux thermique net d'un gaz non gris vers les solides et la paroi du four. Ce

modèle est comparé à un modèle simple de réseau résistif/gaz gris et il est démontré que des erreurs substantielles peuvent être encourues par l'utilisation des modèles simples.

A.I Nafsun et al [42] ont réalisé ce travail expérimental avec différents matériaux afin d'étudier l'influence des propriétés des matériaux sur le transfert de chaleur par contact. L'étude expérimentale du transfert de chaleur par conduction, entre la surface de la paroi couverte et le lit solide a été étudiée dans un tambour rotatif à chauffage indirect, avec un diamètre de $D=0.6$ m et une longueur de $L=0.45$ m.

Les profils de température du gaz, de la paroi du tambour et du lit solide ont été mesurés à l'aide de 16 thermocouples de type K, montés sur une tige rotative et une tige fixe attachées à l'intérieur du tambour. Ainsi, les profils de températures radiales et circonférentiels ont été mesurés, et les coefficients de transfert de chaleur par contact ont été calculés.

Les expériences ont été réalisées avec six matériaux différents sphères d'acier, de la poudre animale, du clinker de ciment, du sable de quartz, des billes de verre et de l'argile expansée. Ces matériaux ont des propriétés thermophysiques (densité, capacité thermique et conductivité thermique) et des propriétés parcellaires très différentes et le diamètre des particules.

Le paramètre de fonctionnement, la vitesse de rotation, varie entre 1 et 6 tours/minute pour évaluer l'influence de la vitesse de rotation sur le coefficient de transfert de chaleur par contact en plus des propriétés thermophysiques et le diamètre des particules.

Les coefficients de transfert de chaleur par contact mesurés ont été comparés à quatre approches la littérature. Un bon accord entre les mesures expérimentales et deux approches de modèle ont été obtenues.

W.-N. Wu et al [43] ont proposé des méthodes pour évaluer la perte de chaleur à travers la coque du four et ses facteurs d'influence, en utilisant un four à ciment industriel en Chine comme cas d'étude. Le calcul montre que la perte de chaleur journalière à travers la coquille du four dans la zone de calcination du four étudié est d'environ 140 GJ, et les pertes de chaleur par rayonnement et convection sont comparables, représentant 54 % et 46 %. Sachant que la calcination du clinker de ciment dans un four rotatif est un processus énergivore. Ainsi, la récupération de chaleur à partir de la surface de la coquille du four est un moyen potentiel d'améliorer l'efficacité énergétique pour rendre la production de ciment plus propre et plus durable.

A cet effet, cinq variables de fonctionnement principales qui influent grandement sur la perte de chaleur sont identifiées conjointement par le coefficient de corrélation Random, Forest et Pearson. Finalement, les résultats de ces travaux aideront les managers à se sensibiliser à l'amélioration de l'efficacité énergétique du système de four, les stratégies sont conçues de manière appropriée pour réduire la perte de chaleur par la coquille du four.

References

- [1] H. Henein, J.K. Brimacombe, A.P. Watkinson, "Experimental study of transverse bed motion in rotary kiln", *Metallurgical Transaction*, 14B, 1983 a, 191-205 132
- [2] H.Henein, J.K.Brimacombe, A.P.Watkinson, « The modeling of transverse solids motion in rotary kiln», *Metallurgical Transaction*, 14B, 1983b, 207-220
- [3] Heydenrych, M.D., Greeff, P., Heesink, A.B.M., Versteeg, G.F, « Mass transfer in rolling rotary kilns», a novel approach, *Chemical Engineering Science*, 57, 2002, 3851-3859
- [4] I.Janotka, Š.Kišš, VPapajová, « cement-based filler fixed between two geotextile layers (GCBL) for mechanical and corrosion protection of pipe-lines», NTCC 2005
- [5] Matrice emplois-expositions aux poussières alvéolaires de ciment Eléments techniques sur l'exposition professionnelle aux poussières de ciment, Disponible sur site www.invs.sante.fr.
- [6] Association Française de la connaissance et de l'application des normes, « Actualité technologique et scientifique, Les Ciments » disponible sur : www.Techno-Science.Net.
- [7] A.Agrawal, P.S.Ghoshdastidar, « Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln», Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, U.P. 208016, India
- [8] S.Arad, V.Arad and B.Bobora, «Advanced Control Schemes for Cement Fabrication Processes» ,*University of Petrosani, *Carpatcement Holding, Romania*
- [9] W. Zhou, W. Yan, S. Ma et al, « Degradation mechanisms of periclase-magnesium aluminate spinel refractory bricks used in the upper transition zone of a cement rotary kiln, *Construction and Building Materials*», <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121617>
- [10] « Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment ».
cemento_fr.pdf ; Étude publiée en mai 2008.
- [11] J.CENT.SOUTH UNIV.TECHNOL (VO.13 No.1) FEB.2006
ARTICLE ID: 1005-9784(2006)01-0075-05
CFD PREDICTION OF PHYSICAL FIELD MULTI-AIR CHANNEL
- [12] S.Haddaoui, «Mise en place de la maintenance conditionnelle et ameliorative du four rotatif de HOLCIM RAS EL MA », Mémoire de Master, Université de Sidi Med Ben Abdellah-Fès 2015.
- [13] S.Sadighi, M.Shirvani and A.Arshad; «Rotary Cement Kiln Coating Estimator: Integrated Modelling of Kiln with Shell Temperature Measurement», Chemical Engineering Department, University of Science and Technology, Narmak, Tehran, iran
- [14] C.L.MACEY,«Refractory solution for high Wear in cement kiln transition zones», Proceeding of UNITE CR'97, Nov. 4-7, 1997, New Orleans, USA, Vol.3, 1625-1631.

- [15] S.V.RADOVANOVIC, «The reactions between zirconia from MgO-ZrO₂ refractories and the compounds of Portland cement clinker»,
Proceedings of UNITECR'95, Nov. 19-22-1995, Kyoto, Japan, Vol. 1,224-232.
- [16] Phillips kiln services blog; « calculating cold gap using temperature differences»;
Wednesday, January 12.2012.
- [17] R.Patil et B.M.Shinde, «Design and Analysis of Rotary Kiln Tyre Rigging System Using FEA», International Engineering Research Journal Page No 768-775.
- [18] M.Ai-chun, J.Zhou, J.ping & W.xingLi ; « CFD prediction of physical field for multi-air channel pulverized coal burner in rotary kiln »; Journal of Central South University of Technology 13, pages75–79(2006).
- [19] B.Gilbert, A.Regnault, « Fours de cimenterie, FOUR ROTATIF », BE 8845 Editions techniques de l'ingénieur.
- [20] B. Gilbert, Alain Regnault « Fours de cimenterie, FOUR ROTATIF » BE 8845
- [21] I.Winarko ; « Ring and snow Ball formation in the kiln »; Dec03, 2016
- [22] S.Wirtz, C.Pieper, F.Buss, M.Schiemann, S.Schaefer, V.Scherer ; « Impact Of coating layers in rotary cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum», Thermal Science and Engineering Progress 15 (2020).
- [23] Wikimedia commons.2011, « The 27 products in the family of common cement », Consulté le 10/10/2013. URL http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Norme_EN-197-1-2000.pdf.
- [24] F.Kreith, W.Black, «basic heat transfer», Harper & Row, New York, USA,(1980).
S.Tscheng et A.Watkinson, « Convective heat transfer in a rotary kiln » (1979).
Canadian journal of Chemical Engineering, vol. 57, n° 4, p. 433-443.
- [25] J.Lyons, H.Min, P. Parisotet ,J. Paul, « Experimentation with a wet-process rotary cement kiln via the analog computer », Industrial & Engineering Chemistry Process design and development, vol. 1, n° 1, p. 29-33.(1962)
A.Sass, « Simulation of heat transfer phenomena in a rotary kiln » Industrial & Engineering Chemistry Process Design and development, vol.6, n°4, p.532-535. (1967).
G.Ketslakh et I.Tsibin, « Heat transfer by radiation in rotary kilns » Refractories, vol. 19, n°1-2, p 17-19, ISSN 00343102. (1978)
H.Hottel et A.Sarofin, « Radiative transfer », McGraw-Hill, Newyork, USA (1967).
- [26] J,Perron, « Modélisation mathématique d'un four de calcination du coke de pétrole», thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, Canada (1986).

- [27] X.YANG, Y.XIAO, X.LEI, G.CHEN, « Transfert de chaleur convectif entre la paroi couverte du four et le lit de matériau », *Advanced Materials Research Online* : **2013-09-10**
- [28] W.Kunyu, L.Jinbo, W.Peili, C.Lin, «Experimental and numerical studies on the air-side flow and heat transfer characteristics of a novel heat exchanger», *Applied Thermal Engineering* 123 (2017) 830–844.
- [29] M.Gradeck(a), A.Kouachi(a), J.L.Borean(b), P.Gardin(b), M.Lebouché(a) , «Heat transfer from a hot moving cylinder impinged by a planar sub cooled water jet»
a / LEMTA, Nancy University – CNRS, 2 avenue de la forêt de haye 54504, Vandoeuvre lès Nancy, France
b / AM Research, voie romaine 57283, Maizières lès Metz, France
- [30] W.M.Abed, A.J.Shareef, A.A.Najeeb, «Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Concentric Annulus between Outer Cylinder and Inner Flat Tube»,
(*Anbar Journal for Engineering Sciences*), University of Anbar /Engineering College - Mechanical Engineering Dept. Received on 11/5/2010 Accepted on: 8/12/2010
- [31] S.Deliang, W.L.Vargas, J.J. McCarthy, «Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases», Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15261, USA.
- [32] H.Liu (a), H.Yin (a), Ming Zhang(b), M.Xie (a), Xi Xi (a), «Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln».
a/ School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
b/ Ansteel Engineering Technology Corporation Limited, Anshan 114021, China
- [33] P.D. NEMADE, R.K.Patil, «Influence des différentes formes géométriques et de l'angle d'inclinaison sur le transfert de chaleur en convection naturelle».
Department of Mechanical Engineering, PVPIT, Bavdhan, Pune, India,
NOVATEUR PUBLICATIONS, *Journal NX- A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal*, ISSN No : 2581-4230, VOLUME 3, ISSUE 11, Nov. -2017
- [34] Luo, Li, Cai, Zhou, Tang, Zhai, and Zhang, M.Christopher, «Numerical Modelling of a Rotary Cement Kiln with External Shell Cooling Fans», *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 2016.
- [35] Q.Fenglei (a), M.M Wright(b), «Modélisation à l'échelle des particules du transfert de chaleur dans les écoulements granulaires dans un réacteur à double vis»,
a/ Faculty of Science, Technology and Communication, University of Luxembourg, Campus Kirchberg, 6 rue Coudenhove-Kalergi, L-1359, Luxembourg
b /Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa 50010, USA

- [36] I.B.Cortés(1), A.G.Rodríguez(2), L.B.Sánchez(1), F.P.Montenegro(3), «Détermination des zones de transfert de chaleur dans le réacteur à tambour rotatif»,
1/Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Cuba.
2/Universidad Central de las Villas, Martha Abreu, Villa Clara, Cuba.
3/Central Eléctrica 10 de octubre, Nuevitas, Camagüey, Cuba
E-mail: isnel.benites@reduc.edu.cu
Recibido: febrero del 2017 Aprobado: octubre del 2017
- [37] J.P.GOROG, T.N.ADAMS and J.K.BRIMACOMBE, Transfert de chaleur des flammes dans un four rotatif».
- [38] W.Kunyu, L.Jinbo, W.Peili, C.Lin, «Études expérimentales et numériques sur les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur côté air d'un nouvel échangeur de chaleur», Applied Thermal Engineering 123 (2017) 830–844.
- [39] J.P.GOROG, T.N.ADAMS, J.K.BRIMACOMBE, «Transfert de chaleur régénératif dans les fours rotatifs».
- [40] G.D.Silcox & D.W.Perching, «Les effets des conditions de fonctionnement et de la conception du four rotatif sur les taux de chauffage de charge déterminés par un modèle mathématique de transfert de chaleur du four rotatif»,
ISSN 1047-3289 *J. Air Waste Manage. Assoc.* 40: 337-344 (1990).
- [41] P.GOROG, J.K.BRIMACOMBE, T.N.ADAMS, «Transfert de chaleur radiative dans les fours rotatifs», METALLURGICAL TRANSACTIONS B,
ISSN 0360-2141/181/0311-0055500.75/0
@ 1981 AMERICAN SOCIETY FOR METALS AND
THE METALLURGICAL SOCIETY OF AIME
VOLUME 12B, MARCH 1981—55
- [42] A.I.Nafsun(1), F.Herz(1), E.Specht(1), V.Scherer(2) and S.Wirtz(2), «le transfert de chaleur de contact dans les fours rotatifs et l'effet de propriétés des matériaux».
1/Otto von Guericke University Magdeburg, 39106 Magdeburg, Germany
2/Ruhr University Bochum, 44780 Bochum, Germany
HEFAT 2014, 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 14 – 16 July 2014 Orlando, Florida.
- [43] M.Mirhosseini, A.Rezania, L.Rosendahl, «Optimisation énergétique et évaluation économique d'un système thermoélectrique de récupération de chaleur résiduelle autour d'un four à ciment rotatif», Journal of Cleaner Production 232 (2019).

- [44] D.JUGIEU, « Conception et réalisation d'une matrice de microéjecteur thermique adressable individuellement pour la fonctionnalisation de biopuce », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, mars 2005.
- [45] S.MURATET, « Conception, caractérisation et modélisation, Fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique », Thèse doctorat de l'Institut National des Sciences, Toulouse, Novembre 2005.
- [46] Y.Attou, « Etude numérique et thermique d'un écoulement turbulent dans un espace annulaire d'un rotor stator », Année (2018-2019).
- [47] J. Smagorinsky, « General circulation experiment with the primitive equations I. The basic experiment », Mon. Weather Rev .91 (3), pp. 99-164. (1963)
- [48] « ANSYS, INC : Actionnaires Dirigeants et Profil Société » [archive], sur www.zonebourse.com (consulté le 20 mars 2022)
- [49] « Software giant Ansys to acquire photonic simulation specialist Lumerical ». Optics.org. March 10, 2020. Retrieved May 30, 2018.
- [50] Fluent. April 2009, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, ANSYS Inc., Sections 18.1.1 and 18.1.2.

Conclusion générale :

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

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

Le fait que la température de la virole soit très élevée pose un problème. La solution proposée est une virole avec injecteurs d'eau, en effet cette solution a permis de diminuer considérablement la température de 52 C°.