

République Algérienne Démocratique et Populaire

*Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique*

UNIVERSITE KASDI MERBEH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention de diplôme de master
en génie mécanique**

Spécialité: Energétique

Présenté par :

BOUDOUH Fateh

Thème

***Evaluation et exploitation de la chaleur dégagée d'un four
de boulangerie pour améliorer le chauffage d'air au le
lieu de travail et dans une résidence***

Soutenu devant le jury :

Dr. ACHOURI El Hadj

Université K.M.Ouargla Président

Dr. DRID Mohamed Mebrouk

Université K.M.Ouargla Examineur

Pr. DOKKAR Boubekeur

Université K.M.Ouargla Encadreur

***Année universitaire
2022/2023***

Remerciements

*Nous remercions **DIEU** le tout puissant qui nous avons donné le courage, la volonté et le pouvoir de réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions notre encadreur, monsieur **DOKKAR**Boubekeur pour nous avoir conseillés et dirigés pendant la réalisation de ce travail.*

Nous remercions tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué à notre formation tout au long de notre études.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nous remercions enfin tous nos amis de promotion ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

*A vous tous **MERCI**.....*

Résumé:

Dans le domaine industriel de la production de pain, le four de la boulangerie dégage une forte chaleur dans le milieu environnant. D'une part, cette chaleur est néfaste pour le poste de travail du personnel, nécessitant une évacuation continue de la chaleur excédentaire vers l'extérieur de l'enceinte. D'autre part, la récupération de chaleur présente une source d'énergie gratuite pour le conditionnement d'une habitation voisine. Le système contribue à la rationalisation de la consommation d'énergie et à l'amélioration du confort thermique aux postes du travail. La chaleur récupérée peut être utilisée directement pour le chauffage pendant l'hiver. Ainsi, elle peut être utilisée pour le refroidissement pendant l'été via une machine frigorifique à absorption. La collecte de la chaleur dégagée par la boulangerie pendant la période hivernale est étudiée. Les canaux d'évacuation d'air chaud et un échangeur de chaleur air-air sont intégrés, et la simulation numérique est réalisée à l'aide du code ANSYS. Les résultats préliminaires montrent une amélioration significative du confort thermique dans le logement et sur le lieu de travail. La température de 23 °C est atteinte à 1,5 m dans les zones concernées par une convection d'air légèrement forcée.

Mots clés : Boulangerie, Four, récupération de la chaleur, conditionnement d'air, Simulation numérique,

Abstract:

In the industrial field of bread production, the bakery oven releases a high amount of heat into the surrounding environment. On one hand, this heat is detrimental to the working conditions of the personnel, requiring continuous evacuation of excess heat to the outside of the enclosure. On the other hand, heat recovery presents a free energy source for conditioning a neighboring residence. The system contributes to energy consumption optimization and improves thermal comfort at workstations. The recovered heat can be directly used for heating during winter and can also be utilized for cooling purposes in summer through an absorption refrigeration machine. The collection of heat emitted by the bakery during the winter period is studied. Hot air exhaust channels and an air-to-air heat exchanger are integrated, and numerical simulation is performed using ANSYS software. Preliminary results show a significant improvement in thermal comfort in both residential and workplace settings. A temperature of 22 °C is achieved at a distance of 1.7 meters in areas affected by slightly forced air convection.

Keywords : bakery, oven, heat recovery, air conditioning, numerical simulation,

ملخص:

في صناعة إنتاج الخبز الصناعي، ينتج فرن المخابز حرارة عالية في المحيط . من جهة، تكون هذه الحرارة ضارة لمكان العمل للعاملين، مما يستدعي التخلص المستمر من الحرارة الزائدة نحو الخارج. من جهة أخرى، استرداد الحرارة يشكل مصدرًا مجانيًا لتكييف منزل مجاور. يسهم هذا النظام في ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية في مكان العمل. يمكن استخدام الحرارة المستردة مباشرة للتدفئة خلال فصل الشتاء.. يتم دراسة جمع الحرارة المنبعثة من المخابز خلال فصل الشتاء. يتم دمج قنوات إخراج الهواء الساخن ومبادل حراري هواء-هواء، ويتم إجراء المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS. تشير النتائج الأولية إلى تحسين كبير في الراحة الحرارية في المنزل ومكان العمل. يتم تحقيق درجة حرارة 23 درجة مئوية عند مسافة 1.5 متر في المناطق المعنية بتيار هوائي طفيف.

SOMMAIRE

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction Générale | 1 |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Les origines du pain | 3 |
| I.2.1 Egypte ancienne | 4 |
| I.2.2 Grèce | 5 |
| I.2.3 Rome | 6 |
| I.2.4 Moyen Âge | 7 |
| I.2.5 Renaissance | 8 |
| I.2.6. Le dix-septième siècle | 9 |
| I.2.7. Le dix-huitième siècle | 10 |
| I.2.8. Le dix-neuvième siècle | 11 |
| I.2.9. Le vingtième siècle | 12 |
| I.3. Modernisation des fournils | 13 |
| I.3.1. vogue des pains de campagne | 14 |
| I.3.2. 1968 : premières farines prêtes à l'emploi | 15 |
| I.3.3. 1975 : accélération du nombre de fermeture de petites boulangeries | 18 |
| I.3.4. 1981 : formation de groupements de meuniers | 18 |
| I.4. Conclusion | 19 |
| CHAPITRE II | 20 |
| BOULANGERIE MODERNE | 20 |
| II.1 Introduction | 21 |
| II.2 Matériaux du four | 21 |
| II.3. Types de four | 22 |
| II.3.1. Four à feu direct (FFD) | 23 |
| II.3.2. Four à feu indirect (FFI) | 24 |
| II.3.3. Four électrique | 26 |
| II.3.4. Four à briques pelées | 27 |
| II.3.5. Four à chariot | 28 |
| II.3.6. Four à bobines | 29 |
| II.3.7. Four convoyeur (appelé aussi four à plateau mobile) | 30 |

| | |
|--|----|
| II.3.8. Four tunnel | 31 |
| II.3.9. Four hybride..... | 32 |
| II.4. LE FOUR A ETUDIER | 35 |
| II.4.1. BONGARD 10.83 ROTARY RACK OVEN | 35 |
| II.4 .2FeatureDu Bongard 10.83 Rotary Rack Oven..... | 37 |
| II.4 .3Specifications Du Bongard 10.83 Rotary Rack Oven..... | 37 |
| II.4 .4Une cuisson idéale et des qualités de construction qui font la différence | 39 |
| II.6. Conclusion..... | 39 |
| Chapitre III | 41 |
| SIMULATION NUMERIQUE | 41 |
| III.1. Introduction..... | 42 |
| III.2. Modèle Mathématique | 42 |
| III.2.1.L'échangeur de chaleur | 42 |
| III.3. Efficacité d'un échangeur..... | 42 |
| III.3.1. Efficacité de l'échangeur de chaleur air-air..... | 42 |
| III.3.2. Méthodes de calculs d'un échangeur | 42 |
| III.3.2.1.méthode de ϵ -NUT | 43 |
| III.4. Modélisation de l'écoulement d'air dans la résidence | 45 |
| III.4.1. Equation de continuité | 45 |
| III.4.2. Equation de quantité de mouvement | 46 |
| III.4.3. Equation d'énergie | 46 |
| III.4.4. Mesures expérimentales | 47 |
| III.5. Simulation numérique..... | 47 |
| III.5.1. Le code ANSYS..... | 47 |
| III.5.2. Domaine de calcul et Condition aux limites | 48 |
| III.5.3. Test de maillage | 49 |
| III.6. Résidence avec des ouvertures | 51 |
| a. Premier cas :Ventilateur à $v=1$ m/s..... | 51 |
| b. Deuxième cas : ventilateur à $v=0.5$ m/s..... | 54 |
| III.7. Conclusion | 58 |
| Conclusion Générale..... | 60 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| Références bibliographiques | 61 |
|-----------------------------------|----|

Liste des figures

| | |
|--|-----|
| Figure I-1: le plus ancien – vrai pain..... | 4 |
| Figure I-2: pains d'Egypte ancienne..... | 5 |
| Figure I-3: pains quadrants..... | 6 |
| Figure I-4: pains quadrants..... | 7 |
| Figure I-5: Jean II Le Bon (1350 à 1364)..... | 8 |
| Figure I-6: la boulangerie de modeste 1871 | 12 |
| Figure I-7: les façonneuses obliques à tapis | 13 |
| Figure I-8: peseuse diviseuse volumétrique | 17 |
| Figure II-1 : un four de cuisson à l'échelle industrielle typique | 22 |
| Figure II-2 : Four à feu direct (FFD) | 24 |
| Figure II-3 : Four à feu indirect (FFI)..... | 25 |
| Figure II-4 : Four électrique | 26. |
| Figure II-5 : Four à briques pelées | 27 |
| Figure II-6 : Four à chariot..... | 29 |
| Figure II-7 : Four à bobines..... | 30 |
| Figure II-8 : Four convoyeur..... | 31 |
| Figure II-9 : Four tunnel..... | 32 |
| Figure II-10/11 : Four hybride | 33 |
| Figure II-12 : Transfert de chaleur | 34 |
| Figure II-13: image d'une machine bongard 10.83 rotary rack oven..... | 35 |
| Figure III-1 Efficacité pour les performances de l'échangeur à contre-courant | 43 |
| Figure III-2 : Domaine du calcul..... | 46 |
| Figure III-3 : Maillage sur ANSYS..... | 47 |
| Figure III- 4: Maillage sur ANSYS..... | 47 |
| Figure III-5 : Température interne dans la direction verticale..... | 49 |
| Figure III-6 : Contours de température dans la section longitudinale et transversales | 50 |
| Figure III-7 : Températures dans les sections transversales et longitudinale | 50 |
| Figure III-8 : Températures dans la section longitudinale à $V = 1$ m /s..... | 51 |
| Figure III-9 : Température interne dans la direction verticale..... | 52 |
| Figure III-10 : Contours de température dans la section longitudinale et transversales | 53 |
| Figure III-11 : Températures dans les sections transversales et longitudinale | 53 |
| Figure III-12 : Températures dans la section longitudinale à $V = 0.5$ m /s..... | 54 |

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Feature du Bongard..... 36

Tableau II-2 : Specifications du Bongard 10.83 Rotary Rack Oven.....37

NOMENCLATURE

r_{in} et r_{ex} Sont respectivement les rayons des gaz brûlés dans l'échangeur

m'_c et m'_h Sont respectivement les débits massiques d'air et de gaz brûlés

C_c et C_h Sont respectivement les pouvoirs calorifiques de l'air et des gaz brûlés

C_p Chaleur spécifique à pression constante (J. kg⁻¹K⁻¹)

L Longueur dimensionnelle (m)

H Hauteur dimensionnelle (m)

λ Conductivité thermique du fluide (W.m⁻¹ K⁻¹)

T Température dimensionnelle (K)

β Coefficient d'expansion thermique à pression constante (1.K⁻¹)

ρ Masse volumique (kg.m⁻³)

ϕ Variable dépendante générale

φ Densité de flux thermique (W.m⁻²)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

L'industrie de la boulangerie utilise des fours qui génèrent une quantité considérable de chaleur lors de la production de pain. Cette chaleur est souvent évacuée vers l'environnement extérieur, ce qui entraîne des pertes d'énergie significatives. Cependant, cette chaleur rejetée peut être une ressource précieuse si elle est récupérée et exploitée de manière efficace.

L'évaluation et l'exploitation de la chaleur dégagée par un four de boulangerie présentent des avantages potentiels tant pour le lieu de travail que pour les résidences avoisinantes. D'une part, la chaleur excessive générée par le four peut avoir un impact négatif sur les conditions de travail des employés, nécessitant une évacuation continue de cette chaleur pour maintenir un environnement de travail confortable. D'autre part, cette chaleur récupérée peut être utilisée pour améliorer le conditionnement d'air à la fois sur le lieu de travail et dans les résidences voisines, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique et au confort thermique.

Le mémoire est constitué de trois chapitres, le premier chapitre présente l'histoire de la production du pain à travers les différentes civilisations et son évolution à partir des cuissons traditionnelles jusqu'à la production à grande échelle. Ensuite, le deuxième chapitre décrit l'état actuel des boulangeries modernes et ses équipements développés utilisant la haute technologie des fours industriels. Ainsi, les différents modes d'alimentation en énergie et les diverses techniques de cuisson à l'intérieur du four. Enfin, le troisième chapitre aborde la simulation numérique de l'écoulement d'air chaud à l'intérieur de la résidence en utilisant le code CFD ANSYS. Cette simulation englobe aussi le phénomène du transfert de chaleur extraite des gaz brûlés via un échangeur de chaleur. Le mémoire se termine par une conclusion générale clarifiant les profits essentiels tirés de ce travail.

***CHAPITRE I L'EVOLUTION DU
FOUR DE BOULANGERIE***

Chapitre I

L'évolution du four de boulangerie

I.1 Introduction

L'utilisation du four à pain remonte à de nombreuses années dans l'histoire de l'humanité. Avant l'avènement des fours de boulangerie modernes, les gens utilisaient des fours à pain traditionnels pour cuire leur pain et d'autres produits de boulangerie. Ces fours, souvent construits en utilisant des matériaux tels que la brique ou la pierre, ont joué un rôle essentiel dans les communautés rurales et les villages.

Le four à pain d'autrefois était généralement situé à l'extérieur des maisons ou dans des bâtiments spécialement conçus pour cet usage. Il se caractérisait par une chambre de cuisson spacieuse dans laquelle le bois était brûlé pour produire de la chaleur. Une fois le bois réduit en braises, celles-ci étaient retirées et la chambre était nettoyée pour préparer l'espace de cuisson.

La pâte à pain était façonnée en pains ou en boules et déposée sur des pelles spéciales en bois ou en métal, appelées "pelles à pain", puis introduite dans le four à pain préchauffé. La cuisson était réalisée en exploitant la chaleur résiduelle du foyer, ainsi que la chaleur emmagasinée dans les murs épais du four. Cette méthode de cuisson donnait souvent des résultats savoureux, avec une croûte croustillante et une mie moelleuse.

I.2 Les origines du pain

Il y a trois millions d'années, les premiers hommes mangeaient les grains tels que la nature les offrait, sans aucune préparation. Ils vivaient alors principalement de la chasse et de la cueillette.

À cette période primitive succède une période pastorale au cours de laquelle l'homme commence à domestiquer des animaux. Parallèlement, il réalise aussi quelques essais de culture.

La première forme alimentaire qui fut donnée aux céréales, aussi bien en Egypte, en Grèce, à Rome, et en France, fut la bouillie, d'orge, de blé, de sarrasin, d'avoine.



Figure I-1:le plus ancien – vrai pain -

I.2.1 Egypte ancienne

A cette époque, le broyage des céréales s'effectue entre deux pierres, puis la poudre grossière obtenue subit plusieurs opérations de tamisage avant de devenir une fine farine. On torréfie légèrement cette farine ou on fait sécher au soleil les grains avant de les moudre. Le grain réduit en farine passe alors chez le boulanger qui pétrit la pâte. [1].



Figure I-2:pains d'Égypte ancienne

I.2.2 Grèce :

La culture des céréales et la fabrication du pain se répandent autour de la Méditerranée après les guerres, les migrations et le commerce. Les Grecs deviennent des spécialistes et apprécient particulièrement la maza, une bouillie épaisse à base de farine d'orge torréfié. Après les conquêtes d'Alexandre le Grand au IV^e siècle av. J.-C., de nouveaux boulangers apparaissent en ville et jouissent d'une grande renommée, comme Théarion à Athènes, loué par Platon pour la qualité de ses pains. Ces boulangers maîtrisent toutes les étapes, de la mouture des céréales à la fabrication et à la cuisson du pain.[9].

I.2.3 Rome :

Comme les Grecs, les Romains sont tout d'abord perçus comme des «mangeurs de bouillie». À l'origine, la bouillie était à base d'orge (la polenta désigne à la fois la farine d'orge et la bouillie préparée avec cette farine), de blé, de millet, et même de pain.[9].

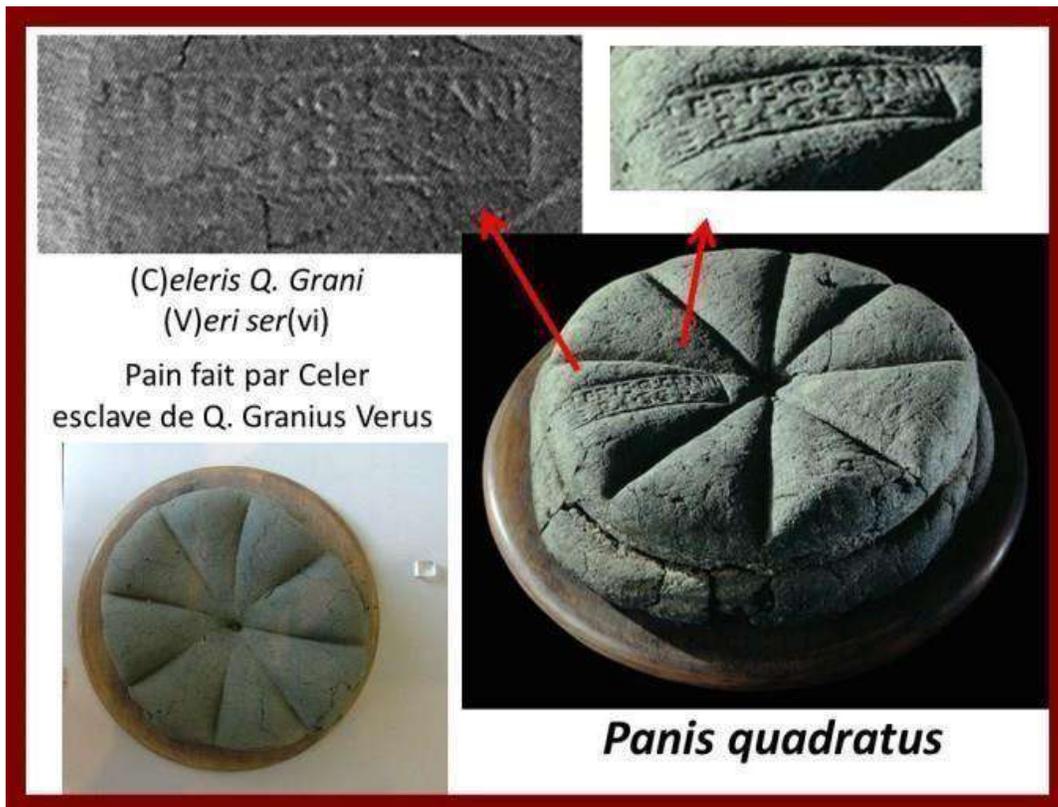


Figure I-3 : Pains quadrants

Dès la fin du III^e siècle av. JC., il existe des boulangers à Rome, appelés *‘pistores’*, travaillant dans une *‘pistoria’*.

Décrétées d'utilité publique par les Empereurs, les boulangeries se développent. À la suite de la conquête de la Macédoine (-148 av. J.-C.), les armées romaines ramènent des boulangers grecs. Le pain devient bientôt un mets populaire. La profession très respectée est de plus en plus indispensable à la société. Bon nombre de boulangers deviennent des magistrats fortunés [2].



Figure I-4: pains quadrants

I.2.4 Moyen Âge :

Entre l'époque gallo-romaine et le début de la Renaissance du XVI^e siècle, on peut constater que l'agriculture ne modifie ni ses méthodes, ni son matériel.

Le rendement des terres reste faible, parfois insuffisant, ce qui empêche de stocker en vue des mauvaises récoltes. Au Moyen Âge, le millet, longtemps cultivé en Gaule, se retrouve essentiellement utilisé pour les bouillies que réalisent les paysans.

Pendant toute la période du Haut Moyen Âge (V^e- X^e siècle), les fours sont rares et les céréales les plus répandues, pauvres en gluten.

C'est seulement à partir de 1050 que le pain et le vin deviennent les bases de l'alimentation. Le rôle du christianisme dans leur promotion et leur diffusion restera considérable pendant tout le Moyen Âge.[3].

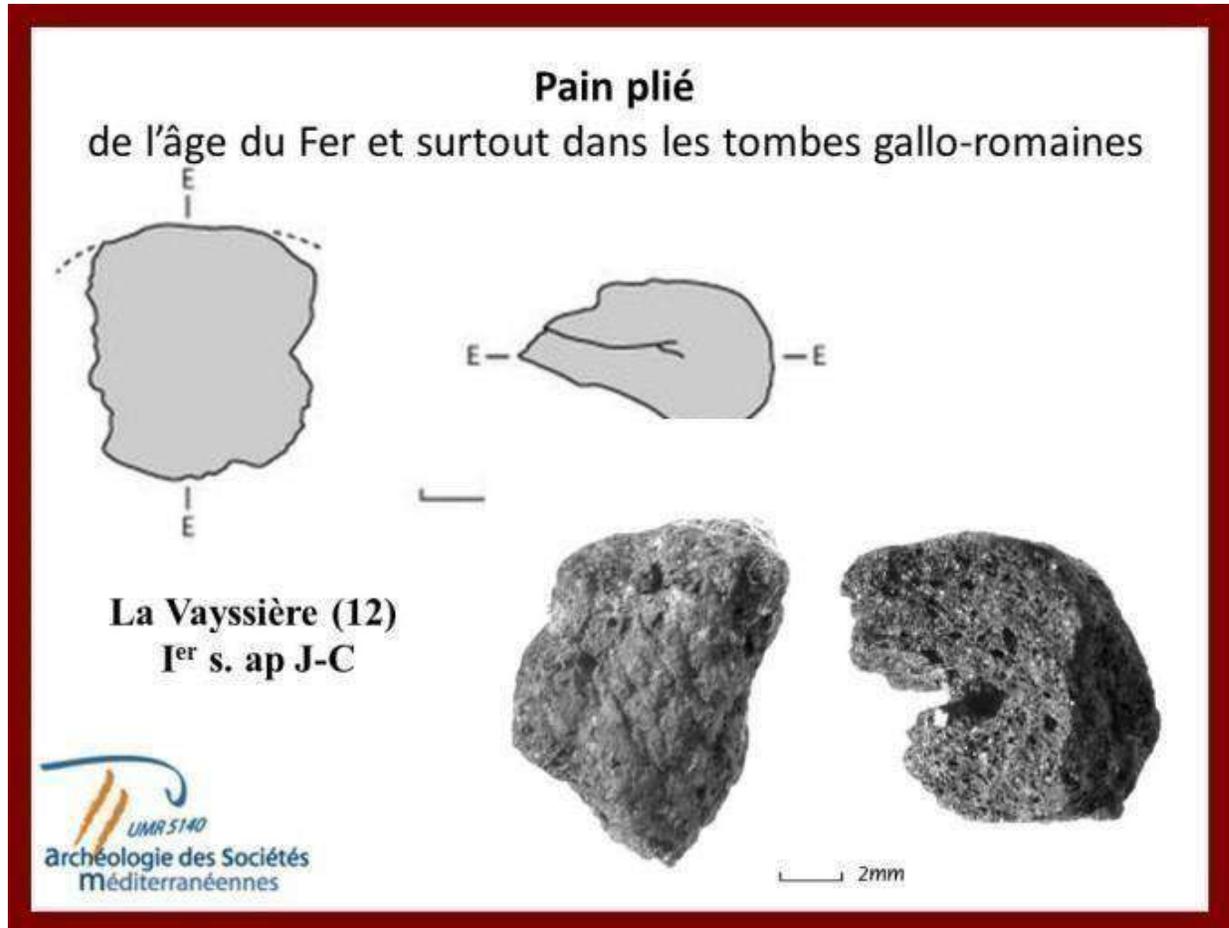


Figure I-5: Jean II Le Bon (1350 à 1364)

I.2.5 Renaissance :

Si la Renaissance apporte un essor économique, culturel et démographique, elle accroît aussi les différences sociales. Les élites s'approprient les terres, et étendent les campagnes vouées à la culture, entre autres aux céréales. A la table des princes, la gastronomie française s'affine, pendant que les paysans souffrent de malnutrition.

Le pain, aliment populaire par excellence, se déguste blanc chez les nobles et les bourgeois qui se le procurent chez leur boulanger. Les paysans le mangent noir et le réalisent eux-mêmes avec les céréales disponibles. Celles-ci peuvent être du froment

comme en Provence et sur tout le pourtour méditerranéen, du seigle, de l'avoine, de l'orge comme dans les régions montagneuses et septentrionales, ou encore du maïs très récemment introduit dans le Sud-ouest de la France [4].

Au XVI^e siècle, afin de réduire les révoltes populaires et de rassurer l'opinion publique, des contrôles de boulangerie se mettent en place. Ordre est également donné de laisser le client peser lui-même le pain qu'il achète, sur une balance permanente installée «à la fenêtre ou dans l'endroit le plus clair de la boutique». Les pains doivent avoir la blancheur et le poids exigés par les règlements. De plus, ils doivent porter la marque du boulanger. En cas de faute grave ou de récidive, on pouvait confisquer tous les biens du boulanger et lui retirer son droit d'exercer [5].

I.2.6 Le dix-septième siècle

Ce siècle voit la naissance des sciences agronomiques. On observe en France un essor formidable de l'aménagement des sols. Parallèlement, les villes grossissent. Les pouvoirs publics cherchent alors à faire des réserves de blé, en prévision des famines ou des sièges. L'agriculture de subsistance se transforme en une agriculture de marché.

Pour la boulangerie aussi, le XVII^e siècle apporte un nouvel essor. L'usage de la levure est autorisé définitivement [6].

Les farines sont de plus en plus blanches : en découle une amélioration de la fabrication ainsi qu'un développement important quant à la variété des pains.

A la ville :

À partir de 1635, le boulanger doit cuire journallement quatre sortes de pains dans sa boutique : le *pain de Chailley* de 12 onces (*1 once = 30,594 g*), après cuisson ; le *pain de chapitre* de 10 onces ; le *pain bourgeois* ou *bis-blanc* de 16 onces ; le *pain bis* (plus noir) ou *pain de brode* de 14 onces. Les balances et les poids doivent rester dans la boutique. On défend aux boulangers d'exposer les autres pains de luxe : *pain de Gonesse*, *pain à la reine*, etc..... Ils sont vendus aux seuls clients qui en font «expressément» la demande.

A la campagne :

Le paysan panifie ce qui est à sa disposition, c'est-à-dire toutes sortes de céréales, voire toutes sortes de graines (légumes ou fruits secs). Le terme «pain» renvoi à de nombreuses variétés de produits panifiés.

Seule constante, ces pains restent gros et on les consomme rassis. «*En bonne maison pain rassis et bois sec*» dit le dicton.

I.2.7 Le dix-huit siècle :

Au XVIIIe siècle, pour les Français, le pain n'est pas seulement un aliment de base. Il symbolise le sacré, l'espoir, la justice, la stabilité... Il rassure quand il est blanc. Il inquiète quand il devient noir et vient à manquer.[6].

Même si les autres vivres ne manquent pas, «le gros du peuple croit mourir de faim s'il n'a point de pain» précise-t-on dans l'Encyclopédie méthodique (1782).

«*Lors des disettes, (...) on s'ingéniait à faire entrer dans la pâte du pain toutes les substances possibles, car on avait beau distribuer du riz et des «souples économiques», le peuple voulait du pain*».

(*Le blé, la farine et le pain / Dr A. Gottschalk, 1935*).

Le Roi de France redoute les soulèvements populaires pour manque de pain. Pour résoudre et atténuer les crises de subsistances, l'État constitue des stocks propres à enrayer toute famine. Il légifère de plus en plus sur la commercialisation des grains.

Les académies organisent des concours. Les savants s'acharnent à trouver de nouvelles solutions. Parmentier propose l'utilisation des pommes de terre dans le pain.

Mais, le peuple gronde toujours. En 1789, les cahiers de doléances prônent un pain «*toujours moins cher et meilleur*».

Finalement, en 1793, on arrive au pain pour tous : riches et pauvres, le pain de l'Égalité. Hélas, la condition des boulangers devient parallèlement misérable, en raison des brimades de la part des administrations révolutionnaires. Seuls les boulangers forains semblent s'en tirer à moindre mal.

I.2.8 Le dix-neuvième siècle

Assurer l'approvisionnement en pain ! Cette préoccupation constante pendant la révolution, reste d'actualité au début du XIXe siècle. Napoléon fait construire un «grenier de Réserve» en 1807, dote ses armées de boulangeries ambulantes. Pour lui, le moral des troupes et du pays dépend beaucoup de la qualité du pain [7].

Pourtant la loi du 14 juin 1791 qui interdisait les syndicats dans la crainte de voir se reformer les anciennes corporations, et surtout qui donnaient tout pouvoir à l'autorité, accable les boulangers jusqu'en 1863 : le boulanger vécut » *les jours les plus sombres de son histoire*» (A. Morel).

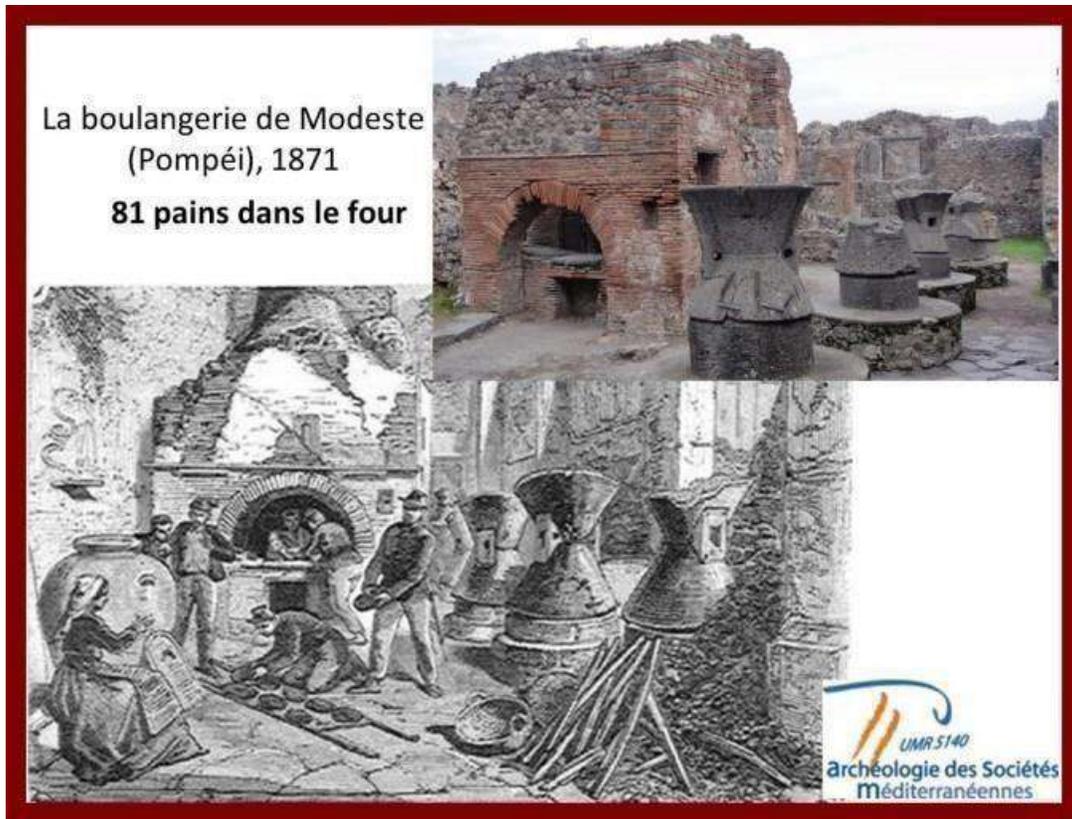


Figure I-6: La Boulangerie de modeste 1871

I.2.9 Le vingtième siècle

À partir de la fin du XIXe siècle, le pain «français» se distingue. À la question, «dans quel pays mange-t-on le plus et le meilleur pain ?», les réponses sont unanimes : — c'est en France !», c'est le pain «*le plus blanc, fait exclusivement avec de la farine de froment*» comme le précise A. Scheibenbogen. (*Cuisine et pâtisserie austro-hongroises, 1896*). [7].

Pourtant, c'est aussi l'époque où les critiques se font de plus en plus virulentes. De nombreuses campagnes de presse critiquent ce pain blanc «*qui dans notre estomac se résout en une bouillie semblable à l'empois de la blanchisseuse, ou à la colle de l'afficheur*». (Le pain / Achille Magnier, 1907) [8].

I.3 Modernisation des fournils.

Les vieux pétrins ne supportent pas longtemps ce surrégime. Dès 1955, la société Rex propose un pétrin à deux vitesses. Ce sur-pétrissage chauffe notablement les pâtes. Le premier refroidisseur d'eau est commercialisé en 1955 dans le Choletais par la société Magneron. La réduction du temps de pointage facilite le façonnage mécanique des pâtons. En 1956 apparaissent les façonneuses obliques à tapis avec vitesse différentielle.

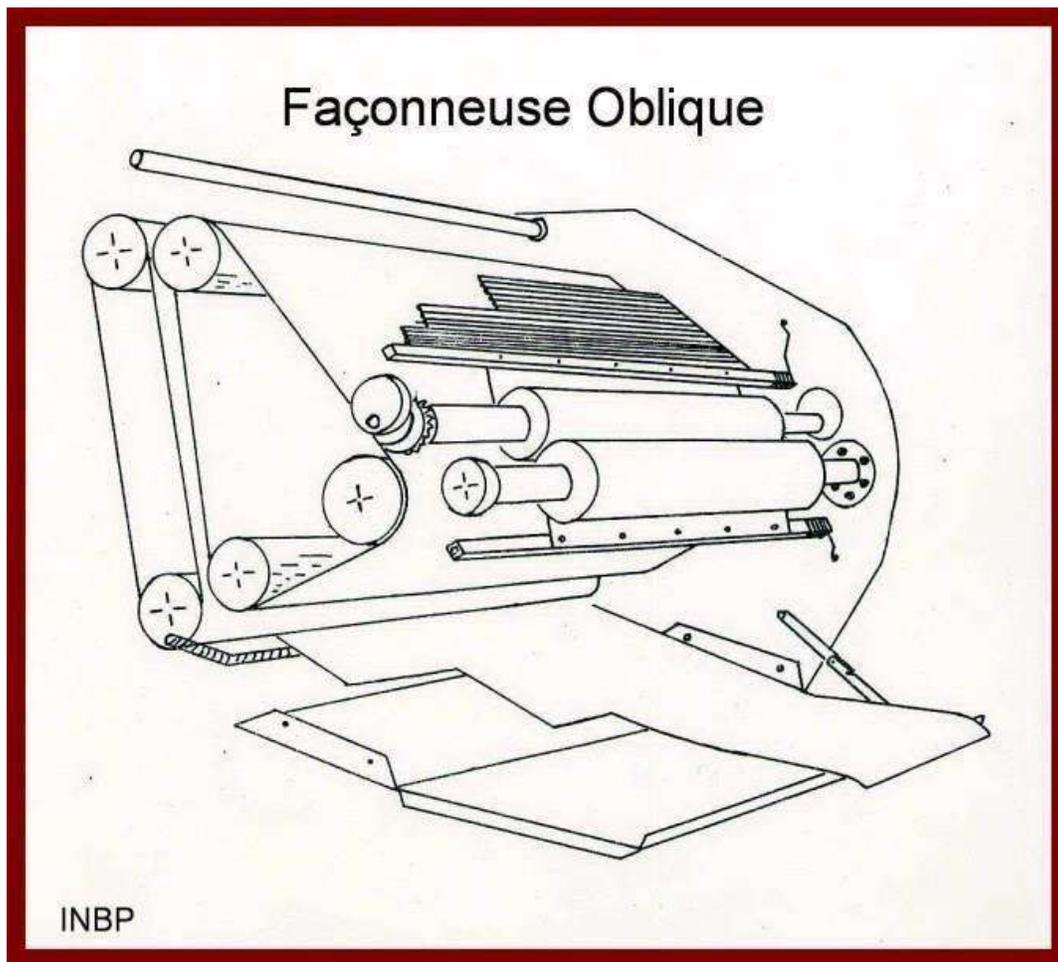


Figure I-7: Les façonneuses obliques à tapis

1958 : apparition du pain de mie tranché fabriqué industriellement qui connaîtra un succès croissant.

Premières diviseuses destinées aux artisans boulangers.[9].

1959 : assouplissement de la taxation du pain ;

Par la création d'un secteur libre pour les pains de 3 livres de 500 g et de 250 g (le prix des ficelles et des petits pains était déjà libre). Restent taxés le pain de 4 livres, le pain boulot, le 700g de 50 à 60 cm, le 300g de 30 à 50 cm. Cette époque marque sans doute la fin des goûters des enfants à base de larges tartines beurrées et le début des casse-croûte et autres « chocós » issus des biscuiteries industrielles.[9].

I.3.1 Vogue des pains de campagne :

Au début des années soixante apparaissent les premiers pains spéciaux. Le pain de campagne se développe en ville au moment même où la consommation de la baguette progresse en campagne... Les substituts du pain progressent également de 1938 à 1963, la consommation de biscottes passe de 38 000 à 80 000 tonnes annuelles. La vente de pain grillé se développe à partir de 1961.

Apparition de groupes automatiques pour artisans boulangers qui permettent d'importants gains de productivité dans la fabrication du « pain courant ». Le développement du pétrissage intensifié induit une dépendance accrue vis à vis des additifs _'le comprimé'', _'la pastille'' ou _'le granulé'' d'acide ascorbique [9].

1963: la pousse lente.

A 10°C environ, première application de la cuisson différée. Les premières tentatives remontent aux années 1933, puis entre 1955 et 1959, plusieurs boulangers expérimentent cette technique qui reportait la cuisson d'une douzaine d'heures au maximum.

Chapitre I **L'évolution du four de boulangerie**

I.3.3 Dès 1963 : la pousse lente

Elle se diffuse dans les villes. Vers 1965/1966, elle connaît un réel succès.

- un décret interdit l'installation de brûleurs à mazout.
- instauration des types officiels des farines, basés sur la teneur en cendres de celles-ci. Auparavant le taux d'extraction était fixé en fonction du poids à l'hectolitre ou poids spécifique du blé.
- apparition de la technique dite de pétrissage amélioré, compromis entre le pétrissage lent et le pétrissage intensifié.

1964 : exportation de la technique du pain français.

Dès 1957 des boulangers français ont exporté leur savoir-faire et les équipementiers du matériel. En 1964, le pain français s'exporte plus encore, en particulier en Europe du nord mais aussi au Japon, aux Etats-Unis.

1965 : quelques applications de congélation de pain cuit.

- apparition des couches automatiques qui permettent un gain de temps très appréciable à l'enfournement (transi-pat, panic Mati etc..).

1967 : «le travesti fariné»

Ou la célèbre colère du professeur Calvel qui s'insurge contre une pratique qui consiste à fariner abondamment un pâton issu d'une fournée ordinaire et à le vendre pour un pain de campagne...

I.3.2 1968 : premières farines prêtes à l'emploi :

Le marché des pains spéciaux ne cesse de croître, c'est pourquoi les Grands Moulins de Paris vont proposer à leurs clients des farines prêtes à l'emploi, ainsi que les fiches de fabrication correspondantes. Cette assistance à la boulangerie va se confirmer dès le début des années 1970 par la multiplication des «démonstrateurs» des grands moulins [9].

1967/68 : des innovations déterminants.

- Creva : 1er four à vapeur à tube annulaire 100% métallique (le foyer est en acier réfractaire) en 1967
- Four rotatif Pons première fabrication française de ce type de four (d'origine suédoise) en 1967
- Balancelles : les groupes automatiques vont connaître un nouvel essor grâce aux balancelles qui optimisent la détente des pâtons en 1868
- PANEM : Monsieur Cosmao frigoriste de Niort, invente la première programmation automatique de température pour des enceintes de fermentation. « Panam » ouvre la voie à la pousse contrôlée. L'invention du blocage permet de différer la cuisson de 48 heures voire plus en 1968 L'instauration de la TVA permet des progrès dans la gestion des petites boulangeries, elle coïncide avec la disposition des dernières coopératives boulangères et des dernières formes d'échange blé – pain en zone rurale [9].

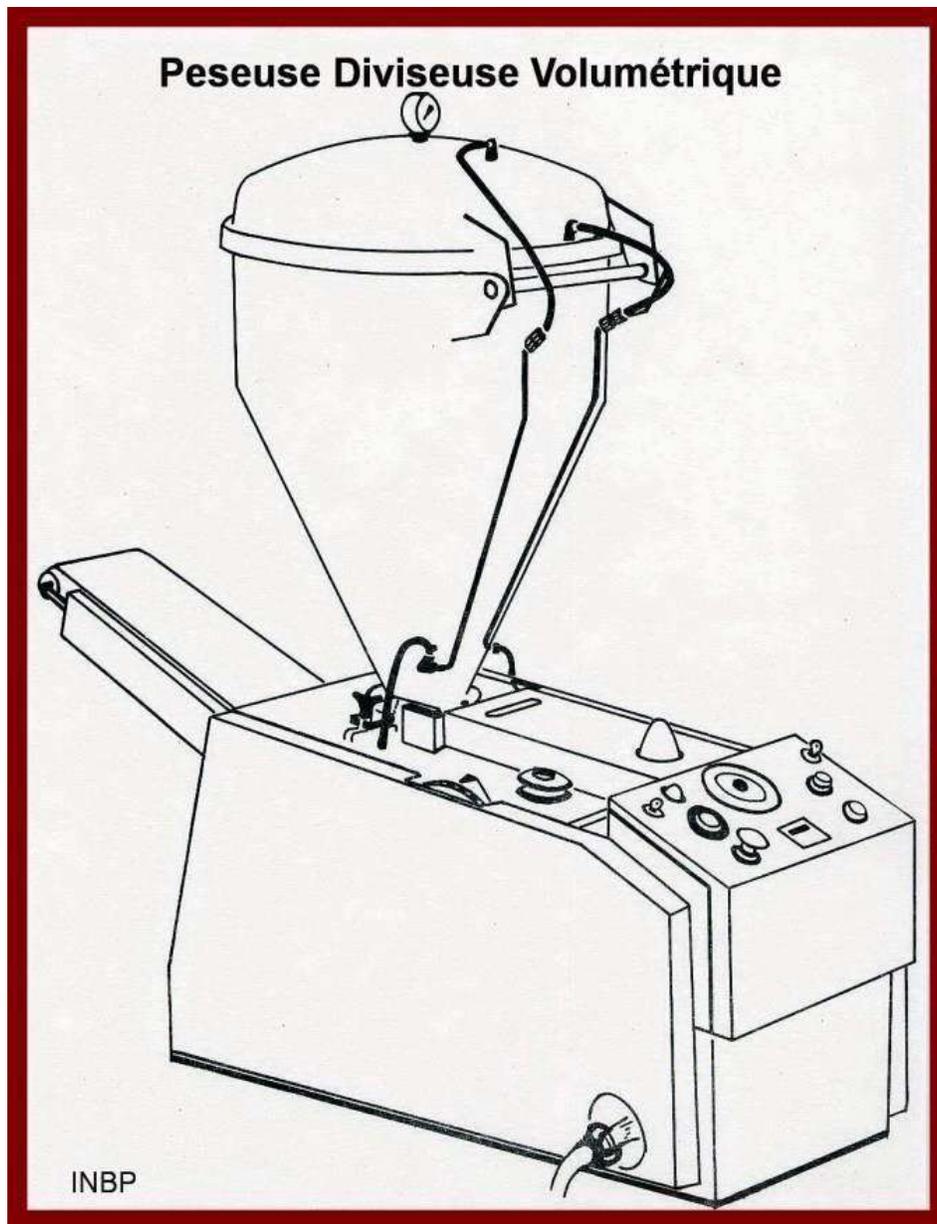


Figure I-8: Peseuse diviseuse volumétrique

Naissance de rayons boulangerie dans la grande distribution. Les tous premiers fournils voient le jour dans les hypermarchés, ils sont généralement très mécanisés, utilisent des fours rotatifs et se servent du pain comme produit d'appel. De 1968 à 1973, la quasi-totalité des hypermarchés s'équipent en fournils.

I.3.3 1975 : accélération du nombre de fermeture de petites boulangeries :

Entre 1968 et 1975, de nombreuses boulangeries artisanales (6786 au total) ont disparu. En 1976, l'utilisation d'additifs spécifiques pour la pousse contrôlée du pain a contribué à réduire les heures de travail de nuit. Cette période a également été marquée par l'essor des fours à pain électriques et des fours rotatifs. En 1977, les croissanteries ont connu une forte expansion, tandis qu'une société proposait des viennoiseries crues surgelées pour les artisans. Une étude du CNRS a révélé une baisse significative de la consommation de pain au cours du siècle précédent, passant de 50% des calories en 1877 à seulement 5% en 1977. La perception médicale du pain a connu un revirement lors d'un colloque organisé par le CNERNA en 1977, où les fibres alimentaires ont été mises en valeur. En 1978, le prix du pain a été libéralisé, mais les hausses importantes constatées l'année suivante ont conduit à la signature d'accords de modération. De nouveaux types de pains, tels que le pain de campagne sur hydraté, ont commencé à gagner en popularité, tandis que le casse-croûte à base de baguette faisait face à la concurrence du buns dans les fast-foods. En 1980, Raymond Calvel a présenté une méthode de fabrication de pain reposant sur l'utilisation d'une farine sans fèves, l'emploi de pâte fermentée et un pétrissage amélioré, ce qui donnait un pain à la mie crémeuse et au meilleur goût.[9].

I.3.4 1981 : formation de groupements de meuniers :

Certains meuniers se regroupent pour créer des structures communes de recherche de nouveaux produits et installer des laboratoires de contrôle de qualité [9].

1983 : Etats Généraux de la boulangerie française. On y constate que la France est le seul pays développé ayant maintenu sa boulangerie artisanale et qu'une mutation s'est engagée. Autrefois les boulangers vendaient ce qu'ils produisaient, ils sont de nos jours obligés de devenir entrepreneurs et de produire ce qu'ils sauront vendre.

Des études citées montrent que le pain est moins cher qu'en 1983 et, qu'il ne représente désormais qu'1% des dépenses du budget des ménages.

Chapitre I **L'évolution du four de boulangerie**

1984 : des équipementiers français proposent des pétrins à spirale qui permettent de réduire notablement le temps de pétrissage. Ce type de pétrin existait depuis plusieurs décennies en Allemagne.

Conclusion

L'évolution du four de boulangerie à travers les époques a été marquée par des changements majeurs. Au fil du temps, les avancées technologiques, les innovations et les besoins pratiques ont influencé la conception et les fonctionnalités des fours utilisés par les boulangers. En résumé, cela reflète l'évolution des techniques de cuisson, les progrès technologiques et les exigences pratiques des boulangers, le tout dans le but d'obtenir une cuisson de haute qualité et efficace pour répondre à la demande croissante de pain.

CHAPITRE II
BOULANGERIE MODERNE

Chapitre II

Boulangerie moderne

II.1 Introduction

Le four de boulangerie moderne est un élément central dans le processus de fabrication du pain et des produits de boulangerie. Il a connu de nombreuses évolutions au fil du temps, tant au niveau de sa conception que de ses fonctionnalités, afin de répondre aux besoins spécifiques des boulangers et de garantir la qualité des produits cuits.

La répartition de la chaleur dans le four de cuisson est un processus complexe. Ils ont constaté que la surface supérieure du produit est principalement chauffée par rayonnement [10], tandis que la convection ne contribue que de manière marginale [12], représentant moins de 10% du transfert de chaleur total. [13]

La méthode de représentation en réseau a été introduite par Oppenheim en 1956 [14] et s'avère utile pour analyser le rayonnement dans les enceintes thermiques telles que les fours. Bien que quelques études aient été réalisées en utilisant cette technique dans ce domaine de recherche [15], peu d'articles ont été publiés spécifiquement sur le transfert de chaleur par rayonnement dans l'analyse des fours. [16].

II.2 Matériaux du four

Le four à pain étudié visait à améliorer les paramètres du processus de cuisson. Il est composé de plateaux de cuisson rectangulaires fixés dans des cadres, chauffés par des brûleurs situés en bas. L'utilisation d'un régulateur de pression zéro permet de maintenir la stabilité du mélange carburant-air en ajustant le débit d'air de combustion. L'air secondaire refroidit le four et protège les roulements, tandis que les émissions de combustion et la vapeur de cuisson sont évacuées par le toit à l'aide d'une unité d'extraction.

Des expériences ont été menées pour mesurer les flux d'air, de carburant, de gaz d'échappement et la température à l'intérieur du four. Des instruments tels qu'un débitmètre d'air et d'échappement, un analyseur de gaz d'échappement et des enregistreurs de données

de température ont été utilisés. De plus, des expériences de récupération de chaleur ont été réalisées sur une version miniature du four afin de tester une technique de récupération de chaleur de l'air à basse température.



Figure II-1 : Un four de cuisson à l'échelle industrielle typique

L'objectif de cette étude était d'explorer les possibilités d'amélioration des paramètres opérationnels du processus de cuisson global et d'appliquer une technique de récupération de chaleur pour augmenter l'efficacité de l'utilisation de la chaleur dans le four [17].

II.3 Types de four

En fonction de leur mode de fonctionnement et du mécanisme de transfert de chaleur, les fours peuvent être classés en équipements batch ou continus, et en utilisant soit un échange de chaleur direct, soit un échange de chaleur indirect.

Le type de four adapté à l'activité d'une boulangerie peut dépendre de la capacité de production, des spécifications du produit, de l'espace disponible, des sources d'énergie disponibles, des performances opérationnelles, des matériaux de construction et des besoins en entretien. [23].

II.3.1 Four à feu direct (FFD)

FFD place combusting gas (energy source) inside the baking chamber to heat the air and the products. The heat transfer in a direct gas-fired oven is primarily carried out by radiation from the flames (ribbon burners placed above and below the oven band), top, base and walls of the baking chamber Comme le montre la figure suivante. Direct-fired ovens are very efficient because they convert most of the fuel to heat and process the products, and this lowers fuel consumption and operating costs.

FFD place du gaz en combustion (source d'énergie) à l'intérieur de la chambre de cuisson pour chauffer l'air et les produits. Le transfert de chaleur dans un four à gaz direct est principalement assuré par rayonnement des flammes (brûleurs ruban placés au-dessus et en dessous du tapis du four), du haut, de la base et des parois de la chambre de cuisson. Les fours à gaz directs sont très efficaces car ils convertissent la plupart du combustible en chaleur pour le traitement des produits, ce qui réduit la consommation de combustible et les coûts d'exploitation. [19].



Figure II-2 : Four à feu direct (FFD)

II.3.2 Four à feu indirect (FFI)

Les fours FFI chauffent indirectement la chambre de cuisson en utilisant des échangeurs. Ce four convient aux produits de boulangerie sensibles (par exemple, les gâteaux, les pâtisseries) car les sous-produits de combustion restent à l'intérieur de la structure de l'échangeur de chaleur et ne sont pas en contact direct avec les morceaux de pâte. Cela élimine le risque de contamination et d'imprégnation d'odeurs indésirables dans les produits.

Ce type de four est moins souvent utilisé de nos jours en raison de sa puissance limitée pour le transfert de chaleur et de son efficacité énergétique (quantité de combustible brûlé en un temps donné par rapport à la perte d'eau (humidité évaporée) des produits pendant la cuisson).

FFI chauffe indirectement la chambre de cuisson en utilisant des échangeurs. Ce four convient aux produits de boulangerie sensibles (par exemple, les gâteaux, les pâtisseries) car les sous-produits de combustion restent à l'intérieur de la structure de l'échangeur de chaleur et ne viennent pas directement en contact avec les morceaux de pâte. Cela élimine le risque de contamination et d'imprégnation d'odeurs indésirables dans les produits.

Ce type de four est moins souvent utilisé de nos jours en raison de sa puissance limitée pour le transfert de chaleur et de son efficacité énergétique (quantité de combustible brûlé en un temps donné par rapport à la perte d'eau (humidité évaporée) des produits lors de la cuisson). [19].

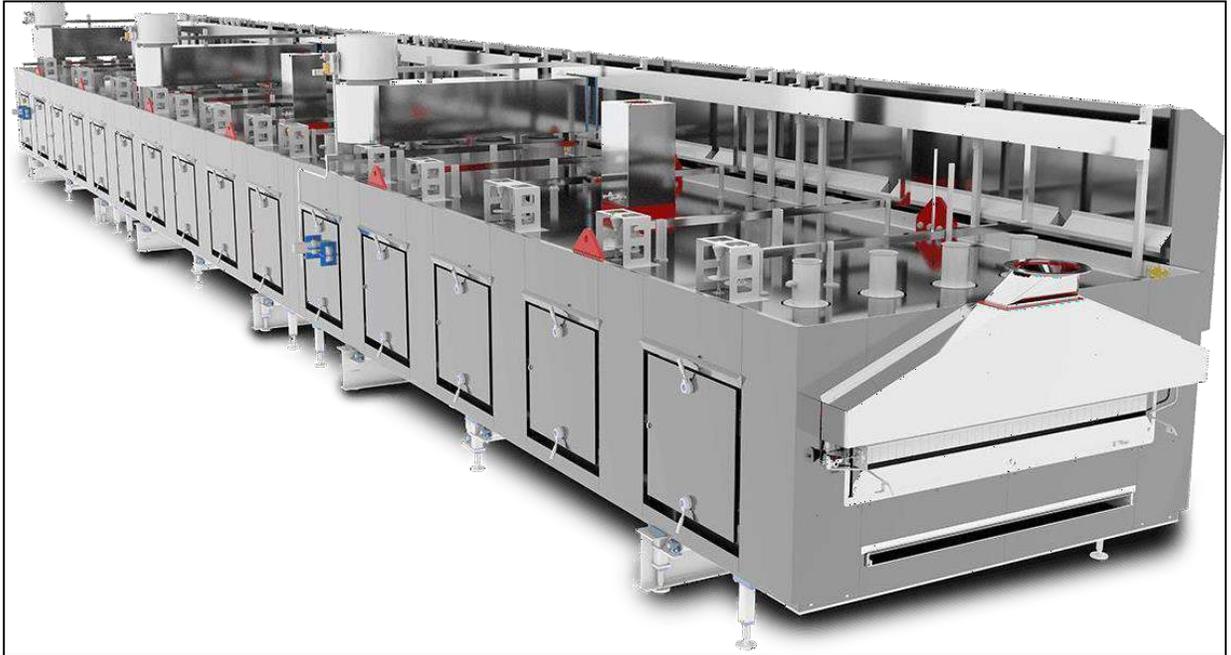


Figure II-3 : Four à feu indirect (FFI)

II.3.3 Four électrique

Les fours électriques ont des caractéristiques de construction similaires à celles des FFD et fonctionnent de la même manière en termes de mécanisme de transfert de chaleur pour cuire les produits. Ce type de four utilise des résistances électriques à la place des traditionnels brûleurs à gaz des FFD. [19].

Les fours électriques ont une utilisation limitée dans l'industrie de la boulangerie en raison de leur consommation d'énergie et de leurs coûts par kWh. Ils sont également confrontés à des défis de mise à l'échelle qui nécessitent des recherches supplémentaires et des applications industrielles.



Figure II-4 : Four électrique

II.3.4 Four à briques pelées

Le four à sole en brique était l'une des premières unités de cuisson construites dans l'histoire de l'humanité. Il se compose d'une chambre en brique massive Comme le montre la figure suivante. La chambre est reliée à un sol en carreaux réfractaires qui maintient les morceaux de pâte. Le charbon et le bois sont utilisés comme combustible (source de combustion).[20].

Grâce à leurs caractéristiques de construction (capacité d'isolation des matériaux et épaisseur des parois), ces fours sont capables de transférer de manière constante la chaleur rayonnante aux produits, tout en maintenant des températures élevées à l'intérieur de la

chambre de cuisson pendant de longues périodes. Les fours sont manipulés manuellement et nécessitent des compétences particulières de la part du boulanger [20].

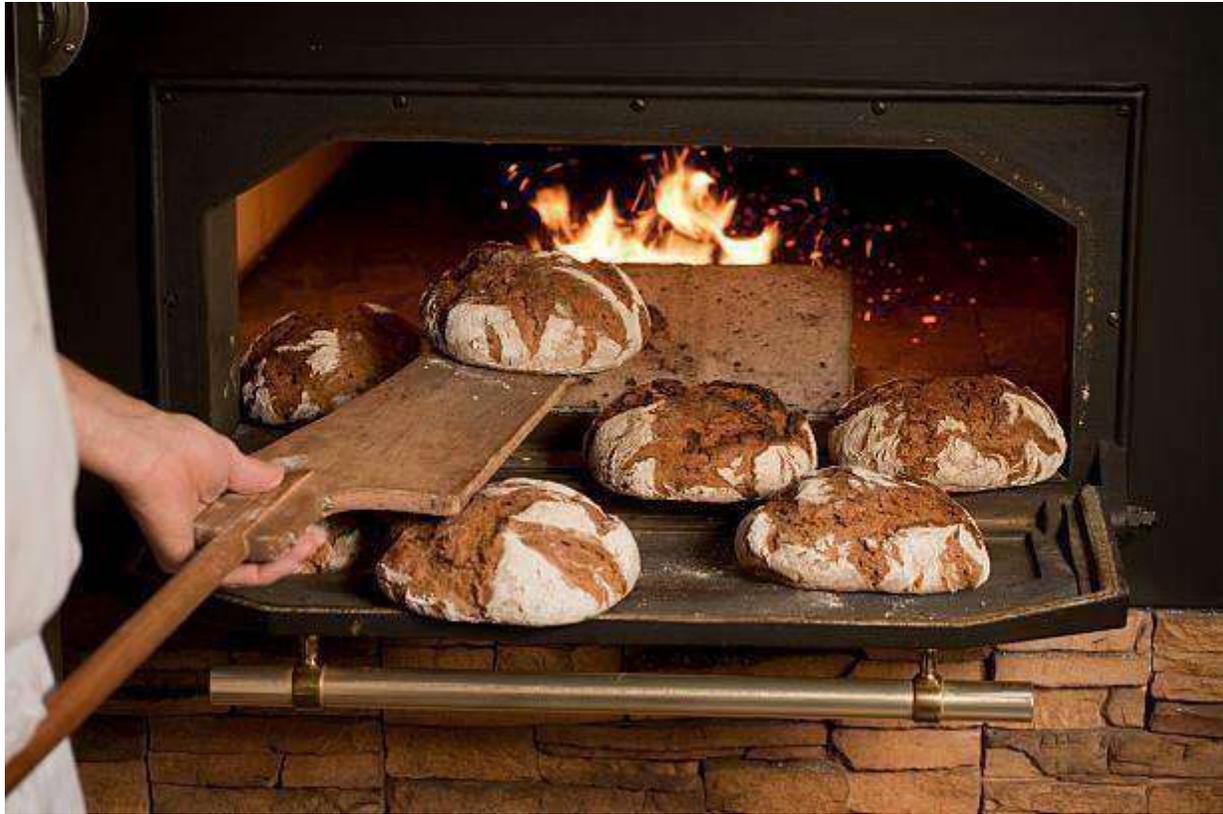


Figure II-5 : Four à briques pelées

II.3.5 Four à chariot

Un four à chariot est un four vertical à chargement par lots dans lequel des chariots remplis de plaques de cuisson peuvent être roulés pour la cuisson. Cette unité peut contenir de 8 à 20 plaques de cuisson par cycle de cuisson. Comme le montre la figure suivante. Certaines unités utilisent des sources électriques ou de combustible et placent des ventilateurs à l'intérieur de la chambre de cuisson (génération de séchage par convection) pour accélérer les temps de cuisson et développer des caractéristiques spéciales dans les produits.

Ce four convient aux opérations de vente au détail en raison de son économie d'espace au sol et de ses temps de cuisson moyens à longs. Les produits sont cuits à la demande du client et sont souvent proposés directement (non emballés) pour une consommation

immédiate. [8]. Ces fours sont généralement équipés de recettes programmables (enregistrées) afin que l'opérateur puisse modifier le temps de cuisson, la température, l'intensité de la ventilation de l'air et la fréquence d'impulsion de la vapeur.



Figure II-6 : Four à chariot

II.3.6 Four à bobines

Un four à chariot rotatif (également appelé four à plateaux rotatifs) est un four dans lequel des plateaux ou des étagères sont placés sur des plateformes tournant autour d'un axe horizontal central comme le montre la figure suivante. Une chambre de cuisson haute est nécessaire pour accueillir la structure rotative, ce qui permet de gagner de l'espace au sol. Les fours à chariot rotatif sont généralement alimentés directement au gaz ou à l'électricité, la source de chaleur étant située au centre du plancher de la chambre. Ce type de four est

principalement conçu pour les boulangeries de détail ou les usines de production à petite échelle [21].

Les fours à chariot rotatif ne génèrent souvent pas une répartition uniforme du transfert de chaleur en raison de leur nature rotative et de la structure interférant avec le transfert de chaleur par rayonnement. Les produits placés sur des plaques ou des plateaux en rotation continue peuvent présenter une coloration inégale ou une distribution finale de l'humidité médiocre.

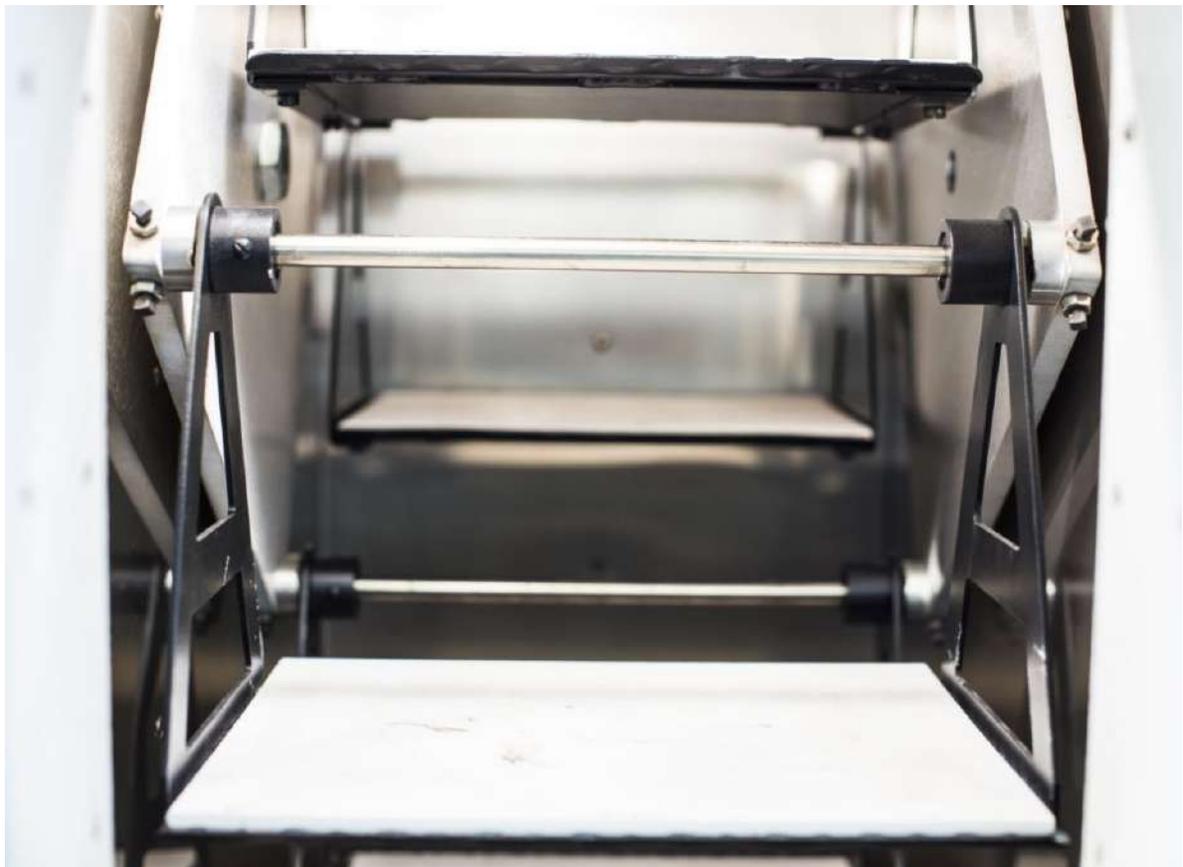


Figure II-7 : Four à bobines

II.3.7 Four convoyeur (appelé aussi four à plateau mobile)

Les fours à convoyeur remplacent le concept des fours à chariot rotatif par deux chaînes transporteuses parallèles sans fin qui transportent des plateaux de produits sur toute la longueur de la chambre de cuisson, de sorte que les morceaux de pâte entrent et sortent

continuellement du four. Leurs principaux avantages sont la simplicité de conception et l'uniformité de la cuisson, car les produits suivent le même parcours à travers la chambre de cuisson. Un moteur entraîne directement la vitesse de la bande, déterminant ainsi la durée du cycle de cuisson.

Les fours à convoyeur peuvent être à simple ou double passage. Dans les fours à simple passage, les plateaux contenant les produits effectuent un seul aller-retour comme le montre la figure suivante. Dans un four à double passage, les plateaux traversent quatre zones de chaleur au lieu des deux zones du four à simple passage [10].

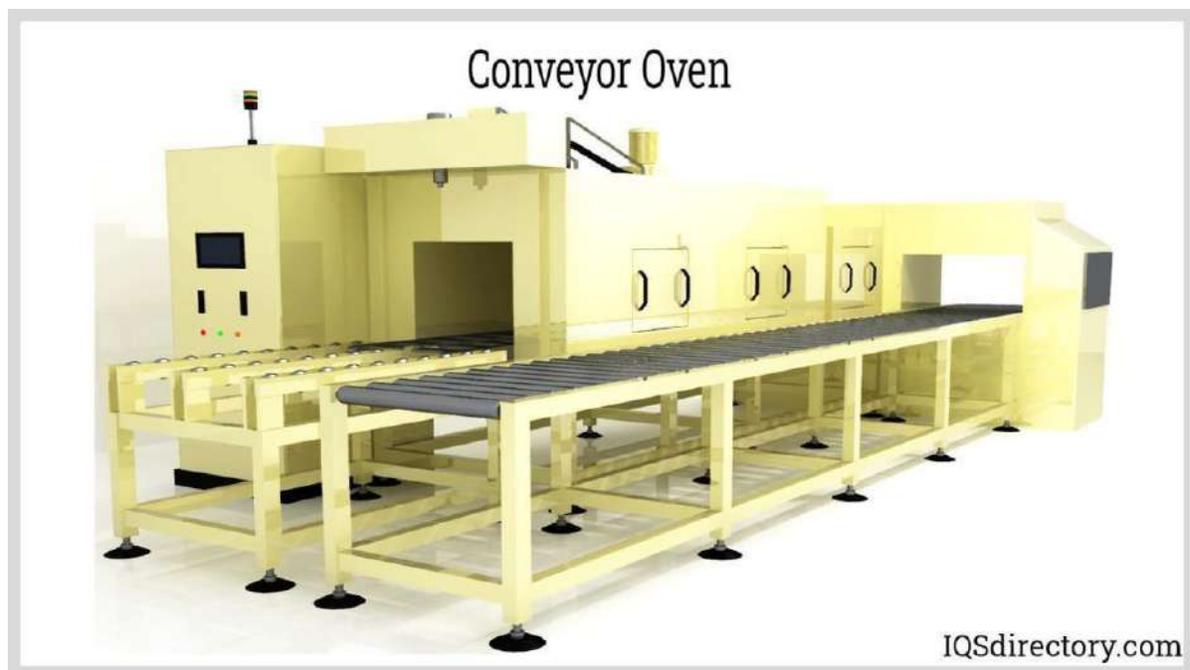


Figure II-8 : Four convoyeur

II.3.8 Four tunnel

Les fours à tunnel sont des unités de cuisson en mode continu et sont couramment utilisés dans les boulangeries à grande échelle. Cette unité possède généralement une longue chambre de cuisson (généralement de plus de 80 mètres de longueur) comme le montre la figure suivante, qui va d'un côté (point de chargement) à l'autre (point de déchargement)

sur une bande transporteuse droite. Le matériau de la bande transporteuse peut être en treillis métallique ou en tôle d'acier au carbone.

Les fours à tunnel sont généralement alimentés par des combustibles tels que le gaz naturel (utilisé pour la cuisson) et l'électricité (pour l'air circulation et le système de transport). La chambre de cuisson peut être divisée en plusieurs zones de cuisson. Cela permet l'application d'une séquence de température, offrant ainsi au boulanger une plus grande flexibilité dans les conditions de cuisson et une plus grande complexité dans le contrôle des paramètres de cuisson. [22].

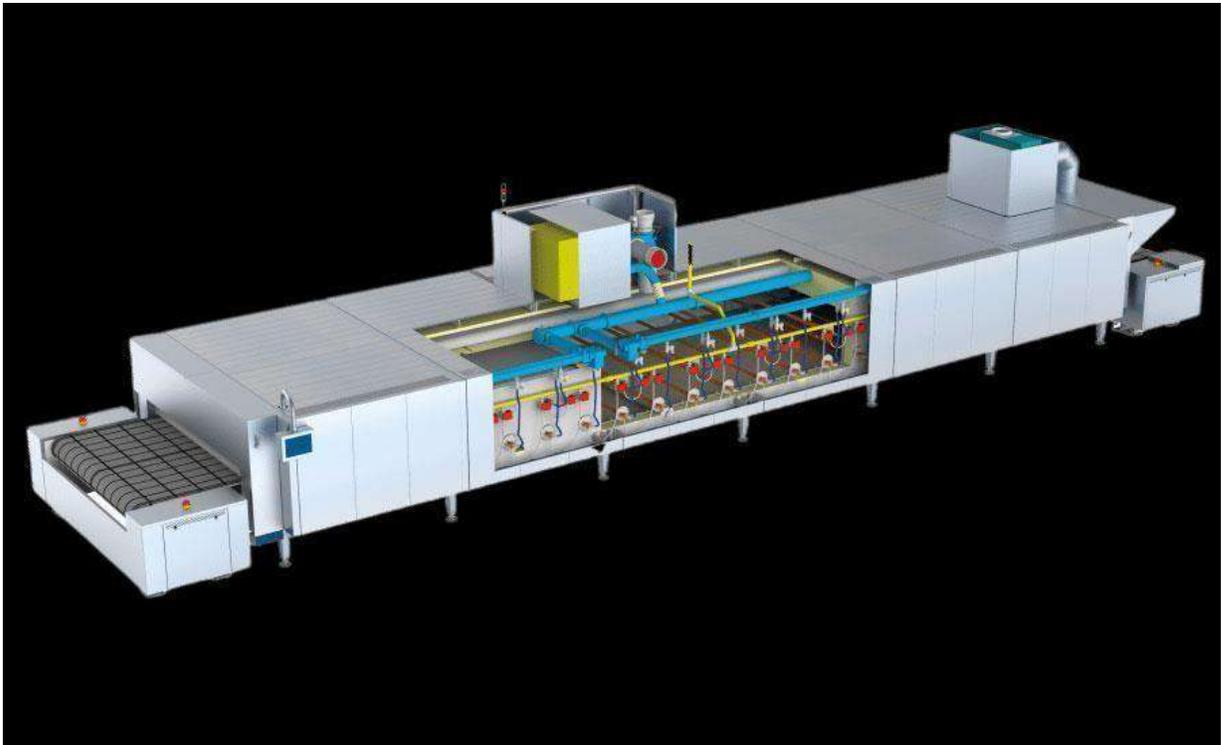


Figure II-9 : Four tunnel

II.3.9 Four hybride

Les fours hybrides combinent les trois modes de transfert de chaleur et tirent parti de leur effet synergique sur les produits. [19].

Ce type de four nécessite généralement un haut degré d'automatisation car sa construction, ses systèmes de contrôle et ses sources d'énergie sont trop complexes pour être manipulés manuellement comme le montrent les deux figures suivantes :



Figure II-10/11 : Four hybride

II.4 LE FOUR À ÉTUDIER

II.4.1 BONGARD 10.83 ROTARY RACK OVEN

Conçu pour la cuisson de tous types de produits, le four à chariot électrique de Bongard est idéal pour les pâtisseries et les petites boulangeries et est disponible en 3 formats de taille, le plus grand étant conçu pour une production à grande échelle [25].

Le chariot tourne sur un plateau tournant à l'intérieur de la chambre de cuisson, ce qui permet de déposer facilement de la vapeur sur le produit, créant ainsi plus de volume, une meilleure croûte et une couleur uniforme. Les fentes de soufflage d'air réglables permettent une circulation d'air optimale, garantissant ainsi une cuisson uniforme pendant toute la durée du cycle [25].

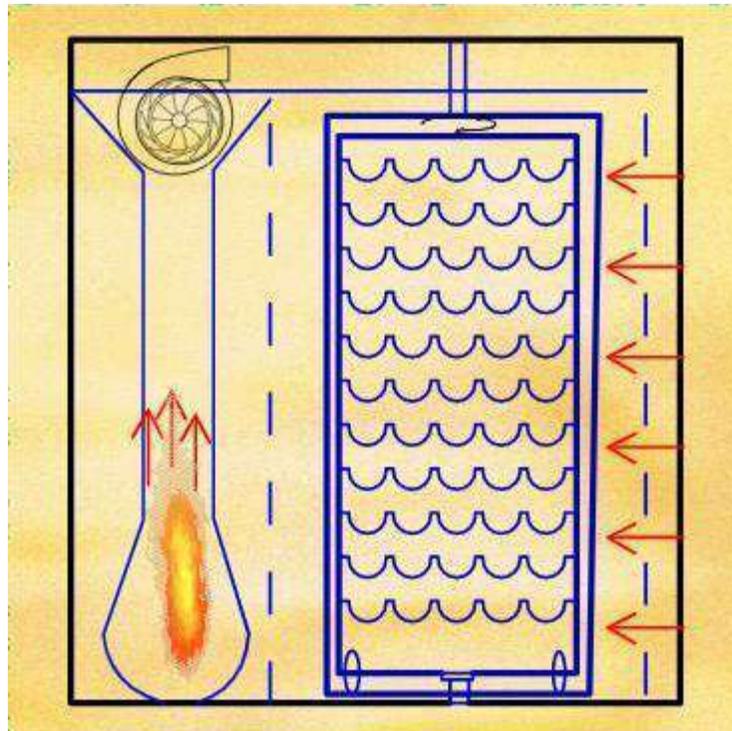


Figure II-12 : Transfert de chaleur

Un dispositif de rampe amovible et pliable permet une jonction continue autour de tout le cadre de la porte pour garantir une étanchéité parfaite. La grande fenêtre de la porte à

double vitrage maximise la visibilité du produit en cuisson, offrant ainsi un contrôle visuel pratique du processus de cuisson. [25].



Figure II-13: Machine Bonnard 10.83 rotary rack oven

II.4 .2 Feature du Bongard 10.83 Rotary Rack Oven:

| | |
|---|---|
| Disponible en 3 options de taille | Accepte un seul rack d'une capacité maximale de 18 plateaux |
| La grille rotative assure une cuisson homogène et homogène | Convient aux tailles de plateaux 400 mm x 600 mm, 460 mm x 800 mm, 760 mm x 980 mm ou 800 mm x 1000 mm - selon le modèle |
| — Récupération rapide de chaleur | Plaques généreuses et épaisses de laine de roche l'isolation offre une rétention de chaleur exceptionnelle |
| Convection à air forcé - l'air est réparti uniformément dans la chambre | Petite empreinte peu encombrante |
| Le panneau de commande à écran tactile convivial peut stocker jusqu'à 30 programmes | Configuration de porte gauche ou droite |
| Rampe d'accès amovible | La grande fenêtre à double vitrage maximise la visibilité du produit de boulangerie |
| Construction hygiénique en acier inoxydable, à l'intérieur et à l'extérieur | |

Tableau II -1 : Feature du Bongard

II.4 .3 Specifications du Bongard 10.83 Rotary Rack Oven :

| Specifications of 64 Trays Gas Rotary Oven | |
|--|--|
| Matériaux du Couvert externe | stainless steel 201 (can customize to be SUS304) |
| Matériaux de la chambre de cuisson | stainless steel 304, food grade. (can be customized to be SUS316.) |
| Mode de Rotation | Bottom Rotation (stable) |
| Température interval | ~400°C |
| Puissance Electrique | 3 Phase, 380V, 50Hz or 60Hz |
| capacité de chaleur | 72kw |
| LPG consommation | 4.80 L/H |
| LNG consommation | 5.45 L/H |
| Moteur de rotation | 2.5kw |
| Dimensions de Tray | 400*600mm |
| Dimensions de Trolley | 670*820*1700 mm |
| Dimensions de Chambre | 1750*1750*1800 mm |
| Dimensions total | 2600*2350*2300 mm |
| Dimensions de cuisson | 2660*2300*2250 mm |
| Poids | 2000 kg |

Tableau II -2 : Specifications du Bongard 10.83 Rotary Rack Oven

II.4 .4Une cuisson idéale et des qualités de construction qui font la différence :

a. Une cuisson sans pression :

L'échangeur de grande dimension, le volume important des chambres de cuisson et l'utilisation de turbines de ventilation à grand débit, permettent d'obtenir une cuisson sans dessèchement.

b. Une cuisson dans une atmosphère régulière, sans pression :

Un tube de décompression muni d'un clapet autorégulé maintient, dans la chambre de cuisson, une pression voisine de zéro permettant ainsi le parfait développement des produits [26].

c. Un flux d'air maîtrisé :

Les fentes de soufflage réglables permettent une optimisation de la circulation du flux d'air garantissant ainsi une cuisson homogène sur toute la hauteur du chariot [16].

II.6. Conclusion

En conclusion, le four de boulangerie moderne est un équipement essentiel pour les pâtisseries et les petites boulangeries. Il offre une solution efficace et pratique pour la cuisson de divers produits. Grâce à ses fonctionnalités avancées telles que la rotation du chariot, l'injection de vapeur, la circulation d'air optimisée et la régulation précise de la température, il permet d'obtenir des résultats de cuisson de haute qualité.

La technologie utilisée dans ces fours permet une distribution uniforme de la chaleur, assurant ainsi une cuisson homogène des produits. Les dispositifs de contrôle et de surveillance intégrés facilitent le suivi et l'ajustement des paramètres de cuisson en fonction des besoins spécifiques. De plus, la conception moderne des portes et des fenêtres offre une excellente visibilité du processus de cuisson, ce qui permet aux boulangers de surveiller et de contrôler facilement la progression des produits.

En conclusion, le four de boulangerie moderne représente une innovation importante dans le domaine de la cuisson des produits de boulangerie. Grâce à ses performances avancées, sa facilité d'utilisation et ses fonctionnalités adaptées aux besoins spécifiques des boulangers, il joue un rôle crucial dans la production de produits de haute qualité et dans la réussite des entreprises de boulangerie.

Chapitre III

SIMULATIONNUMERIQUE

Chapitre III

Simulation numérique

III. I Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons de la solution des équations de transfert de chaleur, et ces modèles sont devenus des compléments indispensables aux travaux expérimentaux et des outils puissants dans l'étude de la chaleur interne de la boulangerie.

Les simulations numériques à l'aide de logiciels (ANSYS) ont été largement utilisées dans l'Analyse de la chaleur contenue dans la boulangerie et émise par le four.

Cette approche peut guider l'ajustement réaliste pour une large gamme de conditions limites et d'ingénierie, Parce qu'il peut diriger le champ de contrôle vers la boulangerie et la maison voisine ou l'adhésif dans la boulangerie

III. 2 Modèle Mathématique

Nous utilisons souvent des modèles physiques pour étudier le phénomène de transfert de chaleur dans les boulangeries et les maisons avoisinantes. Ces modèles sont généralement basés sur la résolution numérique des équations de transport (équations de la mécanique des fluides). Ces modèles nous permettent de décrire le climat intérieur des boulangeries en déterminant les domaines de ces paramètres, tels que la température et les domaines de vitesse. Nous présentons le modèle physique complet qui simule les mouvements de l'air dans le conduit du four, en se basant sur les équations fondamentales de conservation.

III.2.1.L'échangeur de chaleur

Choix du type de l'échangeur

La récupération maximale de la chaleur dégagée du four l'installation d'un échangeur de chaleur multi-tubes qui permet le passage d'un grand débit des gaz brûlés et n'influe pas sur l'échappement des gaz par la création d'un freinage. Les seules températures qui peuvent être mesurées sont celles des entrées des gaz brûlés et l'air froid. Donc, on opte à l'utilisation de la méthode d'efficacité.

III.3.1 Efficacité de l'échangeur de chaleur air-air :

L'efficacité d'un échangeur : est le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur aux flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les mêmes conditions ; température d'entrée des deux fluides.

Dans l'unité d'échangeur de chaleur air-air, l'air s'écoule pendant une longue période est supérieur au dispositif d'échangeur de chaleur. La quantité de chaleur de récupération est entre 70- 90 %. Les unités d'échangeur de chaleur air-air sont longues, rectangulaires et peu profondes.

III.3.2 Méthode de dimensionnement de d'échangeur

Il existe deux méthodes essentielles pour le calcul et dimensionnement de l'échangeur, **mais, dans notre cas celle de l'efficacité est plus commode.**

III.3.2.1. Méthode de NUT-efficacité

L'approche LMTD de l'analyse des échangeurs de chaleur est utile lorsque les températures d'entrée et de sortie sont connues ou faciles à déterminer. Le LMTD est alors facilement calculé et le flux de chaleur, la surface ou le coefficient de transfert de chaleur global peuvent être déterminés. Lorsque les températures d'entrée ou de sortie doivent être évaluées pour un échangeur de chaleur donné, l'analyse implique fréquemment une procédure itérative en raison de la fonction logarithmique dans le LMTD. Dans ce cas, l'analyse est effectuée plus facilement en utilisant une méthode basée sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur à transférer une quantité donnée de chaleur. La méthode de l'efficacité offre également de nombreux avantages pour l'analyse de problèmes dans lesquels une comparaison entre différents types d'échangeurs de chaleur doit être effectuée dans le but de sélectionner le type le mieux adapté pour atteindre un objectif particulier de transfert de chaleur.

L'efficacité de l'échangeur :

$$\eta = \frac{\text{fluxdec aleurréel}}{\text{fluxdec aleurmax}}$$

III.1

-En choisissant l'efficacité de l'échangeur sur la courbe **Figure III-1** on trouve : *NTU*

-On cherche à déterminer la longueur du tube :

Le nombre "number of transferunits" NTU est exprimé par :

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (III.2)$$

L'expression du terme UA est l'inverse la résistance thermique totale du tube chaud. La résistance thermique totale est :

$$R_{tot} = \frac{1}{fA_f} + R_{wall} + \frac{1}{cA_c} \quad (III.3)$$

La résistance thermique du tube chaud est :

$$R_{wall} = \frac{r_{ex}}{\ln \left(\frac{r_{ex}}{r_{in}} \right)} \quad (III.4)$$

$$2\pi\lambda L$$

Les surfaces intérieur et extérieur du tube chaud :

$$A_f = 2\pi r_{in} L \quad \text{and} \quad A_f = 2\pi r_{ex} L$$

$$C_{min} = m' c_c$$

$$C_{max} = m' c_h$$

Où :

r_{in} et r_{ex} sont respectivement les rayons des gaz brûlés dans l'échangeur $m' c_c$ et $m' c_h$ sont respectivement les débits massiques d'air et de gaz brûlés C_c et C_h sont respectivement les pouvoirs calorifiques de l'air et des gaz brûlés

En calculant le taux C_{min}/C_{max} et en choisissant le niveau d'efficacité, la valeur NTU peut être extraite à l'aide de la méthode graphique (voir figure III.1) de l'échangeur de chaleur croisé. Ensuite, en fixant le diamètre du tube, il reste un paramètre inconnu (la longueur L) qui peut être déterminé facilement.

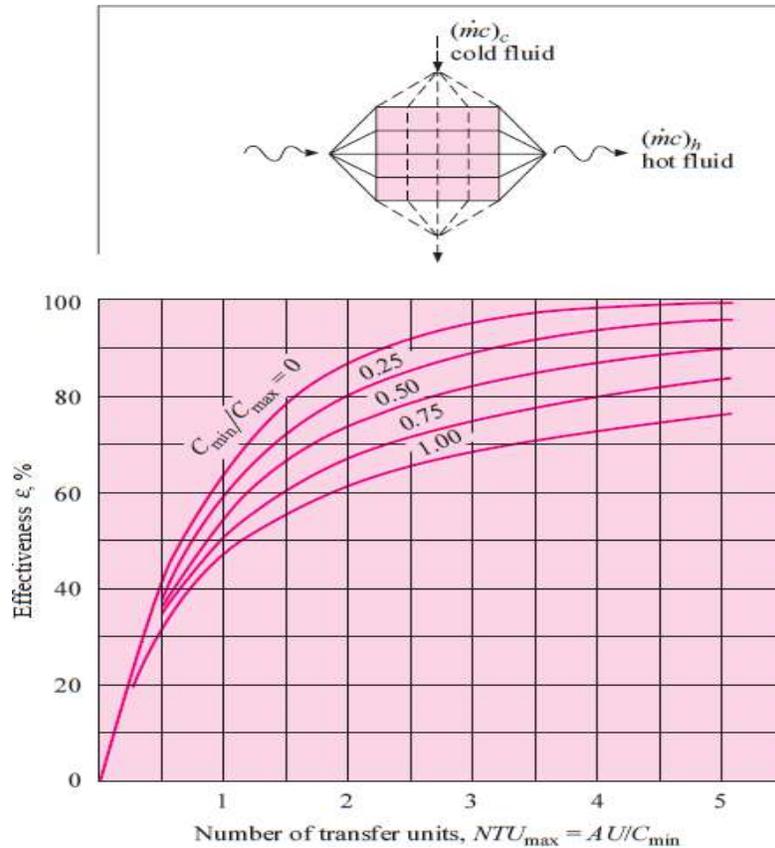


Figure III-1 Efficacité d'un l'échangeur à courant croisé.

III. 4. Modélisation de l'écoulement d'air dans la résidence

Pour étudier le phénomène de la convection, on utilise souvent des modèles physiques qui consistent à la résolution numérique des équations de transport. Ces modèles nous permettent de caractériser l'écoulement en déterminant les champs de ces paramètres, els que la température, les champs des vitesses. On présente le modèle physique complet qui simule les mouvements d'air sous et qui s'appuie sur les équations de conservation.

III.4.1. Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de masse. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \tag{III. 5}$$

Où ρ est la masse volumique et V est la vecteur vitesse.

III.4.2. Equation de quantité de mouvement

L'équation de Navier-stokes s'exprime par la 2^{ème} lois fondamentale de la dynamique. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivant :

$$\frac{D}{Dt}(\rho V) = \rho F - \text{grad}(P) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div } V) \quad (\text{III. 6})$$

Où F est une force par unité de volume, μ est la viscosité dynamique et P Pression motrice.

III.4.3. Equation d'énergie

L'équation d'énergie est obtenue à partir de premier principe de la thermodynamique, s'exprime comme suit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q + \beta T \frac{DP}{DT} + \mu \Phi \quad (\text{III. 7})$$

Où

C_p : Chaleur spécifique. q : Puissance volumique dissipée.

λ : Conductivité thermique.

β : Coefficient de dilatation. : La dissipation visqueuse.

Puisque la convection est mixte on ajoute l'équation de Boussinesq:

$$\rho = \rho_o (1 - \beta(T - T_o)) \quad (\text{III. 8})$$

Où : ρ_o et T_o sont la masse volumique et la température

β est le coefficient d'extension isobare du fluide: $\beta = \frac{1}{\rho} + \left(\frac{\partial T}{\partial \rho}\right)_{p=\text{cst}}$

III.4.4. Mesures expérimentales

Pour déterminer les conditions aux limites nous avons mené des mesures expérimentales de la température et la vitesse à la sortie de l'échappement des gaz brûlés du four. Ainsi, la mesure de la température à l'intérieur de la boulangerie et la vitesse de l'air sortant du ventilateur d'aération de la boulangerie. Enfin, la mesure de la température ambiante à l'extérieur de la boulangerie. Les appareils de mesures utilisés sont : un thermomètre type k et une vélocimétrie à hélice avec un afficheur numérique.

III.5. Simulation numérique

Ce sont les méthodes numériques, qui nous s'intéressent à trouver une approximation bien précise de la résolution des problèmes. Pour les résoudre il faut utiliser une méthode numérique telle que la méthode des volumes finis, la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis. Dans la présente étude, on a utilisé la méthode des volumes finis avec des volumes de contrôle quadrilatéraux. Le schéma de discrétisation employé est de type polynomial et le couplage vitesse-température est calculé selon l'algorithme SIMPLE, la résolution de problème est effectuée par le code ANSYS, basé sur la méthode des volumes finis.

III.5.1. Le code ANSYS

Il est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. ANSYS est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandu dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) En raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Il est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont:

- ❖ Des mailles en 2D, triangulaire/quadratique/linéaires ;
- ❖ Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- ❖ Des mailles (hybrides) mixtes.

III.5.2. Domaine de calcul et Condition aux limites

Dans cette étude, nous nous intéressons au comportement thermique de la chambre située au-dessus de la boulangerie. La pièce mesure 7 mètres de long, 5 mètres de large et 3 mètres de haut. L'écoulement est considéré comme un état laminaire et stationnaire. Le domaine de calcul comprend tout l'espace intérieur de la pièce avec ces dimensions 3D réelles (voir Figure III-2).

Les conditions prises dans le cadre du compte au cours de la journée 05/05/2023 sont les suivantes : Ce fichier est les résultats du premier cas avec 2 vitesses imposées.

$T_{ech} = 140C^{\circ}$ / $D_{ech} = 200\text{ mm}$ / $T_{entrée} = 30\text{ C}^{\circ}$ (En hiver) / $T_{Platform} = 7\text{ m}$

débit T = 2.05 m^3 / débit gaz = 25 m^3 /

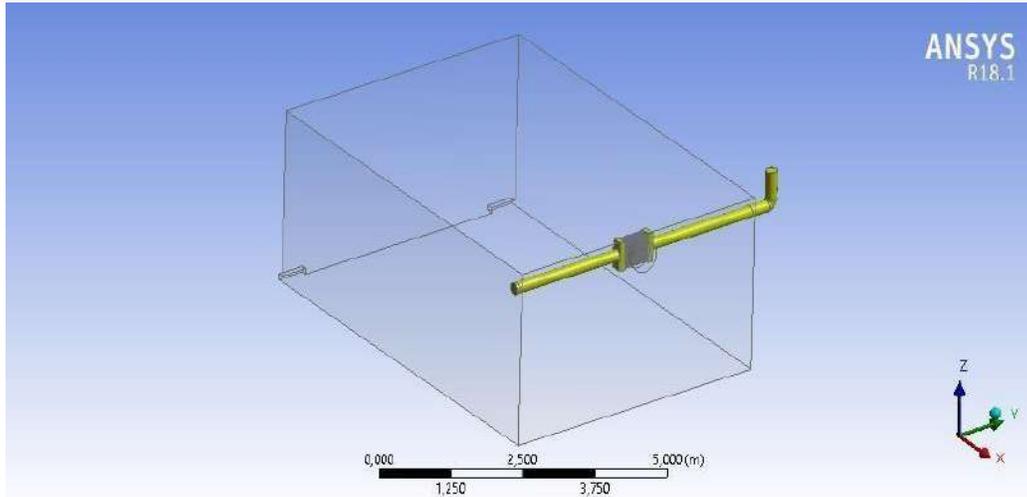


Figure III-2 : Domaine du calcul et position de l'échangeur

III.5.3. Test de maillage

Afin de vérifier que le maillage mis en place pour le modèle simulé est correct et donne des résultats corrects, on réalise des tests de maillage. On commence des simulations avec un nombre réduit des mailles. Ensuite, on augmente le nombre de mailles et on répète les simulations jusqu'à la convergence du paramètre choisi avec l'erreur fixée. Dans notre étude, on a opté au paramètre de la température au milieu de la résidence avec une erreur de 10^{-8} . La convergence est atteinte à un nombre de 696872425 mailles.

La figure III-3 montre le maillage du hall de la résidence, on effectue le raffinement des mailles proche des murs où les des variables est plus important.

La figure III-4 montre l'emplacement du ventilateur derrière l'échangeur de chaleur pour aspirer de l'air de l'intérieur de la boulangerie. Cet air est plus chaud ce qui va augmenter le rendement de système du chauffage.

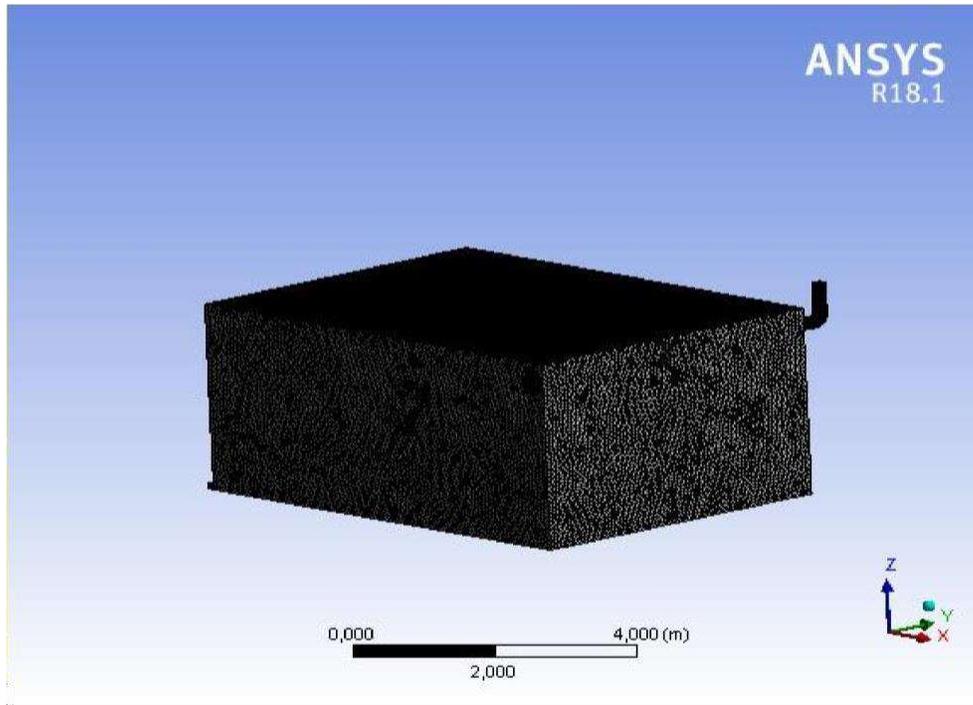


Figure III-3 : Maillage du domaine de calcul

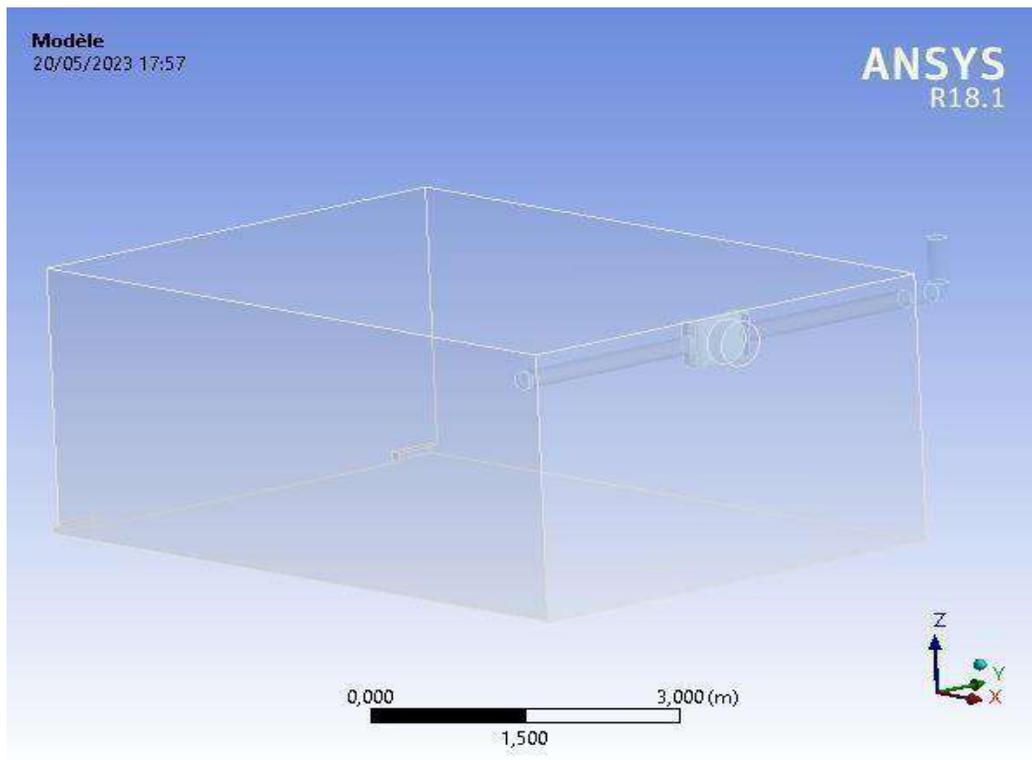


Figure III- 4: Position du ventilateur

III.6. Résidence avec des ouvertures

Dans le cas d'une maison avec deux ouvertures pour l'entrée et la sortie d'air. Les gaz brûlés ramènent la chaleur émanant du four passe à travers un tuyau qui chauffe la maison. Il y a une ouverture dans la maison pour permettre à l'air chaud de sortir de la boulangerie. Au milieu du tuyau à l'intérieur de l'enceinte devant l'ouverture se trouve un ventilateur pour aspirer l'air de l'intérieur de la boulangerie et augmenter la température d'entrée. ce système est examiné dans deux situations différentes avec des vitesses de ventilateur différents.

a. Premier cas : Air du ventilateur à $v=1$ m/s

La figure III-5 montre l'évolution de la température interne dans le sens horizontal sur le milieu de 2,5 m en utilisant une vitesse d'air de 1 m/s. Nous remarquons que la température est basse à côté du mur, puis elle augmente, et elle reste presque constante jusqu'à ce qu'elle atteigne la fin de l'espace, puis elle redescend près du l'autre mur.

La figure III-6 montre les profils de température en coupes transversale et longitudinale. On constate que la température est basse au milieu et à l'extrémité de l'enceinte, alors qu'elle est élevée à côté du tube et du ventilateur selon les deux tronçons, et qu'il y a une élévation de température à l'entrée du tube.

Les figures III-7 et III-8 montrent l'évolution des vitesses dans les sections transversales et longitudinales lorsque la vitesse d'air est à $V = 1$ m/s. On observe un faible vitesse à l'intérieur du local en raison d'une ventilation très éloignée qui entraîne le transfert d'air froid de l'extérieur vers l'intérieur de local. Mais, la vitesse demeure élevée près du ventilateur.

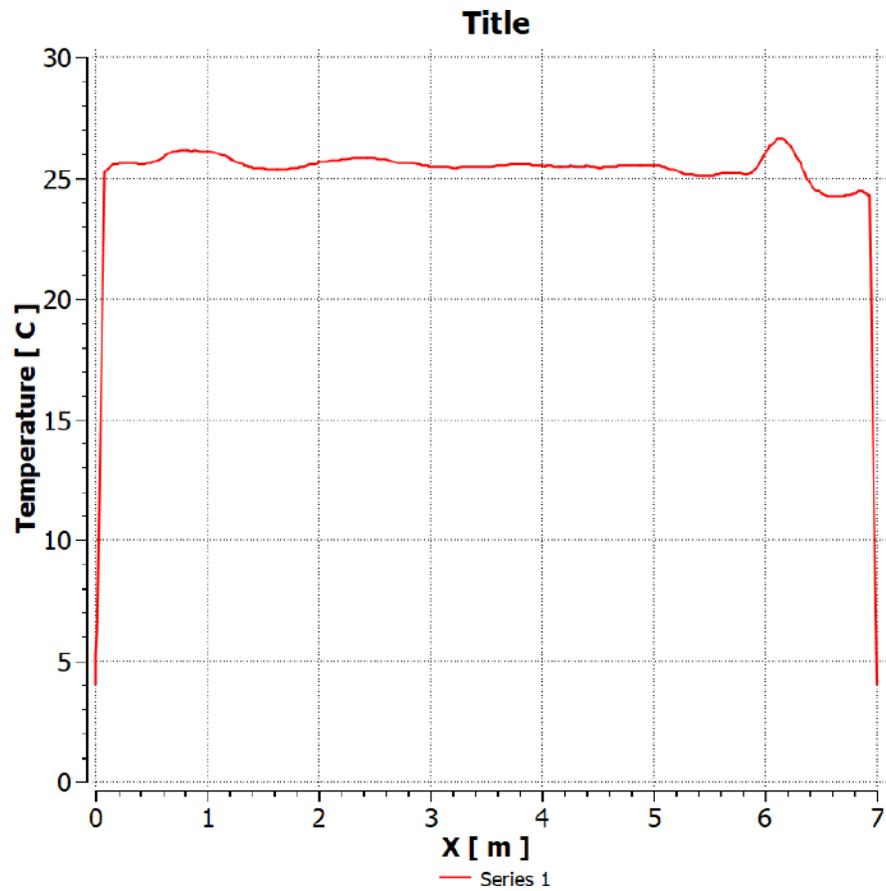
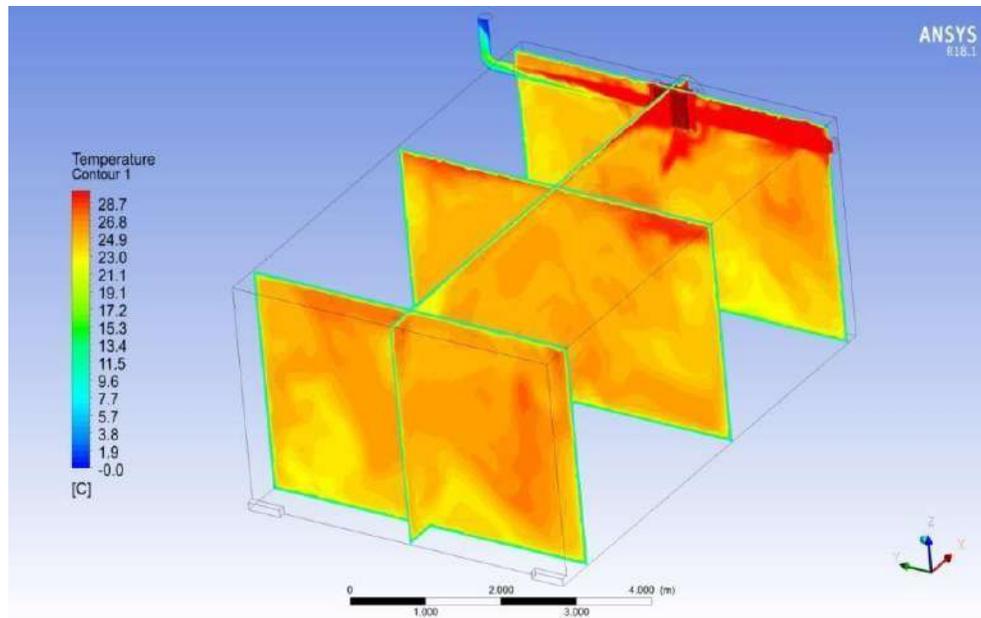
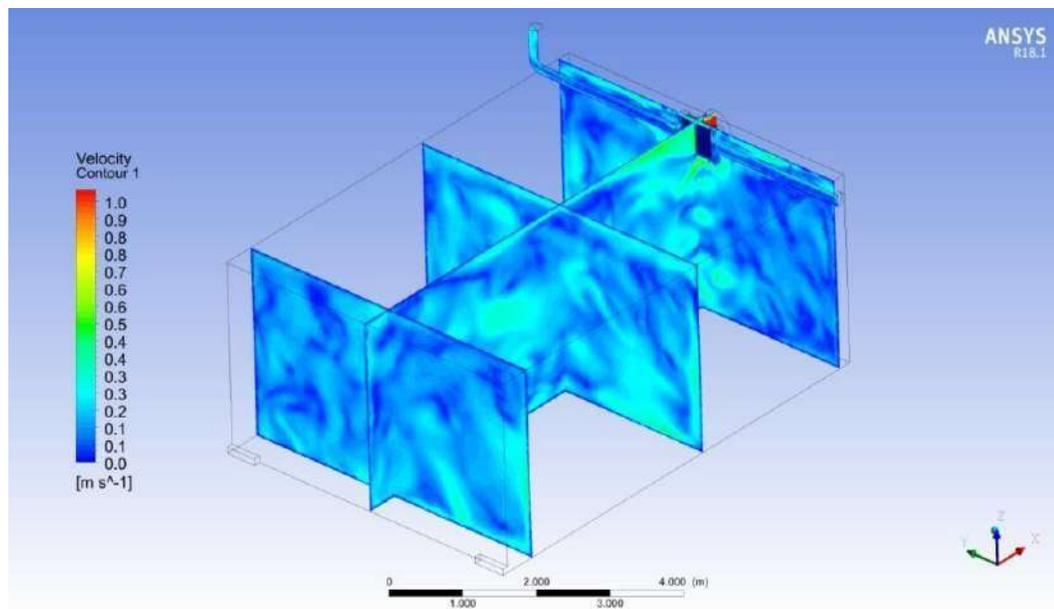


Figure III-5 : Température interne sur la ligne médiane ($Y=2.5$ $Z= 1.5$) à $V=1$ m/s



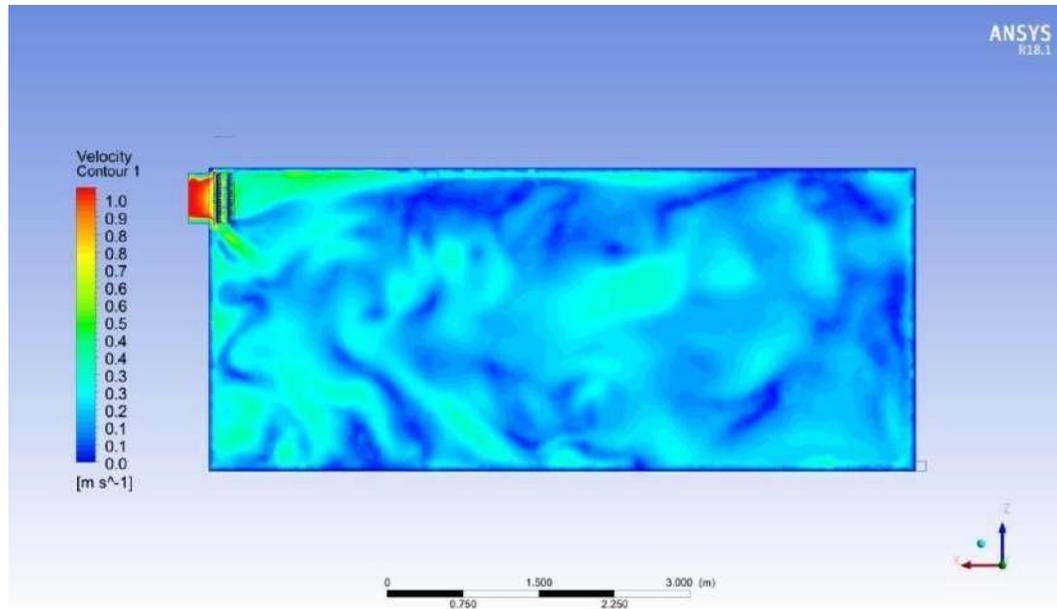
b.

Figure III-6 : Contours de température dans la section longitudinale et transversales. (Plan : ZX , Y= 2,5 / YZ, X= 6.8- 0.5-4 m) à V=1 m/s



c.

Figure III-7 : Vitesses dans les sections transversales et longitudinale à V = 1 m/s (Plans : ZX , Y= 2,5 / YZ, X= 6.8- 0.5-4 m)



d.

Figure III-8 : Vitesses dans la section longitudinale à $V = 1 \text{ m/s}$ (Plan ZX ;Y=2.5)

b. Deuxième cas : air du ventilateur à $V=0.5 \text{ m/s}$:

La figure III-9 illustre l'évolution de la température interne dans la direction horizontale sur une distance de 2,5 mètres. On remarque que la température est basse, puis elle augmente brusquement et reste presque constante, puis elle croît légèrement à nouveau, puis elle chute jusqu'à atteindre la fin du local. Notant que le chauffage est plus meilleur que le cas à $V=1 \text{ m/s}$ cela est due au temps de l'évacuation de chaleur du local est plus grand.

On constate que la réduction de la vitesse de l'air près du ventilateur situé en haut, la température diminue au niveau du plafond, à côté du tuyau et du ventilateur, en raison de la réduction de la vitesse du ventilateur. D'autre part, une augmentation de la température ou de la vitesse du ventilateur a un effet positif sur le chauffage de l'enceinte. Par conséquent, pour favoriser l'impact de l'augmentation de la température d'entrée, il est préférable d'augmenter la vitesse du ventilateur.

La figure III-10 montre les caractéristiques de la température dans les sections transversales et longitudinales. On peut observer que la température est basse à

L'extrémité du local, tandis qu'elle est élevée près du tuyau et du ventilateur, ainsi qu'au milieu de local. Elle est également très élevée au plafond, et il y a une augmentation de la température à l'entrée du tuyau.

Les figures III-11 et III-12 montrent les vitesses dans les sections transversales et la section longitudinale lorsque la vitesse d'air diminue à $V = 0,5$ m/s. On note qu'une faible baisse de la vitesse par rapport au cas $V = 1$ m/s à l'intérieur de la chambre qui est due à la faible ventilation qui provoque la limitation de l'entrée de l'air froid de l'extérieur vers l'intérieur.

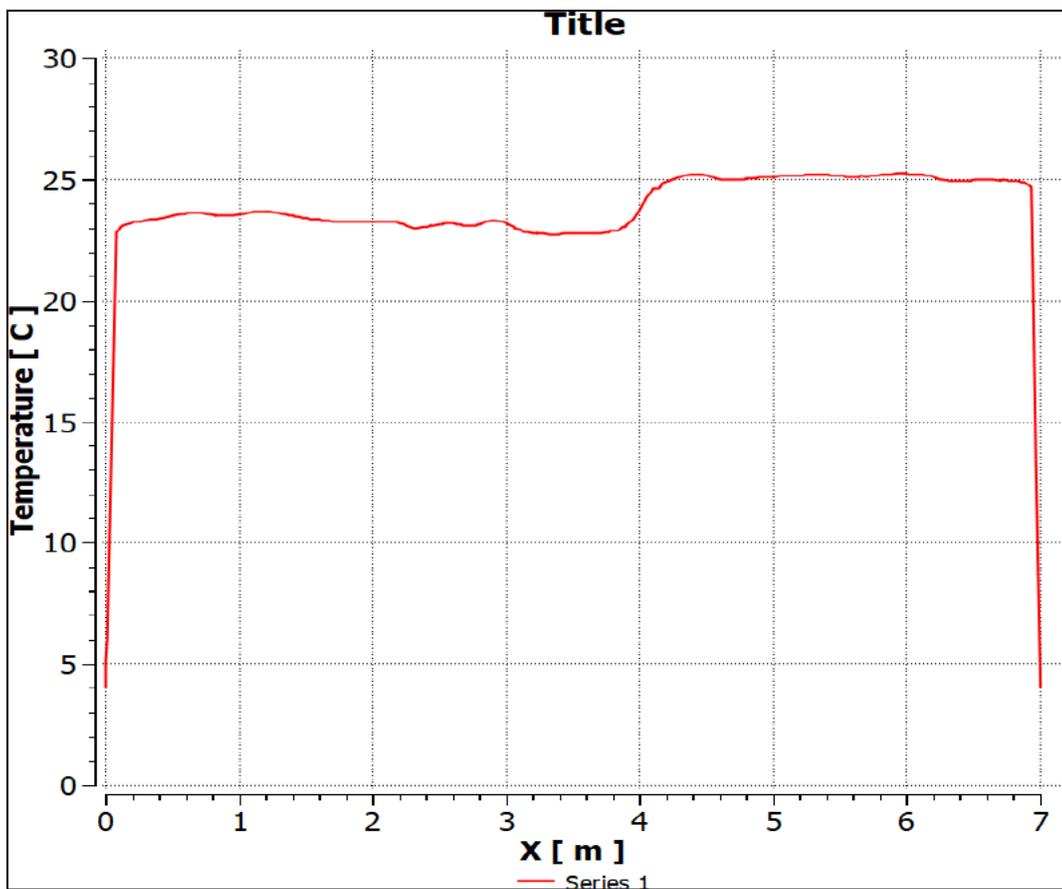


Figure III-9 : Température interne sur la ligne médiane ($Y=2.5$ $Z= 1.5$) à $V=0.5$ m/s

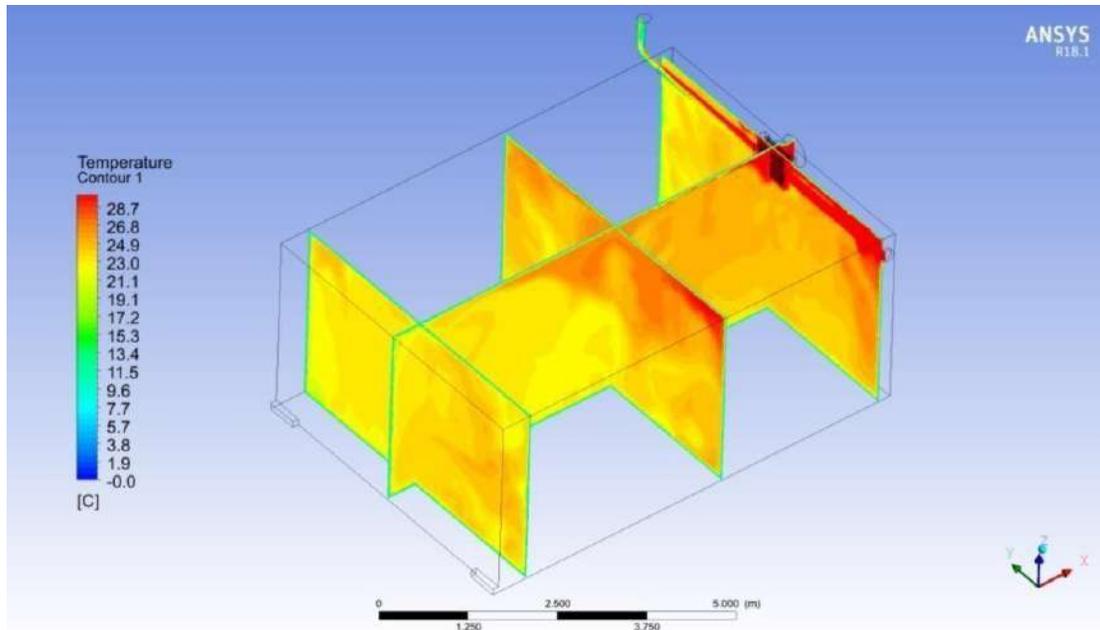


Figure III-10 : Contours de température dans la section longitudinale et transversales.(Plans : ZX , Y= 2,5 / YZ, X= 6.8- 0.5-4 m) à V=0.5 m/s

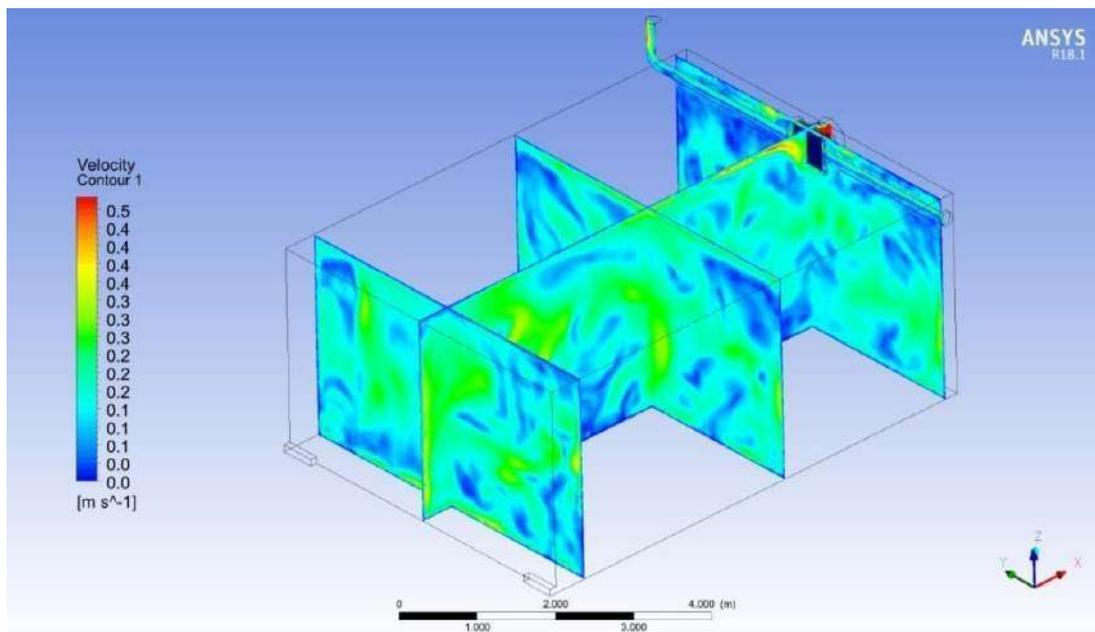


Figure III-11 : Vitesses dans les sections transversales et longitudinale à V = 0.5 m /s . Plans : ZX , Y= 2,5 / YZ, X= 6.8- 0.5-4 m

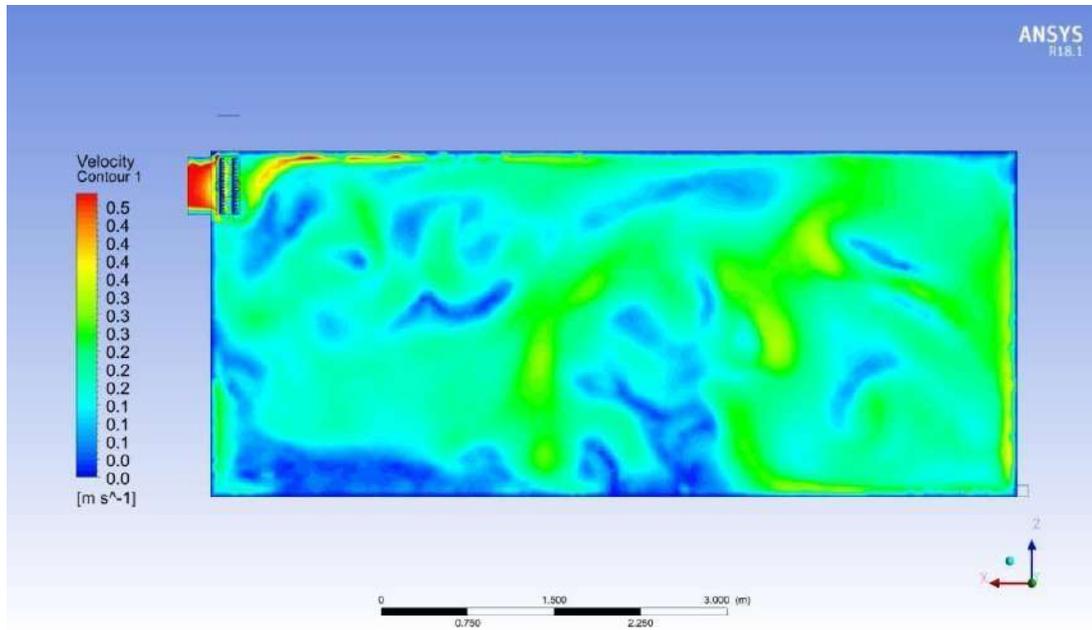


Figure III-12 : Vitesses dans la section longitudinale à $V = 0.5 \text{ m /s}$ (Plan ZY=2.5)

III.8.Conclusion

À l'aide du logiciel de mécanique des fluides, qui permet l'analyse des équations de transport, nous avons simulé les champs de températures et vitesses. La simulation de la température à l'intérieur de la maison voisine de la boulangerie en utilisant une approche CFD permet de contourner les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale du problème et de réaliser des simulations plus proches de la réalité avec des conditions parfois inaccessibles par les techniques classiques.

L'utilisation de ce programme CFD et d'échangeur de chaleur a permis de réguler la température à l'intérieur de la maison en réduisant l'impact de la chaleur produite par le four. Cela a conduit à une amélioration du confort thermique à l'intérieur de la maison en optimisant la circulation de l'air et en dissipant l'excès de chaleur ce qui a permis d'atteindre une température de 23 °C.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'évaluation et l'exploitation de la chaleur dégagée par un four de boulangerie pour améliorer le conditionnement d'air tant au lieu de travail que dans une résidence offrent des perspectives prometteuses. Cette étude a mis en évidence les avantages potentiels de la récupération de chaleur dans le domaine de la boulangerie, en contribuant à la rationalisation de la consommation d'énergie et à l'amélioration du confort thermique.

En exploitant la chaleur excédentaire du four de boulangerie, il est possible de réduire les pertes énergétiques et d'utiliser cette source d'énergie gratuite pour améliorer le conditionnement d'air. Les résultats de cette étude ont démontré que la récupération de chaleur peut conduire à une amélioration significative du confort thermique à la fois sur le lieu de travail et dans une résidence voisine.

Les techniques de récupération de chaleur, telles que l'utilisation d'échangeurs de chaleur et de systèmes de circulation d'air, ont montré leur efficacité pour exploiter la chaleur dégagée par le four de boulangerie. De plus, les simulations numériques réalisées à l'aide du code ANSYS ont permis d'évaluer les performances et les avantages potentiels de cette approche.

L'exploitation de la chaleur dégagée par le four de boulangerie contribue également à la durabilité environnementale en réduisant la consommation d'énergie et en minimisant les émissions de gaz à effet de serre. Cela représente une étape importante vers une industrie de la boulangerie plus respectueuse de l'environnement.

Enfin, l'évaluation et l'exploitation de la chaleur dégagée par un four de boulangerie pour améliorer le conditionnement d'air offrent des avantages économiques, énergétiques et environnementaux significatifs. Il est essentiel de promouvoir et d'encourager l'adoption de telles pratiques dans l'industrie de la boulangerie afin de favoriser une utilisation plus efficace des ressources et d'améliorer le confort des travailleurs et des résidents.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1]. Ashton, John (1904). William Clowes, ed. *The History of Bread from Pre-historic to Modern Times* (en inglés) (primera edición). Londres: The Religious Tract Society. P. 532.
- [2]. Jerónimo de Estridón menciona a venabrutapascuntur animalia. Véase: *Dialogus contra Pelagianos*
- [3]. François Couplan, *Le Régal végétal. Plantes sauvages comestibles*, Éditions Ellebore, 2009,
- [4]. Paul-Jacques Malouin, *Descriptions des arts et métiers*, por Desaint & Saillant, Paris, 1767. Reedición : Slatkine, Genève, 1984. Partiellement réédité sous le titre *L'Art de la boulangerie ou description de toutes les méthodes de pétrir, pour fabriquer les différentes sortes de pastes et de pains*, Saillant & Noyon, Paris, 1779.
- [5]. Harvey Lang, Jenifer (2001). Prosper Montagné, ed. *Larousse Gastronomique* (en inglés) (tercera (inglesa) edición). Clarkson Potter.
- [6]. Saturnino, Romy; Annie Mitra (1994). *Scholastic: Pizza* (en inglés) (primera edición). Scholastic Australia. ISBN 1863884025.
- [7]. Julius E. Wilfahart, *A Treatise on Baking*, [Fleischman Division, Standard Brands Incorporated: New York, 1907
- [8]. Ronald Sheppard and Edward Newton, *The Story of Bread*, Lond. : Routledge, 1957
- [9]. <http://technomitrone.com/culture-professionnelle-2/histoire-de-la-boulangerie/>
- [10] I. Zheleva and V. Kambourova. Identification of Heat and Mass Transfer Processes in Bread during Baking. *Thermal Science*. 2005, 2: 73-86.
- [11] M. R. Zareifard, V. Boissonneault and M. Marcotte. Bakery Product Characteristics as Influenced by Convection Heat Flux. *Food Research International*. 2006, 42: 856-864.
- [13] O. D. Baik, S. Grabowski, M. Trigui, M. Marcotte and F. Castaigne. Heat transfer coefficients on cakes baked in a tunnel type industrial oven. *Journal of Food Science*. 1999, 64(4): 688-694.
- [14] K. Oppenheim. Radiation Analysis by the Network Method. *Transactions of the ASME*. 1956, 54: 725-735.

Références bibliographiques

- [15] S. Saedodin, M. Torabi, J. M. Kandelousi and N. Maghsodloo. Application of Net Radiation Transfer Method for Optimization and Calculation of Reduction Heat Transfer, Using Spherical Radiation Shields. *World Applied Sciences Journal*. 2010, 11 (4): 457-461.
- [16] J. Zueco, P. Eguía, E. Granada, J. L. Míguez and O. A. Bég. An electrical network for the numerical solution of transient mhd couette flow of a dusty fluid: Effects of variable properties and hall current. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37: 1432–1439.
- [17] Mukherjee S, Asthana A, Howarth M, and Mcniell R, –Waste heat recovery from industrial baking ovens, *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 321–328, Sep. 2017.
- [18]. Gisslen, W. –Baking and Pastry Equipment. *Professional Baking*, 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2017, p. 45.
- [19]. Davidson, I. –Oven Designs. *Biscuit Baking Technology: Processing and Engineering Manual*, 2nd ed., Elsevier Inc. , 2016, pp. 73–90.
- [20]. Stear, C. A. –Types of Oven and Oven Design. *Handbook of Breadmaking Technology*, Elsevier Science Publishers LTD, 1990, pp. 602–791.
- [21]. Walker, C. E. –Grain-Based Products and Their Processing: Oven Technologies. *Encyclopedia of Food Grains*, 2nd ed., vol. 3, Elsevier Ltd., 2016, p. 328.
- [22]. Conforti, F. D. –Industrial Preparation and Baking of Cakes. *Bakery Products Science and Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 582–583.
- [23]. Manley, D. –Biscuit Baking. *Manley’s Technology of Biscuits, Crackers and Cookies*, 4th ed., Woodhead Publishing Limited, 2011, p. 485.
- [24]. M. Alamir, E. Witrant, G. Della Valle, O. Rouaud, Ch. Josset, and L. Boillereaux. Estimation of energy saving using jet impingement technique in french bread baking. *Research Report*, 2012.
- [25]. M. Attalla and E. Specht. Heat transfer characteristics from in-line arrays of free impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 45(5):537–543, 2009.
- [26]. S. Banooni, S. M. Mujumdar, A.S. Taheran, M. Bahiraei, and P. Taherkhani. Baking of flat bread in an impingement oven: an experimental study of heat transfer and quality aspects. *Drying Technology*, 26(7):902–909, 2008.

Références bibliographiques

- [27]. S. W. Chang, Y. J. Jan, and S. F. Chang. Heat transfer of impinging jet-array over convex-dimpled surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(17-18): 3045–3059, 2006.
- [28]. G. B. Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Princeton Landmarks in Mathematics. Princeton, 1998.
- [29]. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://farjas.com/fr/four-rotatif-parfaitement-allie/&ved=2ahUKEwjb9_fOuqT-AhVtdaQEHV9MC34QFnoECA0QAQ&usg=AOvVaw3Vc2SI3q0KzAeteD1bdRfg
- [30]. <https://www.monoequip.com/commercial-products/bakery-and-food-to-go-ovens/bakery-rack-ovens/electric-powered-bakery-rack-ovens/bongard-6-43-8-43-10-83-rotary-rack-oven>
- [31]. <https://www.monoequip.com/userfiles/files/Bongard%20Series%203%20Rack%20Oven%20Brochure%20%28FR%29.pdf>
- [32]. <http://technomitron.aainb.com/category/la-cuisson/>