



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الهندسة الميكانيكية  
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2019

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTERACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

# Thème

Modélisation numérique du comportement thermique d'un four  
électrique à convection en présence de transfert radiatif

Présenté par :

❖ ASNOUNI Fatima Zahra

**Soutenu le 30/09/2019 devant le jury composé de :**

Président	Dr. GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Mme. BELHACHEMI Aida Amina	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. RETIEL Noureddine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2018 / 2019

# *Dédicace*

*Je tiens avec un grand plaisir à dédier ce modeste travail :*

*À l'être le plus cher de ma vie, mon père. À celui qui m'a  
fait de moi une femme.*

*À Mes chers frères et Sœurs.*

*À tous mes amis, toute personne qui occupe une place dans  
mon cœur.*

*À tous les membres de ma famille et toute personne qui  
porte le nom ASNOUNI, je dédie ce travail à tous ceux qui  
ont participé à ma réussite.*

*ASNOUNI Fatima zahra*



# *Remerciement*

Je tiens à remercier Pr.RETIEL Noureddine, mon encadreur, qui m'a suivi tout au long de cette période et m'a conseillé sur l'orientation que celui - ci devait prendre.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys Mr.GUERMAT Abdelkader et Mme.BELHACHEMI Aida Amina pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Je dois un remerciement à tous les enseignants du département de génie mécanique pour leurs qualités scientifiques et pédagogiques.

Je tiens à remercier chaleureusement, tout mes proches et tout ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir ce Travail.

Liste des figure.....	1
Liste des tableaux.....	2
Nomeclature.....	3
Résumé.....	4
Introduction générale.....	5
I. Chapitre I : Transfert de chaleur.....	6
I.1 Introduction .....	6
I.2 Thermodynamique et transferts thermiques : .....	6
I.3 La chaleur :.....	7
I.4 Les différents modes de transferts de chaleur : .....	7
I.4.1 La conduction thermique :.....	7
I.4.2 le rayonnement thermique : .....	7
I.4.3 la convection thermique : .....	8
I.5 Four électrique :.....	9
I.5.1 Historique :.....	9
I.5.2 Caractéristiques d'un four à résistance : .....	9
I.5.3 Les avantages d'un four électrique :.....	10
I.5.4 Les inconvénients d'un four électrique : .....	10
II. Chapitre II : la modélisation thermique par la méthode nodale .....	11
II.1 Introduction .....	11
II.2 La modélisation thermique par la méthode nodale :.....	11
II.3 Principe de la modélisation nodale :.....	11
II.3.1 Décomposition nodale :.....	11
II.3.2 Création du réseau des échanges de chaleur :.....	12
II.4 Contact parfait entre deux matériaux de conductivités thermiques $\lambda$ différentes :.....	14
II.5 Forme générale des équations de bilan thermique: .....	14
II.6 Analogie entre les grandeurs thermiques et électriques : .....	15
II.7 Objectifs de la modélisation :.....	15
III. Chapitre III : la modélisation numérique d'un four électrique.....	16
III.1 Introduction: .....	16
III.2 Les propriétés thermo-physiques des éléments du four : .....	16
III.3 Étiquettes d'articles existants dans la figure 3.1 :.....	17
III.4 Présentation sur le logiciel utilisé :.....	18

III.5	Résultat : .....	22
III.5.1	Essai 1 : .....	22
III.5.2	Essai 2 : .....	25
III.5.3	Essai 3 : .....	27
III.5.4	Essai 4 : .....	29
III.5.5	Comparaison entre l'essai 3 et l'essai 4 : .....	32
III.5.6	Comparaison entre l'essai 1 et l'essai 4 : .....	33
	Conclusion générale.....	34
	Bibliographie.....	35

<b>Figure I.1:</b> Déplacement d'atomes transférant de la chaleur.....	7
dans le matériau par contact direct	
<b>Figure I.2:</b> Le rayonnement thermique.....	8
<b>Figure I.3:</b> Convection thermique.....	9
<b>Figure I.4:</b> Représentation schématique d'un four à résistance.....	10
<b>Figure II.1 :</b> Conductance entre deux parois.....	12
<b>Figure II.2 :</b> Schéma d'un simple contact convectif.....	12
<b>Figure II.3 :</b> Rayonnement entre deux surfaces.....	13
<b>Figure II.4 :</b> Conduction.....	13
<b>Figure II.5 :</b> Schéma d'un simple modèle électrique.....	14
<b>Figure III.1 :</b> Schéma et analogie électrique des résistances du modèle physique.....	17
<b>Figure III.2 :</b> Températures des éléments du four en fonction du temps.....	24
Pour $\phi=900$ W et $h=20$ W/m <sup>2</sup> .°C	
<b>Figure III.3:</b> Températures des éléments du four en fonction du temps.....	27
Pour $\phi=900$ W et $h=20$ W/m <sup>2</sup> .°C En présence de transfert radiatif	
<b>Figure III.4 :</b> Températures des éléments du four en fonction du temps.....	29
Pour $\phi=900$ W et $h=1000$ W/m <sup>2</sup> .°C En présence radiatif	
<b>Figure III.5 :</b> Températures des éléments du four en fonction.....	31
du temps Pour $\phi=900$ W et $h=1000$ W/m <sup>2</sup> .°C	
<b>Figure III.6 :</b> Comparaison l'évolution des températures .....	32
d'aliment entre l'essai 3 et l'essai 4	
<b>Figure III.7:</b> Comparaison l'évolution des températures.....	33
d'aliment entre l'essai 1 et l'essai 4	

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau III.1</b> : Propriétés physiques des éléments du four .....	16
<b>Tableau III.2</b> : Température des éléments du four en fonction de temps.....	24
<b>Tableau III.3</b> : Températures des éléments du four en fonction du temps.....	26
Pour $\varphi=900$ W et $h=20$ W/m <sup>2</sup> .°C En présence de transfert radiatif	
<b>Tableau III.4</b> : Température des éléments du four .....	28
en fonction de temps Pour $\varphi=900$ W et $h=100$ W/m <sup>2</sup> .°C	
<b>Tableau III.5</b> : Température des éléments du four en fonction de .....	30
temps Pour $\varphi=900$ W et $h=1000$ W/m <sup>2</sup> .°C	

## Nomenclature

S	surface de contact	$m^2$
T	La température	K
e	L'épaisseur	M
F	facteur de forme	–
V	Le volume	$m^3$
$\varepsilon$	émissivité	–
$\varphi$	La source de chaleur injectée	J
$\rho$	La masse volumique	$(W.m^{-3})$
R	résistance électrique des éléments chauffants	$\Omega$
$\sigma$	constant de stefan boltzman	$(W.m^{-2}.K^{-4})$
$C_i^c$	Capacité calorifique de nœud	$(J.K^{-1})$
$G_{ij}$	coefficient de couplage radiatif, convectif et conductif entre les nœuds i et j	$(W.m^{-2}.K^{-1})$
t	Temps	S
h	coefficient d'échange thermique	$(W/m^2.K)$
$\Phi_{ij}$	Le flux de chaleur échangé entre les nœuds i et j	$(W.m^{-2})$
K	conductivité thermique	$(W.m^{-1}.K^{-1})$



Ce travail a été réalisé dans le cadre de mon projet de fin d'étude .Il a pour le but la modélisation numérique du comportement thermique d'un four électrique en acier qui travaille par convection .au début j'ai commencé par la présentation de la méthode nodale ,cela dépend d'établir un réseau électrique équivalent .

Tous les éléments du four considéré isotherme, j'ai utilisé l'équation de chaleur en régime stationnaire pour résoudre les équations différentielles, cela me permet d'obtenir l'évolution de la température de chaque élément du four en fonction du temps.

J'ai simulé plusieurs cas pour que je puisse en déduire que les fours à convection forcée avec le transfert radiatif entre les parois intérieures et le cuisson sont plus efficaces que les autres four (ex : statique), il s'agit aussi de conduire la cuisson au bon moment, à la bonne température .donc pour améliorer l'efficacité d'un four par le transfert radiatif et aussi d'ajouter un ventilateur pour augmenter le coefficient de convection.

**Mot clé :** Transfert radiatif, comportement thermique d'un four électrique, la modélisation numérique par la méthode nodale, les fours à convection naturelle

### ملخص

تم تنفيذ هذا العمل في إطار مشروع نهاية دراستي. ويهدف إلى النمذجة العددية للسلوك الحراري لفرن فولاذي كهربائي يعمل بالحمل الحراري. في البداية بدأت بعرض الطريقة العددية ، وهذا يعتمد بشأن إنشاء شبكة كهربائية مكافئة تم اعتبار جميع عناصر الفرن متساوي الحرارة ، لقد استخدمت معادلة الحرارة في حالة ثابتة لحل المعادلات التفاضلية ، وهذا يسمح لي بالحصول على تطور درجة حرارة كل عنصر من عناصر الفرن كدالة للوقت. لقد قمت بمحاكاة العديد من الحالات حتى أستطيع أن أستنتج أن أفران الحمل الحراري القسري مع النقل الإشعاعي بين الجدران الداخلية والخبز أكثر كفاءة من الأفران الأخرى (مثل الأفران الساكنة) ، إنها أيضًا مسألة تشغيل الخبز في الوقت المناسب ، في درجة الحرارة المناسبة لذلك لتحسين كفاءة الفرن عن طريق النقل الإشعاعي وإيضًا لإضافة مروحة لزيادة معامل الحمل الحراري.

**كلمات مفتاحية :** التحويل الإشعاعي ، السلوك الحراري لفرن كهربائي ، النمذجة العددية بالطريقة العددية ، أفران الحمل الحراري ، الطبيع

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les Molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnelles afin d'établir les proportions de transfert d'énergie. Les chercheurs se sont rencontrés sur le développement de ce domaine grâce à leurs connaissances en matière d'énergie utilisant la modélisation numérique pour développer les comportements des Matériels utilisés pour la cuisine qui font face aux problèmes thermiques. Parce que les gens recherchent toujours une meilleure cuisine, ils peuvent obtenir les plats tout en préservant leur qualité. Parmi lesquelles les fours fonctionnant à l'électricité, notamment parce qu'ils sont très utilisés aujourd'hui dans la cuisson. Mon étude est une modalisation numérique du comportement thermique d'un four à convection en présence de transfert radiatif. Il est divisé en trois chapitres. Pour cela je commence dans le premier chapitre par présenter la définition du transfert thermique et ses modèles, j'ai aussi mentionné en détail les fours électriques. Le deuxième chapitre est consacré pour la modalisation numérique, l'analogie électriques ses principes et quelques exemples. Le troisième chapitre c'est la simulation numérique du comportement thermique du four électrique à convection en présence de transfert radiatif avec les résultats et interprétations. Enfin je résume avec une conclusion générale.

# Chapitre I

## Introduction au transfert de chaleur

## I. Chapitre I : Introduction au transfert de chaleur

### I.1 Introduction

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques. Ils jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a alors transfert de chaleur[1].

### I.2 Thermodynamique et transferts thermiques :

Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique, mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour expliquer de quelle manière s'effectue le transfert de chaleur ou pour prévoir la vitesse de ce transfert. Le transfert de chaleur est donc régi par d'autres lois, très importantes dans différentes branches de l'industrie. Citons par exemple pour le génie chimique. La conception et le fonctionnement des évaporateurs, des condenseurs, des échangeurs entre fluide chaud et froid, des colonnes à distillation, des réacteurs, etc... Pour l'ingénieur de génie chimique les problèmes des transferts thermiques se ramènent généralement à l'une ou l'autre de ces deux formes [2]:

- 1- Rechercher la manière la plus efficace de transmettre une quantité de donnée de chaleur entre deux systèmes par unités de temps[2].
- 2- Rechercher comment limiter les déperditions (ou les gains) calorifiques à travers une surface.

La résolution de ces problèmes est souvent complexe car le transfert de chaleur peut résulter de trois mécanismes de propagation obéissant à des lois bien différentes et mis en jeu parfois simultanément.

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement.

Toutefois, le développement de l'un quelconque de ces mécanismes nécessite l'existence d'une différence de température qui joue le rôle de différence de potentiel pour l'échange de chaleur.

### I.3 La chaleur :

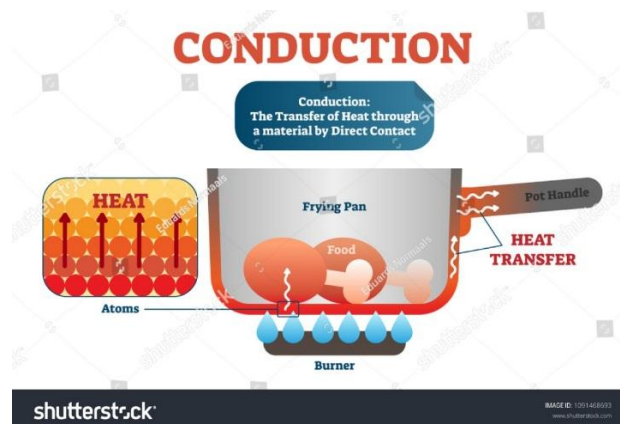
En physique, on appelle chaleur une forme particulière de l'énergie. Cette équivalence de la chaleur et du travail constitue le premier principe de la thermodynamique. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité : le joule[3].

### I.4 Les différents modes de transferts de chaleur :

#### I.4.1 La conduction thermique :

La conduction concerne principalement les solides. En effet, bien que présente également dans les liquides et les gaz, elle y est le plus souvent négligeable par rapport à la convection et au rayonnement.

Nous allons introduire les questions essentielles à traiter dans un problème de conduction thermique, en nous appuyant sur l'exemple du système de chauffage de locaux par plancher chauffant électrique direct. Dans ce mode de chauffage, l'émission de chaleur est produite par effet Joule dans un câble chauffant[4].



**Figure I.1:** déplacement d'atomes transférant de la chaleur dans le matériau par contact direct, exemple avec poêle et bruleur à frire[5]

#### I.4.2 Le rayonnement thermique :

Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur, en ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin

d'être en contact l'une avec l'autre. Elles peuvent même être séparées par le vide. Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé, une explication générale du phénomène étant fournie par la théorie quantique. En 1900, le physicien allemand Max Planck utilisa la théorie quantique et le formalisme mathématique de la mécanique statistique pour vérifier la loi fondamentale du rayonnement, dite loi de Stefan. L'expression mathématique de cette loi indique que la puissance totalement émise (toutes longueurs d'onde comprises) par un corps chauffé est proportionnelle à  $T^4$ ,  $T$  étant la température absolue du corps. Seul un corps noir émet un rayonnement qui satisfait exactement à la loi de Planck, les corps réels émettant avec une puissance inférieure à celle que prévoit la loi de Stefan[4].



Figure I.2 : Le rayonnement thermique[6]

### I.4.3 la convection thermique :

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le

Mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection[7]:

- Convection naturelle: les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un

Fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition[7].

- Convection forcée: le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection coexistent dans un système[7].

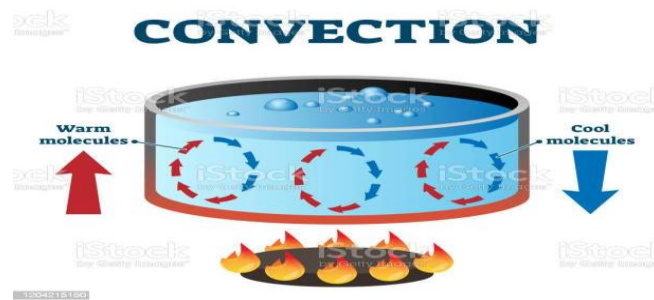


Figure I.3 : convection thermique[8]

## I.5 Four électrique :

### I.5.1 Historique :

Le four électrique à arc, né en Europe en 1900, a connu un important développement d'abord par le nombre d'unités implantées, puis par leur taille et la puissance électrique installée croissantes, au point d'être devenu le seul outil de fusion pour les aciers spéciaux et notamment les aciers inoxydables. Ce développement a été sous la dépendance des progrès en matière d'électrotechnique de puissance et de la progression du maillage du réseau de distribution électrique. À ce jour la puissance apparente d'un four atteint le MVA par tonne de capacité et des coulées de 150 t peuvent être élaborées en nettement moins d'une heure. Le four électrique à arc est devenu capable de concurrencer, par sa productivité, les autres filières sidérurgiques[9].

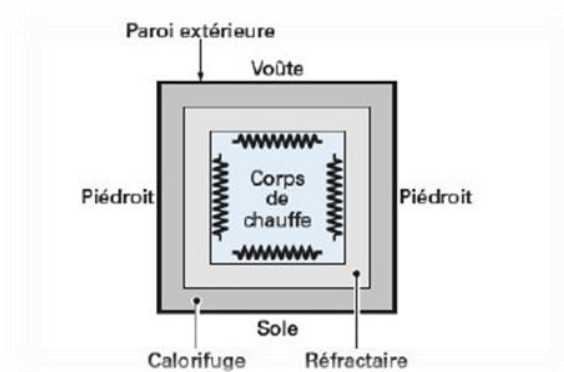
### I.5.2 Caractéristiques d'un four à résistance :

Les fours électriques à résistances constituent les équipements électrothermiques industriels les plus connus et les plus répandus. Ils continuent à faire l'objet de nombreux perfectionnements, fruits d'efforts soutenus de recherche et développement pour les faire évoluer afin de mieux répondre aux besoins exprimés par les industriels utilisateurs. Un four à résistances est essentiellement constitué :

-d'une enceinte (laboratoire ou chambre de chauffe) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaire dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur. Elle varie par sa forme, par le moyen de manutention de la charge ou son type d'exploitation ;

-de résistances électriques disposées en voûte, en sole ou sur les parois latérales (pariétales) de l'enceinte. Leur alimentation est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs ; un système de modulation de la puissance y est associé, piloté par un système de régulation de température ;

-de la charge à traiter, caractérisée par sa forme, sa nature et sa température initiale[11].



**Figure I.4 :** Représentation schématique d'un four à résistance[11]

### I.5.3 Les avantages d'un four électrique :

La facilité d'utilisation et de s'intégrer dans n'importe quelle place de cuisine grâce à son simple branchement électrique nécessite pas une surveillance régulière par contre les fours à gaz ce qui a toujours besoin de changement des tuyaux d'alimentation de gaz. Il se retrouve aussi bien plus simple à nettoyer Par plusieurs fonctions autonettoyantes.

### I.5.4 Les inconvénients d'un four électrique :

Ces appareils de cuisson électriques consomment beaucoup d'énergie par rapport aux modèles au gaz.



# Chapitre II

## La modélisation thermique par la méthode nodale

## II. Chapitre II : La modélisation thermique par la méthode nodale

### II.1 Introduction

Pour résoudre notre problème, nous utilisons la méthode nodale qui permet d'obtenir un système d'équations différentielles. Les échanges de chaleur entre les différents nœuds dans ce système se font suivant seulement 3 modes de transfert de chaleur: la convection, la conduction ou le rayonnement.

### II.2 La modélisation thermique par la méthode nodale :

L'approche nodale, à l'origine mise au point dans les années 1950 pour la modélisation des réseaux électriques, puis rapidement adaptée à la modélisation thermique, a été particulièrement exploitée dans les années 1980, époque où les problématiques thermiques commençaient à prendre une grande importance mais où la puissance des calculateurs limitait les possibilités de modélisation. En effet, la simplicité mathématique des équations mises en jeu réduit considérablement les temps de calcul nécessaires[12].

### II.3 Principe de la modélisation nodale :

Le principe général de l'approche nodale repose sur deux aspects principaux :

#### II.3.1 Décomposition nodale :

Les parties solides et fluides du système sont décomposés respectivement en un nombre  $n_s$  et  $n_f$  d'éléments volumiques de volume  $V_i$ , auxquels on attribue une capacité thermique

$C_i = \rho_i \cdot c_p \cdot V_i$ , Les éléments sont considérés isothermes, à température  $T_i$  (température moyenne de l'élément de volume). Les formes des volumes sont parfois complexes mais des simplifications géométriques peuvent être introduites (hypothèses de formes purement cylindriques ou de pièces à symétrie de révolution). Les nœuds sont définis au barycentre des volumes. Chaque élément doit présenter une uniformité du point de vue des propriétés physiques ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  et  $\varepsilon$ ). En pratique, le respect de ces contraintes peut être satisfait par une décomposition adaptée[12].

### II.3.2 Création du réseau des échanges de chaleur :

Il s'agit d'établir les interactions thermiques entre les nœuds précédemment définis.

L'analogie établie entre les grandeurs électriques et les grandeurs thermiques permet de définir les notions des échanges thermiques.

Le flux de chaleur  $\Phi_{ij}$  échangé entre les nœuds  $i$  et  $j$  peut être représenté par le produit d'une échange thermique  $G_{ij}$  et de la différence de température entre les deux nœuds.

$$\Phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_j - T_i) \quad [12] \quad (2 - 1)$$

#### II.3.2.1 La conductance :

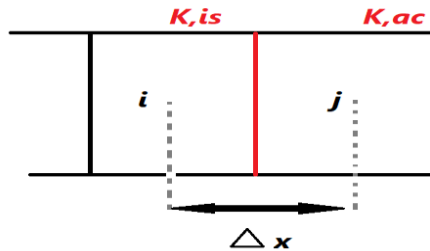


Figure II.1 : Conductance entre deux parois

$$\Phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_j - T_i) = mc_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad [12] \quad (2 - 2)$$

$$G_{ij} = \left( \frac{\lambda S}{\delta x} \right)_{ij} \quad [12] \quad (2 - 3)$$

$$\left( \frac{\lambda S}{\delta x} \right)_{ij} = \frac{S}{\frac{\delta x_i}{\lambda_i} + \frac{\delta x_j}{\lambda_j}} \quad [12] \quad (2 - 4)$$

Où

$\lambda_{i(j)}$ : conductivité thermique du nœud  $i$  ( $j$ )

$\delta x_{i(j)}$ : distance séparant le centre du nœud  $i$  ( $j$ ) de la surface de contact entre les 2 nœuds

$S$ : surface de contact entre les 2 volumes.

**II.3.2.2 La convection :**

**Figure II.2 :** Schéma d'un simple contact convectif

$$G_{ij} = (hS)_{ij} \quad (2 - 4)$$

Où

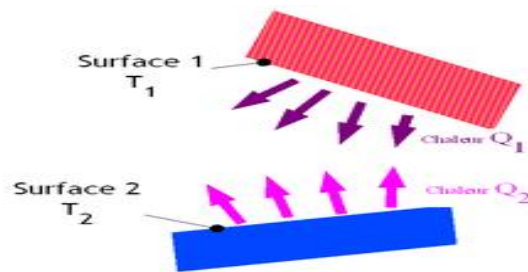
h: coefficient d'échange thermique entre i et j

S: surface de contact entre i et j

Dans les deux cas (et si  $\lambda_{i(j)}$  et h sont pris constants ou en fonction de la température),  $\Phi$  flux de chaleur échangé, est directement proportionnel à la différence de température  $(T_j - T_i)$ ,

$G_{ij}$  coefficient de couplage entre i et j, est alors dit linéaire.

**II.3.2.3 Rayonnements :**



$$\Phi = K (T_j^4 - T_i^4) \quad [14] \quad (2 - 5)$$

$$K = \varepsilon_i S_i F_{ij} \sigma \quad [14] \quad (2 - 6)$$

$$\Phi = G_{ij} (T_j - T_i) \quad [14] \quad (2 - 7)$$

$$G_{ij} = K(T_j^2 + T_i^2) (T_j + T_i) \quad [14] \quad (2 - 8)$$

**Figure II.3 :** Rayonnement entre deux surfaces



$G_{ij}$ : coefficient de couplage radiatif (varie en fonction de  $T_j$  et  $T_i$  et  $\Phi$  n'est plus une fonction linéaire de  $(T_j - T_i)$  ).

### II.4 Contact parfait entre deux matériaux de conductivités thermiques $\lambda$ différentes :

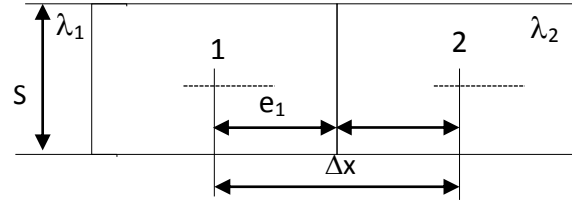


Figure II.4 :Conduction

$$R = R_1 + R_2 = \frac{e_1}{\lambda_1 S} + \frac{e_2}{\lambda_2 S} \quad [14] \quad (2 - 9)$$

$$G = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} = \frac{S}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}} \quad \text{si } e_1 = e_2 = \frac{\Delta x}{2} \Rightarrow G = \frac{2S}{\Delta x \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}} = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \frac{S}{\Delta x} \quad [14] \quad (2 - 10)$$

$$G = \frac{\lambda_e S}{\Delta x} \quad \text{avec} \quad \lambda_e = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad [15] \quad (2 - 11)$$

### II.5 Forme générale des équations de bilan thermique:

Par analogie avec la loi de Kirchhoff, le bilan des flux au nœud  $i$  s'écrit donc, pour  $n$  nœuds adjacent:

$$C_i^c = \sum_{j=1}^n G_{ij} [T_j - T_i] + \varphi_i \quad (2 - 12)$$

Chacun de ces nœuds est caractérisé par :

$i$  : L'indice de nœud.

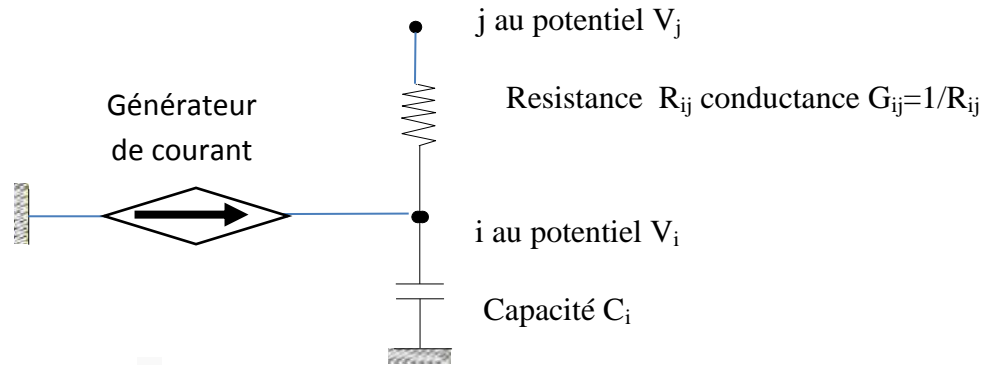
$\varphi_i$  : Est une source de chaleur injectée au nœud  $i$ .

$G_{ij}$  : Constants en couplages conductifs et convectifs.

$C_i^c$  : Capacité calorifique de nœud.

$T_i$  : Température de nœud .

## II.6 Analogie entre les grandeurs thermiques et électriques :



**Figure II.5 :** Schéma d'un simple modèle électrique

En écrivant que la somme algébrique des intensités est nulle au point i, pour un réseau à N nœuds

$$C_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N G_{ij} (V_j - V_i) + I_i \quad [15] \quad (2 - 13)$$

On obtient l'équation :

Cette équation peut également représenter le bilan thermique général du nœud i

## II.7 Objectifs de la modélisation :

Dans ce travail nous avons eu à modéliser trois cas d'essai de l'écoulement de la chaleur dans un système non-stationnaire dont les températures en différents points varient avec le temps. Le 1<sup>ère</sup> cas : nous avons choisi une puissance du four ( $\varphi=900\text{w}$ ) avec une cuisson sans ventilation 'convection naturelle' ( $h=20\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ), le 2<sup>ème</sup> cas : nous avons choisi une puissance du four ( $\varphi=900\text{w}$ ) avec une cuisson sans ventilation 'convection naturelle' ( $h=20\text{W}/\text{m}^2.\text{°C}$ ) en présence de transfert radiatif entre les aciers intérieurs et la cuisson et le 3<sup>ème</sup> cas : nous allons étudier l'effet de la ventilation  $h=1000\text{W}/\text{m}^2.\text{°C}$  avec une puissance maximale du four  $\varphi=900\text{W}$  en présence de transfert radiatif.

# Chapitre III

## La modélisation numérique d' un four électrique

### III. Chapitre III : La modélisation numérique d'un four électrique

#### III.1 Introduction:

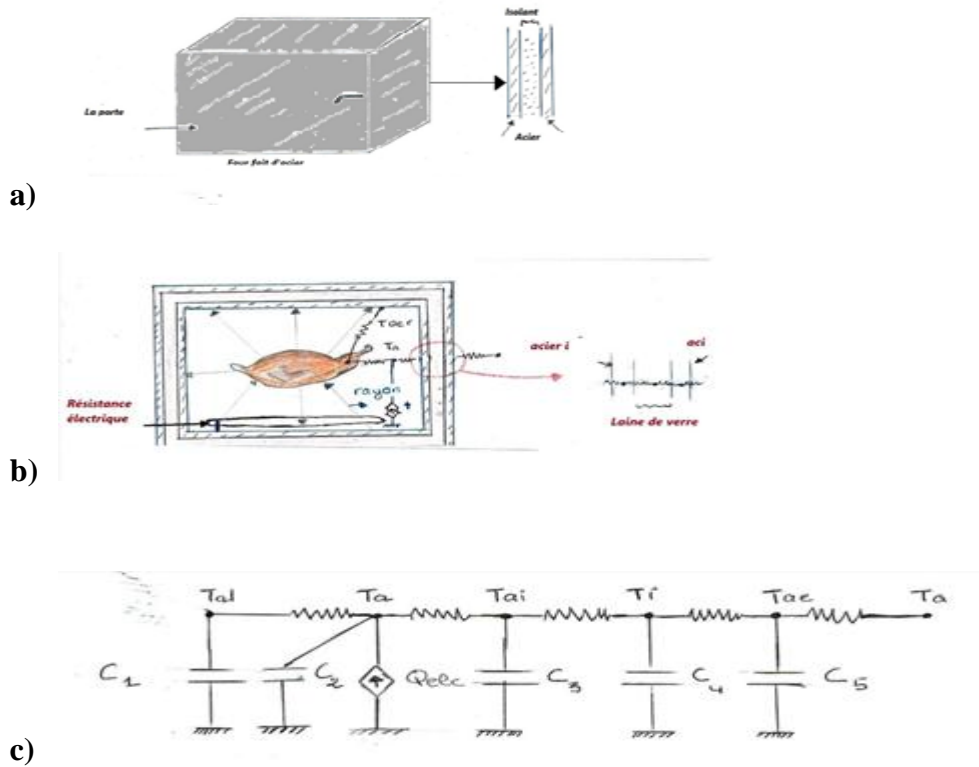
Dans ce chapitre nous allons modéliser le comportement d'un four électrique domestique par la méthode nodale, Pour déterminer les capacités calorifiques et les conductances thermiques entre les éléments du four nous avons besoin de déterminer leurs propriétés thermo-physiques.

#### III.2 Les propriétés thermo-physiques des éléments du four :

	$\varepsilon$	$C_p$ $\left(\frac{J}{Kg.K}\right)$	$K$ ( $W/m.K$ )	$h$ ( $W/K.m^3$ )	$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	Épaisseur (m)
Acier	0.75	500	50.2		7850	0.0015
Isolant		840	0.039		25	0.030
Air		1007		20	1.225	
viande	0.98	3641			$1.08.10^{-3}$	0.002

Tableau III.1 : propriétés physiques des éléments du four [13]





**Figure III.1** : schéma et analogie électrique des résistances du modèle physique

### III.3 Étiquettes d'articles existants dans la figure 3.1 :

R1: Résistance thermique par convection entre la viande et l'air intérieur

R2: Résistance thermique par convection entre l'air intérieur et la tôle intérieure

R3: Résistance thermique par conduction entre la tôle intérieure et l'isolant (laine de verre)

R4: Résistance thermique par conduction entre l'isolant (laine de verre) et la tôle extérieure

R5: Résistance thermique par convection entre la tôle extérieure et l'air extérieur

C1: Capacité calorifique de la viande

C2: Capacité calorifique de l'air

C3: Capacité calorifique de la tôle intérieure

C4: Capacité calorifique de l'isolant (laine de verre)

C5: Capacité calorifique de la tôle extérieure

Qelec: Flux de chaleur produit à partir d'une source (Résistance électrique du four)

			On
a :	$m C_p = \rho V C_p$	[15]	(3 – 1)
	$\varphi = 900 \text{ W}$	[15]	(3 – 2)
	$F_{alaci} = 1$	[15]	(3 – 3)
	$F_{acial} = 1$	[15]	(3 – 4)
	$G_{alaci} = \epsilon_{al} * S_{al} * \sigma * F_{alaci}$	[15]	(3 – 5)
	$G_{acial} = \epsilon_{ac} * S_{ac} * \sigma * F_{acial}$	[15]	(3 – 6)
	$\sigma = 5.67 * 10^{-8}$ (constant de stefan boltzman)	[15]	

### III.4 Présentation sur le logiciel utilisé :

C'est un code qui s'appelle ISIM (Interactive **S**IMulation), un ancien logiciel de calculs interactifs basés sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, ...etc. avec ses fonctions spécialisées, il fonctionne en deux modes, commande et saisie, en attendant l'entrée de l'utilisateur, ISIM est toujours dans l'un des deux modes.

Le logiciel ISIM n'accepte pas les équations à long terme et depuis que nous avons ajouté la formule de rayonnement et c'est long quand tu démantèles, nous avons donc réduit tous les six parois du four dans trois parois (acier extérieure, isolant, acier intérieure), on utilise la surface totale des aciers extérieurs pour lancer l'extérieur générale, nous travaillons la même chose avec les autres parois.

Pour chaque nœud nous établissons l'équation différentielle correspondante :

Nœud 1 :

Equation 01 :

$$\frac{dT_{al}}{dt} = \frac{hS_{al} * (T_{air} - T_{al}) + G_{alaci} * (T_{aci} - T_{al}) * (T_{al} + T_{aci}) * (T_{al}^2 + T_{aci}^2)}{\rho_{al} * v_{al} * cp_{al}} \quad (3-7)$$

Nœud 2 :

Equation 02 :

$$\frac{dT_{air}}{dt} = \frac{[hS_{al} * (T_{al} - T_{air}) + hS_{aci} * (T_{aci} - T_{air}) + \varphi]}{\rho_{air} * v_{air} * cp_{air}} \quad (3-8)$$

Nœud 3

Equation 03 :

$$\frac{dT_{aci}}{dt} = \frac{\left[ hS_{aci} * (T_{air} - T_{aci}) + \frac{2S_{aci}}{\frac{e_{ac}}{k_{ac}} + \frac{e_{is}}{k_{is}}} * (T_{is} - T_{aci}) + G_{aciac} * (T_{al} - T_{aci}) * (T_{al} + T_{aci}) * (T_{aci}^2 + T_{al}^2) \right]}{\rho_{ac} * v_{aci} * cp_{ac}} \quad (3-9)$$

Nœud 4 :

Equation 04 :

$$\frac{dT_{is}}{dt} = \frac{\left[ \frac{2S_{is}}{\frac{e_{is}}{k_{is}} + \frac{e_{ace}}{k_{ac}}} * (T_{ace} - T_{is}) + \frac{2S_{is}}{\frac{e_{is}}{k_{ac}} + \frac{e_{aci}}{k_{is}}} * (T_{aci} - T_{is}) \right]}{\rho_{is} * v_{is} * cp_{is}} \quad (3-10)$$

Nœud 5 :

Equation 05 :

$$\frac{dT_{ace}}{dt} = \frac{\left( \frac{2S_{ace}}{\frac{e_{ace}}{k_{ac}} + \frac{e_{is}}{k_{is}}} * (T_{is} - T_{ace}) + hS_{ace} * (T_{aire} - T_{ace}) \right)}{\rho_{ac} * v_{ace} * cp_{ac}} \quad (3-11)$$

On résout ces équations avec un code qui s'appelle ISIM (**I**nteractive **S**imulation)

Pour Un seul essai :

CONSTANT tfin=3000

CONSTANT RHOa=1.225,RHOiso=25,RHOac=7850,RHOal=0.00108

CONSTANT Cpa=1007,Cpiso=840,Cpac=500,Cpal=3641

CONSTANT Kiso=0.039,Kac=50.2,H=1000

CONSTANT eiso=0.03,eac=0.0015,eal=0.002

CONSTANT Lral=0.1,lal=0.05,hal=0.04

:CONSTANT Lr=0.60,l=0.535,h=0.384

:CONSTANT Lrae1=0.534,lae1=0.384,hae1=0.334,Lrae2=0.534

:CONSTANT lae2=0.384,hae2=0.334,Lrae3=0.60,lae3=0.534,hae3=0.484

:CONSTANT Lrae4=0.60,lae4=0.384,hae4=0.334,Lrae5=0.60,lae5=0.534,hae5=0.484

:CONSTANT Lris1=0.534,lis1=0.384,his1=0.334,Lris2=0.534,lis2=0.384

CONSTANT Phi=900

CONSTANT Ta=20

CONSTANT Emac=0.75,Emal=0.98

CONSTANT T F1=1,F2=1

CONSTANT SB=5.67e-8

INITIAL

Tl=Ta;Tai=Tl;Ti=Tl;Tae=Tl

Sai=0.5

Sae=0.6

Sis=0.4

$$sal=Lral*lal$$

$$Vai=Sae*eac$$

$$Vae=Sai*eac$$

$$Vis=Sis*eiso$$

$$Val=Lral*hal$$

$$Va=0.0817$$

$$C2=RHOac*Vae*Cpac$$

$$C=RHOac*Vai*Cpac$$

$$Cl=RHOal*Val*Cpal$$

$$Ciso=RHOiso*Vis*Cpiso$$

$$Ca=RHOa*Va*Cpa$$

$$Gae=(2*Sae)/((eac/Kac)+(eiso/Kiso))$$

$$Gis=(2*Sis)/((eiso/Kiso)+(eac/Kac))$$

$$r=(2*Sai)/((eac/Kac)+(eiso/Kiso))$$

$$G3=H*Sai$$

$$Gal=H*Sal$$

$$G4=H*Sae$$

$$G1=Eal*F1*Sal*SB$$

$$G2=Eac*F2*Sai*SB$$

### DYNAMIC

$$Ti'=(Gis*(Tai-Ti)+Gis*(Tae-Ti))/Ciso$$

$$Tae'=(Gae*(Ti-Tae)+G4*(Ta-tae))/C2$$

$$T_a' = (G_{a1} * (T_l - T_a) + (G_3 * (T_{ai} - T_a) + G_4 * (T_{ae} - T_a) + \phi)) / C_a$$

$$g_{38} = G_2 * (((T_l + 273) + (T_{ai} + 273)) * ((T_l + 273)^{**2}) + ((T_{ai} + 273)^{**2}))$$

$$v_{ax} = g_{38} * (T_l - T_{ai})$$

$$T_{ai}' = (r * (T_i - T_{ai}) + G_3 * (T_a - T_{ai}) + v_{ax}) / C$$

$$g_{37} = G_1 * (((T_{ai} + 273) + (T_l + 273)) * ((T_l + 273)^{**2}) + ((T_{ai} + 273)^{**2}))$$

$$V_{ax1} = g_{37} * (T_{ai} - T_l)$$

$$T_l' = (G_{a1} * (T_a - T_l) + V_{ax1}) / C_l$$

OUTPUT T, Tl, Tai, Tae, Ti

PREPARE T, Tl, Tai, Tae, Ti

Fin de calcul

### III.5 Résultat :

#### III.5.1 Essai 1 :

Dans cet essai nous avons choisi une puissance du four ( $\phi = 900\text{w}$ ) avec une cuisson sans ventilation 'convection naturelle' ( $h = 20\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ).

Les résultats de la simulation obtenus par le code de calcul **ISIM** sont représentés dans le tableau suivant :

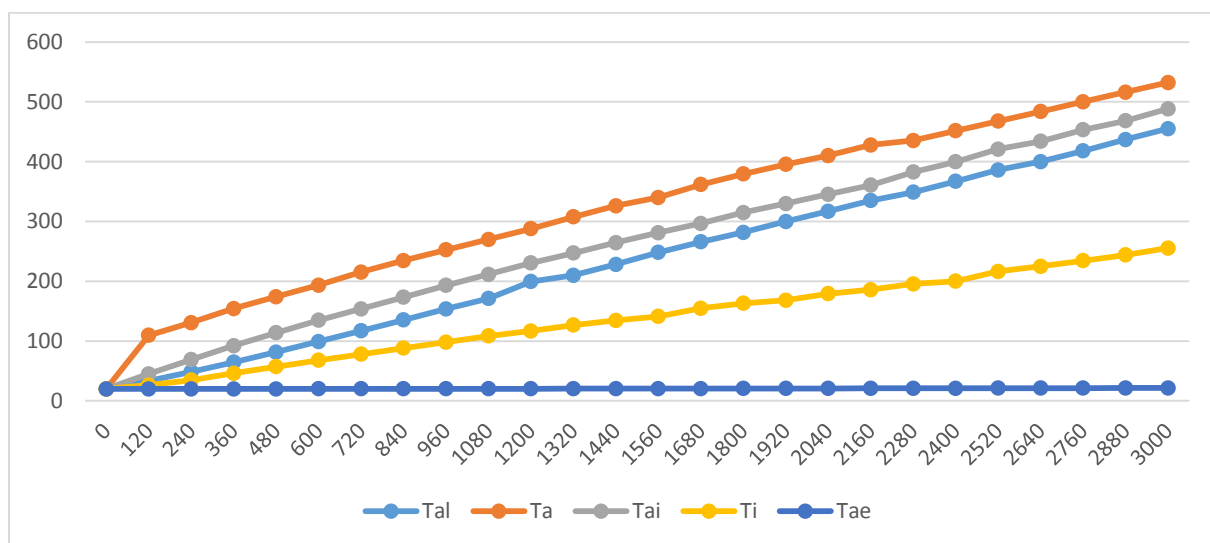
<b>t(s)</b>	<b>Tal</b>	<b>Ta</b>	<b>Tai</b>	<b>Ti</b>	<b>Tae</b>
0	20	20	20	20	20
120	33,627	109,56	45,099	26,304	20,001
240	48,473	130,79	68,804	34,538	20,007
360	64,538	154,37	92,327	46,198	20,018
480	81,487	174,17	113,9	57,063	20,037
600	99,061	193,45	134,68	67,738	20,063
720	117,06	215,25	153,77	78,114	20,095
840	135,32	234,54	173,25	88,18	20,134
960	153,73	252,41	193,19	97,954	20,178
1080	171,17	269,88	211,64	108,46	20,229
1200	199,59	287,97	230,64	116,73	20,285
1320	209,92	307,69	247,23	126,77	20,347
1440	228,11	326,08	264,44	134,6	20,414
1560	248,13	340,13	281,29	141,25	20,486
1680	265,96	361,82	296,79	154,72	20,564
1800	281,57	379,3	314,97	163,01	20,646
1920	299,94	395,42	329,84	168,15	20,733
2040	317,08	410,26	345,41	179,13	20,825
2160	334,96	427,82	360,7	185,97	20,922
2280	349,01	435,45	382,68	195,48	20,99
2400	367,02	451,59	399,80	199,97	21,08
2520	386,03	467,73	420,91	216,46	21,16
2640	400,04	483,87	434,03	224,95	21,25

2760	418,05	500,01	453,15	234,44	21,33
2880	437,06	516,15	468,26	243,93	21,42
3000	455,07	532,29	488,38	255,42	21,50

**Tableau III.2 :** Température des éléments du four en fonction de temps

Pour  $\phi=900\text{ W}$  et  $h=20\text{ W/m}^2.\text{°C}$

Graphiquement nous obtenons les courbes suivantes :



**Figure III.2 :** Températures des éléments du four en fonction du temps

Pour  $\phi=900\text{ W}$  et  $h=20\text{ W/m}^2.\text{°C}$

**Commentaire :**

Je remarque que lorsque nous avons une puissance du four ( $\phi= 900\text{ W}$ ) et ( $h=20\text{W/m}^2.\text{°C}$ ) la température augmenté rapidement malgré que la viande et sans ventilation.

Je note aussi que la température de l'air est supérieure à celles des éléments du four à cause la conductance faible entre eux due au faible coefficient de convection. Je constate qu'après (2000s) de cuisson la température de la viande atteint presque 300 °C.



Tae : Température extérieure

Tai : Température intérieure

Ti : Température initiale

Tal : Température de l'aliment

Ta : Température de l'air

### III.5.2 Essai 2 :

Dans cet essai nous avons choisi une puissance du four ( $\phi=900\text{w}$ ) avec une cuisson sans ventilation 'convection naturelle' ( $h = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) en présence de transfert radiatif entre les aciers intérieures et la cuisson ; Les résultats de la simulation obtenus par le code de calcul **ISIM** sont représentés dans le tableau suivant :

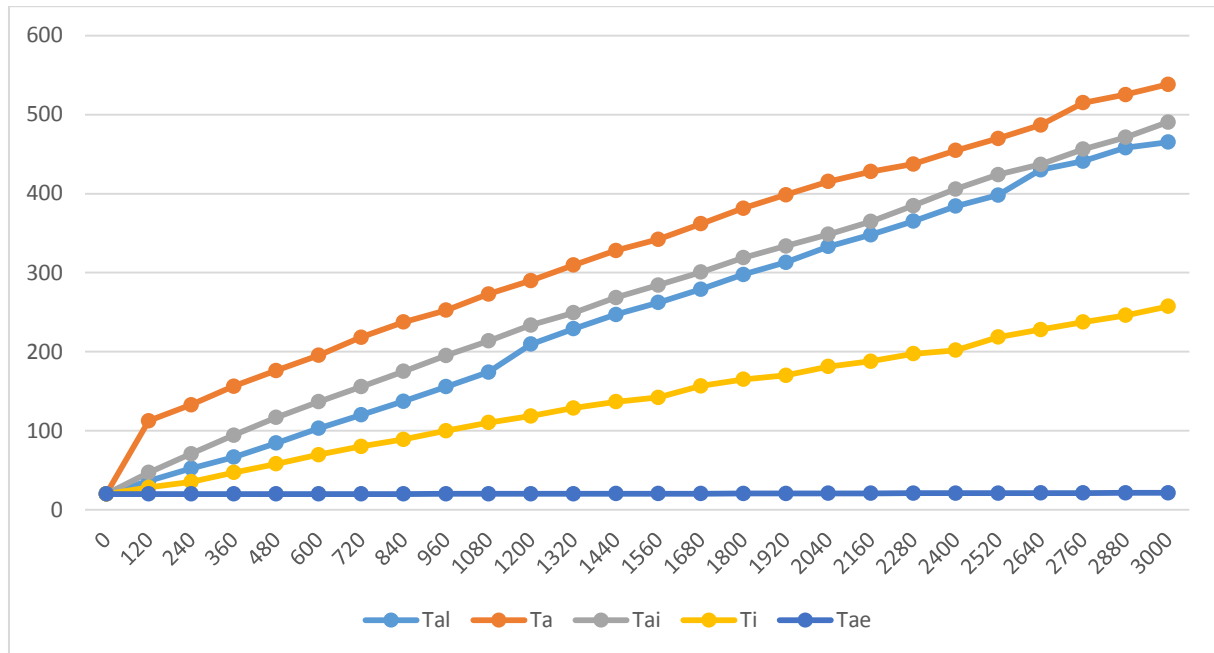
t(s)	TL	Ta	Tai	Ti	Tae
0	20	20	20	20	20
120	36,63	112,57	47,12	28,306	20,001
240	52,49	132,81	70,81	35,54	20,007
360	66,54	156,38	94,33	47,199	20,018
480	84,49	176,20	116,91	58,064	20,037
600	103,07	195,46	136,69	69,74	20,063
720	120,08	218,26	155,78	80,12	20,095
840	137,33	237,55	175,26	89,19	20,134
960	155,76	252,42	195,20	99,96	20,178
1080	174,19	272,90	213,65	110,47	20,229
1200	209,61	289,98	233,65	118,74	20,285
1320	228,94	309,70	249,24	128,78	20,347

1440	247,12	328,09	268,45	136,61	20,414
1560	262,14	342,14	284,30	142,26	20,486
1680	278,97	361,83	300,80	156,73	20,564
1800	297,58	381,40	318,9	165,02	20,646
1920	312,96	398,43	333,8	170,16	20,733
2040	333,10	415,25	348,42	181,14	20,825
2160	347,98	427,83	364,72	187,98	20,922
2280	365,03	437,46	384,69	197,49	20,99
2400	384,04	454,60	405,81	201,98	21,08
2520	398,05	469,74	423,92	218,47	21,16
2640	430,06	486,88	437,04	227,96	21,25
2760	441,07	515,02	456,16	237,45	21,33
2880	458,10	525,16	471,27	245,94	21,42
3000	465,12	538,30	490,39	257,43	21,50

**Tableau III.3 :** Températures des éléments du four en fonction du temps

Pour  $\varphi=900$  W et  $h=20$  W/m<sup>2</sup>.°C En présence de transfert radiatif

Graphiquement nous obtenons les courbes suivantes :



**Figure III.3:** Températures des éléments du four en fonction du temps

Pour  $\varphi=900$  W et  $h=20$  W/m<sup>2</sup>.°C En présence de transfert radiatif

#### Commentaire :

Je note que quand il y a le transfert par rayonnement la température des éléments du four augment vite pour port Le cas de convection naturelle, à 3000s la température de cuisson est égal à 465°C.

#### III.5.3 Essai 3 :

Dans cet essai nous allons étudier l'effet de la ventilation  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>.°C avec une puissance maximale du four  $\varphi=900$ W en présence de transfert radiatif.

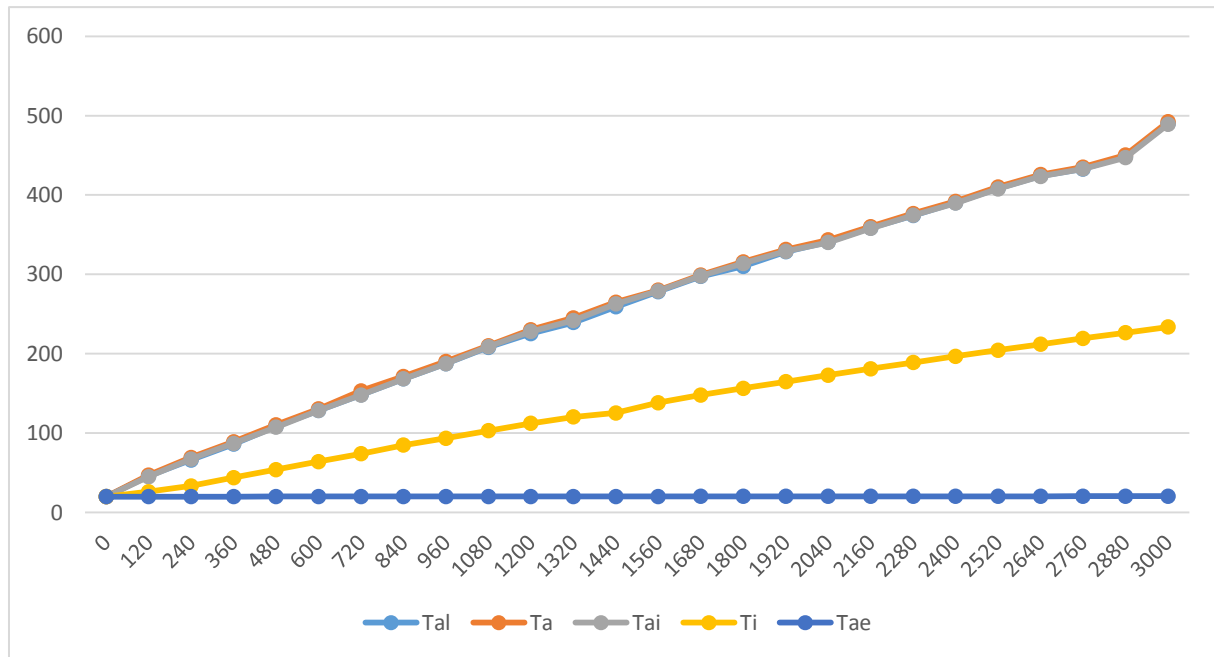
Les résultats de la simulation obtenus par le code de calcul ISIM sont représentés dans le tableau suivant :

<b>t(s)</b>	<b>TL</b>	<b>Ta</b>	<b>Tai</b>	<b>Ti</b>	<b>Tae</b>
0	20	20	20	20	20
120	45,923	47,178	45,08	26,088	20,001
240	66,178	69,382	67,273	33,343	20,005
360	85,989	89,15	87,032	43,99	20,014
480	108,4	110,52	107,4	54,029	20,026
600	128,45	130,53	128,39	64,095	20,042
720	148,13	153,17	148,03	74,057	20,059
840	168,45	171,46	168,31	84,87	20,079
960	187,44	190,41	187,52	93,519	20,1
1080	208,08	210,02	208,85	103	20,121
1200	225,39	230,29	228,12	112,31	20,143
1320	239,37	245,24	242,06	120,46	20,166
1440	259,03	264,87	262,68	125,44	20,189
1560	278,38	280,18	278,99	138,27	20,212
1680	297,41	299,18	297,98	147,94	20,234
1800	310,14	315,88	313,68	156,45	20,257
1920	328,58	331,28	329,07	164,81	20,28
2040	340,72	343,39	340,18	173,02	20,302
2160	358,57	360,21	357,99	181,09	20,324
2280	374,13	376,75	374,52	189,01	20,346
2400	390,42	392,01	389,78	196,79	20,367
2520	408,44	410,23	407,76	204,43	20,388
2640	424,19	425,72	423,47	211,93	20,409
2760	432,67	435,18	432,93	219,3	20,429
2880	448,9	450,38	447,12	226,54	20,45
3000	489,87	492,32	489,06	233,65	20,469

**Tableau III.4 :** Température des éléments du four en fonction de temps Pour  $\phi=900$  W et  $h=100$  W/m<sup>2</sup>.°C

En présence de transfert radiatif

Graphiquement nous obtenons les courbes suivantes :



**Figure III.4 :** Températures des éléments du four en fonction du temps

Pour  $\phi=900$  W et  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>.°C En présence radiatif

#### Commentaire :

Je remarque que quand il y a le transfert par rayonnement les températures des éléments intérieurs de four et de cuisson augment vite, la température de cuisson à 3000°C est 492°C par contre le cas de convection forcée seule. Les températures de l'aliment et de l'air sont superposées.

#### III.5.4 Essai 4 :

Dans cet essai nous allons étudier l'effet de la ventilation  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>.°C avec une puissance maximale du four  $\phi=900$ W.

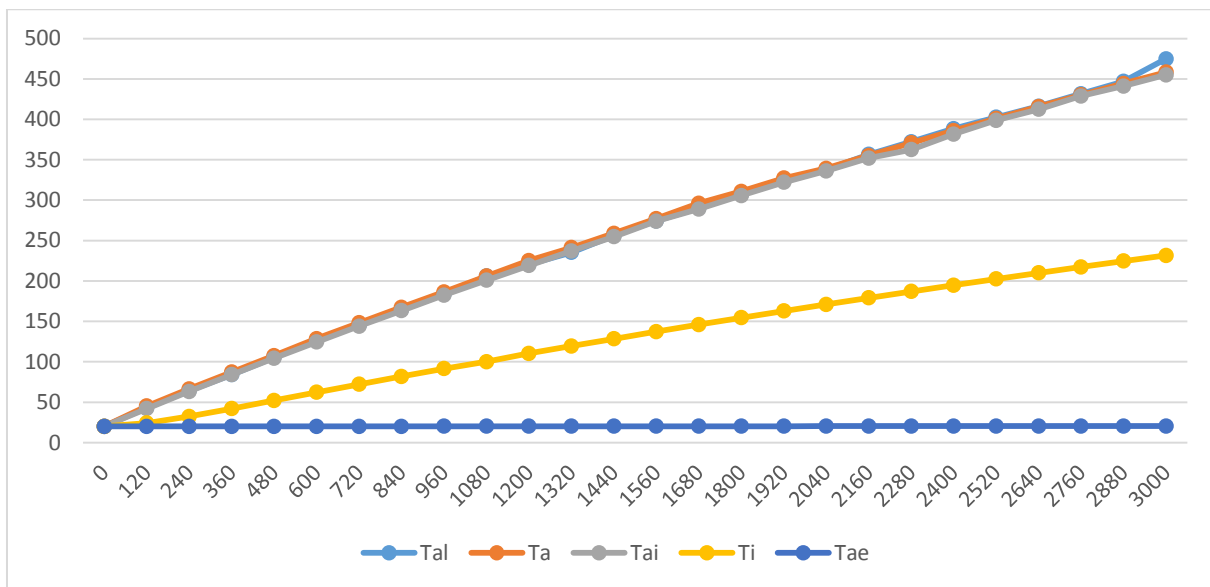
Les résultats de la simulation obtenus par le code de calcul ISIM sont représentés dans le tableau suivant :

<b>t(s)</b>	<b>TL</b>	<b>Ta</b>	<b>Tai</b>	<b>Ti</b>	<b>Tae</b>
0	20	20	20	20	20
120	42,923	45,178	42,08	24,088	20,001
240	64,178	66,382	63,273	32,343	20,005
360	83,989	87,15	84,032	41,99	20,014
480	105,4	107,52	104,4	52,029	20,026
600	126,45	128,53	124,39	62,095	20,042
720	145,13	148,17	144,03	72,057	20,059
840	164,45	167,46	163,31	81,87	20,079
960	183,44	186,41	182,52	91,519	20,1
1080	206,08	206,02	200,85	100	20,121
1200	220,39	225,29	219,12	110,31	20,143
1320	235,37	241,24	237,06	119,46	20,166
1440	256,03	258,87	254,68	128,44	20,189
1560	274,38	277,18	273,99	137,27	20,212
1680	290,41	296,18	288,98	145,94	20,234
1800	307,14	310,88	305,68	154,45	20,257
1920	325,58	327,28	322,07	162,81	20,28
2040	337,72	339,39	336,18	171,02	20,302
2160	356,57	355,21	351,99	179,09	20,324
2280	372,13	370,75	362,52	187,01	20,346
2400	388,42	386,01	381,78	194,79	20,367
2520	402,44	401	398,76	202,43	20,388
2640	416,19	415,72	412,47	209,93	20,409
2760	431,67	430,18	428,93	217,3	20,429

2880	446,9	444,38	441,12	224,54	20,45
3000	474,87	458,32	455,06	231,65	20,469

**Tableau III.5 :** Température des éléments du four en fonction de temps Pour  $\phi=900$  W et  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>.°C

Graphiquement nous obtenons les courbes suivantes :



**Figure III.5 :** Températures des éléments du four en fonction du temps Pour  $\phi=900$  W et  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>.°C

**Commentaire :**

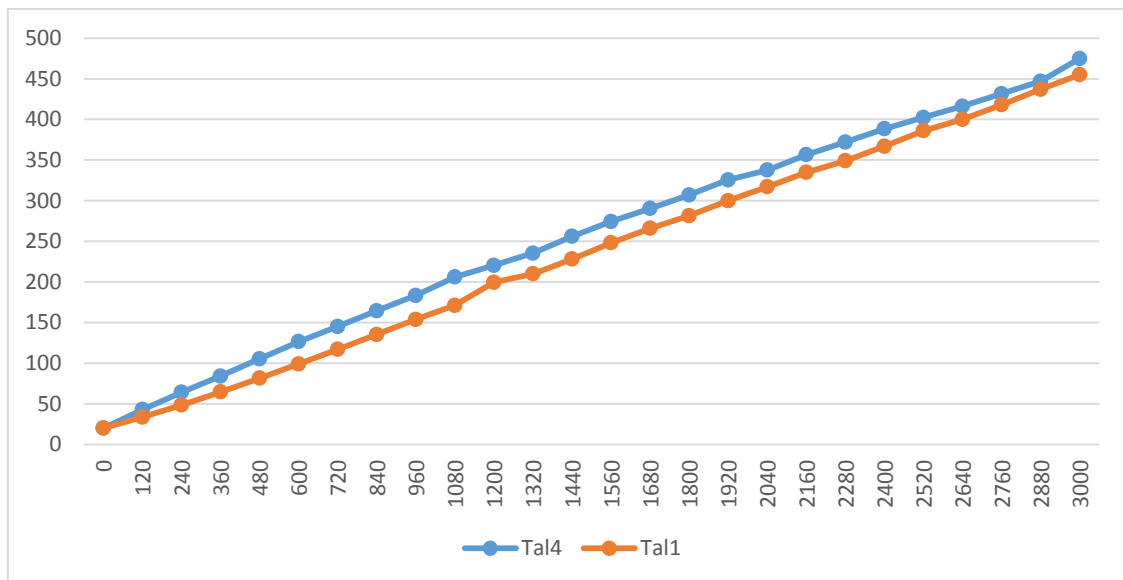
Je remarque que les températures de l'air et d'aliment sont un peu rapprochées et confondues leurs températures sont presque égales à cause du coefficient de convection qui donne une meilleure conductance

Thermique .Je note que l'évolution de température de viande augmente rapide par rapport aux cas de convection naturelle, après (2000s) elle atteint presque 350°C et contenu à augmenter jusqu'à 450°C

Donc si on a un coefficient de convection élevé on peut cuire plus rapidement.

Il faut noter que je n'ai pas simulé la fonction du thermostat qui consiste à limiter la température de consigne qui annule la puissance du four lorsque celle-ci est dépassée.

### III.5.5 Comparaison entre l'essai 3 et l'essai 4 :



**Figure III.6 :** Comparaison l'évolution des températures d'aliment entre l'essai 3 et l'essai 4

#### Commentaire:

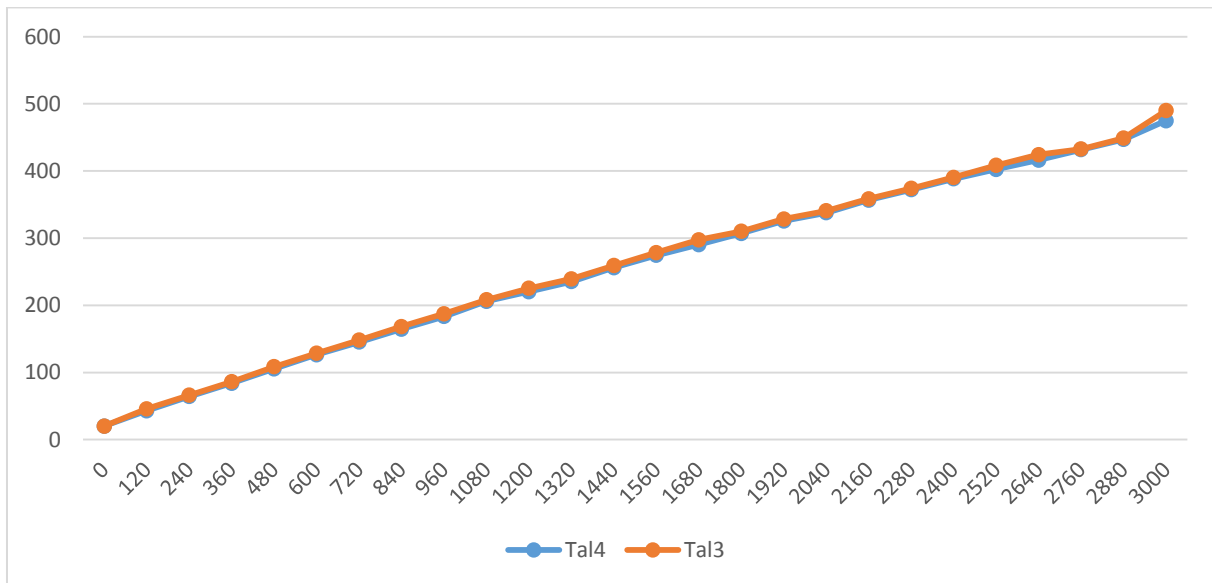
Le cas deuxième cas

De convection forcée la température finale de cuisson c'est 470°C est inférieure à 487°C la température finale de cuisson dans le premier cas.

Où on a le transfert par rayonnement la température de l'aliment augment vitement par contre le



### III.5.6 Comparaison entre l'essai 1 et l'essai 4 :



**Figure III.7:** Comparaison l'évolution des températures d'aliment entre l'essai 1 et l'essai 4

#### Commentaire:

Dans les cas où la puissance de four est élevée les températures augmentent rapidement et dans les deux cas c'est enlevée dans le deuxième cas on a la ventilation donc elle améliore le temps de cuisson.

Dans le cas du four puissant avec ventilation la température de cuisson à 2000 s est 350°C alors que pendant ce temps le cas sans ventilation la température de l'aliment est 300°C.

## Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de mon projet de fin d'étude, a concerné la modélisation numérique du comportement thermique d'un four électrique en acier qui travaille par convection par écoulement du fluide en régime permanent et en régime transitoire en 2D. Durant cette modélisation, on a rencontré de nombreuses difficultés. Dans ce travail nous avons eu à modéliser trois cas d'essai de l'écoulement de la chaleur dans un système non-stationnaire dont les températures en différents points varient avec le temps, cette variation de température indique une variation de l'énergie interne et, par conséquent, une accumulation de l'énergie dans différentes parties constituant le four (problème rencontré au niveau des parois). Le régime d'écoulement associé à la circulation de l'air dans l'enceinte du four est turbulent; donc il était difficile d'obtenir une bonne uniformité de température et d'atteindre l'équilibre thermique dans la charge. La géométrie du four est assez complexe : isolant constitué de plusieurs couches, charge circulant sur un convoyeur, etc.... ce qui rend le modèle numérique plus lourd et difficile à résoudre. Une difficulté supplémentaire provient du fait que les simulations ont été réalisées à l'aide de la méthode nodale, cela dépend d'établir un réseau électrique équivalent. Tous les éléments du four considéré isotherme, j'ai utilisé l'équation de chaleur en régime stationnaire pour résoudre les équations différentielles, cela me permet d'obtenir l'évolution de la température de chaque élément du four en fonction du temps.

En tenant compte des caractéristiques des éléments chauffants (puissance dissipée dans les résistances, densité surfacique), séparément, au lieu de modéliser les éléments chauffants avec le four. Adopter des hypothèses appropriées et des solutions approchées au niveau des conditions aux limites et des propriétés des matériaux : (calculer la valeur de la conductivité thermique en fonction de la température suivant une fonction déterminée, ce qui a résolu en partie le problème de l'homogénéisation des températures au niveau des isolants); négliger les modes de transmission de chaleur les moins importants et ne considérer que celui qui domine quantitativement (convection forcée).

[1] <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>

le garrec ,concepteur et fabricant et des système fluides.

[2] [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/ctcd\\_yk.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/ctcd_yk.pdf)

[3] Digischool ingénieurs.mémoires physique et mecanique thermique.  
<https://www.ingenieurs.com/documents/memoire/thermique-209.php>

[4] Transfert Thermique Par Dr Lyes Bordja Email : [Lyes\\_b2003@yahoo.fr](mailto:Lyes_b2003@yahoo.fr)

[5] Collection Tech & Science de VectorMine . <https://www.shutterstock.com/fr/image-vector/conduction-physics-diagram-vector-illustration-scheme-1091468693>

[6] Patrice GAGNAT, 25 sept. 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=7GvvTScurlw>

[7] Sophie Mergui. LICENCE DE MECANIQUE 2EME ANNEE MODULE 2A101

[8] ISTOCK by getty images. Diagramme étiqueté par vecteur de courants de convection

[9] J. Davené,a, G. Gay,b et J. Saleil,c/Cercle d'Étude des Métaux, École Nationale Supérieure de Mines, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France [/cemetaux@emse.fr](mailto:/cemetaux@emse.fr)

[10] Jean-François BOURGEOIS, Alain GIRAULT, Richard JAUME, Marianne LE BOULCH, Claude OBERLIN/technique de l'ingénieurs

[11] Etude des fours électrique –samuel dotou /Academia

[12] Construction d'un modèle thermique nodal pour la phase de prédimensionnement d'un équipement roue et frein aéronautique : méthodologie et simplifications /Tristan Montrol, Jacques Jay, Shihe Xin, Ronnie Knikker, Marie-Laure Decrescenzo, Aurélien Moureaux

[13] Sylvain Marc,Étude expérimentale et numérique d'un procédé de cuisson par contact direct,HAL Archives -ouverts.

[14] Yves jannot ,transferts thermiques,Ecole des Mines nancy.

[15] Jean-François Sacadura, Professeur émérite des Universités à l'INSA de Lyon ,transferts thermiques ,initiation et approfondissement.

[16] Stephaen whitaker, professeur of chemical engineering university of california at davis ,fundamentale principes of heat transfert .