

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Technologie

Département Electrotechnique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique des Energies Renouvelables

Par

Abdeldjalil ABDELKADER MEKKI

Thème :

CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET A LA REGULATION OPTIMISEE DANS UN SYSTEME ELECTROMAGNETIQUE COUPLE (APPLICATION T.C.P.I)

Soutenue le 03/06/2020 devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------|------------|------------------------------|---------------|
| Bachir BELMADANI | Professeur | Université de Chlef, Algérie | Président |
| Abdelkader KANSAB | MCA | Université de Chlef, Algérie | Rapporteur |
| Mouloud FELIACHI | Professeur | Université de Nantes, France | Co-Rapporteur |
| Djilali BENOUCHEF | Professeur | Université de Chlef, Algérie | Examineur |
| Rachid TALEB | Professeur | Université de Chlef, Algérie | Examineur |
| Abdelhalim ZAOU | Professeur | EMP, Bordj El-Bahri Algérie | Examineur |

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire «**Génie Electrique et Energie Renouvelable**» de l'université Hassiba Benbouali de chlef.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon directeur de thèse. Monsieur **Kansab Abdelkader** - Maitre de conférence 'A' à l'université de chlef, pour son encadrement et sa grande disponibilité, pour sa patience sa gentillesse tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Mr **Mouloud Feliachi**, Professeur à l'université de Nantes, France, d'avoir accepté de co-encadrer et de nous aider par ses idées précieuses pour mener à bien ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **Bachir BELMADANI**, Professeur à l'université de chlef, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Je tiens à remercier Monsieur **Djilali BENYOUCEF**, Professeur à l'université de chlef, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Rachid TALEB**, Professeurs à L'université de chlef, pour avoir également accepté d'être examinateur de mon travail de thèse.

Je tiens à remercier Monsieur **Abdelhalim ZAOUI**, Professeurs à E.M.P, Bordj El-Bahri Algérie, qui malgré ses nombreuses activités, nous a assuré de sa participation au Jury.

Je tiens également à remercier Monsieur **Mohamed MATALLAH** qui m'a aidé à avancer dans mon travail.

Je tiens aussi à témoigner ma reconnaissance à toute personnes ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma petite famille

A mon père ...

A ma mère ...

A mes frères ...

A mes chers amis...

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin

mekki

Sommaire

| | |
|-----------------------|----|
| Introduction générale | 01 |
|-----------------------|----|

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

| | |
|--|----|
| I.1. Historique | 06 |
| I.2. Principe du chauffage par induction | 06 |
| I.3. Caractéristiques électriques du chauffage par induction | 07 |
| I.3.1. Profondeur de pénétration | 08 |
| I.3.2. La résistivité électrique | 09 |
| I.3.3. La perméabilité magnétique relative. | 10 |
| I.3.4. Influence de la fréquence. | 11 |
| I.3.5. Puissance nécessaire au traitement thermique | 12 |
| I.4. Transfert Thermique | 12 |
| I.4.1. La conduction | 12 |
| I.4.2. La convection | 13 |
| I.4.3. Transfert de chaleur par rayonnement | 13 |
| I.5. Couplage électromagnétique-thermique | 13 |
| I.6. Table de cuisson par induction | 15 |
| I.6.1. Composants d'une table de cuisson par induction | 15 |
| I.6.2. Inducteur | 15 |
| I.6.3. La charge (récipients) | 16 |
| I.6.4. Onduleurs | 17 |
| I.6.5. les avantages de la plaque a induction | 18 |
| I.6.6. les inconvénients: | 18 |
| I.7. Classification des matériaux | 18 |
| I.7.1. Les matériaux magnétiques | 18 |
| I.8. Technologies électriques des plaques de cuisson | 19 |
| I.9. Comparaison des différentes modes de cuisson | 20 |
| I.10. sécurité thermique du plan de cuisson | 21 |
| I.11. Conclusion : | 22 |

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 24 |
| II.2. Description physique du problème. | 24 |
| II.3. Model axisymétriques | 26 |
| II.4. Calcul de la puissance | 26 |
| II.5. Modélisation de l'électromagnétisme. | 27 |
| II.5.1. Les lois fondamentales de l'électromagnétisme | 27 |
| II.5.1.1. Les équations de Maxwell | 27 |
| II.5.1.2. Les lois constitutives des matériaux | 28 |
| II.5.1.3. Les conditions de passage | 28 |

| | |
|---|----|
| II.5.1.4. Les conditions aux limites | 28 |
| II.5.2. Hypothèses simplificatrices de la magnétodynamiques | 29 |
| II.5.3. Formulations magnétodynamiques | 30 |
| II.6. Modélisation des phénomènes thermiques | 36 |
| II.6.1. Mode de transfert de la chaleur | 36 |
| II.6.2. L'équation différentielle de la chaleur. | 37 |
| II.6.3. Transfert thermique par conduction | 37 |
| II.6.4. Conductivité thermique. | 37 |
| II.6.5. Transfert thermique par convection | 38 |
| II.6.6. Les conditions aux limites | 38 |
| II.6.6. 1. Condition initiale temporelle : | 38 |
| II.6.6. 2. Conditions aux limites spatiales : | 38 |
| II.7. Couplage magnéto-thermique - Equations couplée | 39 |
| II.8. Méthodes numériques de résolution | 40 |
| II.8.1. La Méthode des Eléments Finis | 41 |
| II.9. Application : Table de cuisson à induction | 42 |
| II.9.1. Description du problème | 43 |
| II.9.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau | 45 |
| II.9.3. Procédure, Géométrie et paramètres de simulation | 46 |
| II.10. Conclusion | 51 |

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 53 |
| III.2. Définition de l'optimisation | 54 |
| III.2. 1. Description générale des problèmes d'optimisation | 54 |
| III.2. 2. Formulation mathématique d'un problème d'optimisation | 55 |
| III.3. L'optimisation par essais particulières | 55 |
| III.3.1. Inspiration Biologique de l'OEP (PSO) | 56 |
| III.3.2. Principe | 57 |
| III.3.3. Mode de fonctionnement de l'algorithme PSO | 57 |
| III.3.4. Formulation du standard PSO | 58 |
| III.3.5. L'algorithme OEP: | 59 |
| III.3.6. Configuration et paramètres de contrôle | 61 |
| III.3.6.1. Taille et topologie de voisinage | 61 |
| III.3.6.2. Nombre de particules | 62 |
| III.3.6.3. Dimension des particules | 62 |
| III.3.6.4. La vitesse maximale | 62 |
| III.3.6.5. Coefficients de confiance | 62 |
| III.3.6.6. coefficient d'inertie (W) | 63 |
| III.3.6.7. Le contrôle de position | 63 |
| III.3.7. Algorithme de WIPSO | 63 |
| III.3.8. Algorithme de PSO-CFIWA | 65 |
| III.4. Application de l'optimisation par essaim de particule sur la table de cuisson | 65 |
| III.4.1. Représentation du problème d'optimisation | 66 |
| III.4.2. Fonction objectif | 66 |
| III.4.3. Organigramme de la technique PSO appliquée à l'optimisation de l'inducteur | 67 |

| | |
|---|----|
| III.4.4. Application de la méthode PSO dans le système étudié (T.C.P.I) | 70 |
| III.4.5. Paramètres de simulation des algorithmes PSO | 71 |
| III.4.6. Cadre Expérimental | 72 |
| III.4.7. Résultat de la simulation | 72 |
| III.4.8 Interprétation des résultats | 78 |
| III.5. Conclusion | 79 |

Chapitre -IV : Régulation de la température

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 81 |
| IV.2. Généralités sur la régulation et les systèmes non linéaires | 82 |
| IV.2. 1. Les Systèmes non linéaires | 82 |
| IV.2.2. Type de régulateur | 83 |
| IV.2.3.La chaîne de traitement de l'information | 83 |
| IV.2.4.Boucle de régulation | 84 |
| IV.2.4.1. la régulation en boucle fermée | 85 |
| IV.2.4.2. la régulation en boucle ouverte | 85 |
| IV.3. Régulateur TOR | 86 |
| IV.4. Régulation de la température par hystérésis à bande fixe de la table de cuisson | 88 |
| IV.5. Algorithme de fonctionnement du régulateur par hystérésis pour (T.C.P.I) | 90 |
| IV.6. Conclusion | 93 |

| | |
|----------------------------------|----|
| <i>Conclusion générale</i> | 94 |
|----------------------------------|----|

| | |
|----------------------------|----|
| <i>Bibliographie</i> | 96 |
|----------------------------|----|

Annexe

liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau. I.1 : Résistivité en fonction de la température du medium Carbon Steele | 09 |
| Tableau. I.2 : Lien entre les fréquences d'utilisation et les applications du chauffage | 11 |
| Tableau. I.3 : valeur de δ (mm) pour divers matériaux à différentes températures | 11 |
| Tableau. I.4 : algorithme de couplage magnétothermique | 14 |
| Tableau. I.5 : Valeurs des paramètres pour divers matériaux. | 17 |
| Tableau. I.6 : Susceptibilité magnétique des principaux types de matériaux magnétiques | 19 |
| Tableau. II.1 : Paramètres du système | 47 |
| Tableau. III.1 : Les valeurs optimales des paramètres des algorithmes PSO | 72 |
| Tableau. III.2 : les valeurs optimales de la fonction objective et le temps d'achèvement de chaque algorithme | 76 |
| Tableau. III.3 : Les dimensions des bobines avant et après optimisation | 77 |

liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Principe du chauffage par induction | 07 |
| Figure I.2 : Répartition de la densité de courant depuis la surface | 09 |
| Figure I.3 : distribution de puissance pour une billette en acier magnétique | 10 |
| Figure I.4 : Composants principaux de la table de cuisson par induction | 15 |
| Figure I.5 : différents types de topologie d'inducteurs | 16 |
| Figure I.6 : Onduleur de tension et Onduleur de courant | 17 |
| Figure I.7 : Système électrique de la table de cuisson à induction | 20 |
| Figure I.8 : temps de croissance de la température | 20 |
| Figure I.9 : consommation d'énergies | 21 |
| Figure I.10 : consommation d'énergie pour plusieurs types de cuisson | 21 |
| | |
| Figure II.1 : schémas du système étudié | 24 |
| Figure II.2 : Schéma de processus du chauffage par induction | 25 |
| Figure II.3 : chauffage par induction en Modèle axisymétrique | 26 |
| Figure II.4 : chauffage par induction dans le plan de coordonnées cylindriques (r, Φ, z) | 30 |
| Figure II.5 : l'axisymétrie du système et le Domain d'étude | 32 |
| Figure II.6 : le Domain d'étude et les conditions aux limité imposées | 35 |
| Figure II.7 : Schéma du couplage fort | 40 |
| Figure II.8 : domaine d'étude | 42 |
| Figure II.9 : Géométrie du système étudié | 43 |
| Figure II.10 : Domaine de résolution du dispositif | 44 |
| Figure II.11 : Maillage dans le système étudié (inducteur, charge) | 45 |
| Figure II.12 : Résistivité en fonction de la température $\rho(T)$ | 46 |
| Figure II.13 : perméabilité en fonction de la température | 46 |
| Figure II.14 : Organigramme du modèle magnétothermique | 48 |
| Figure II.15 : Evolution de la température en fonction du temps | 49 |
| Figure II.16 : Distribution de la densité de puissance le long du rayon de la charge | 49 |
| Figure II.17 : Distribution de la température le long du rayon de la charge | 50 |
| | |
| Figure III.1 : Schéma de principe du déplacement d'une particule. | 58 |
| Figure III.2 : Organigramme de la méthode PSO | 60 |
| Figure III.3 : les trois types de topologie de voisinage | 61 |
| Figure III.4 : Organigramme d'évaluation de la fonction objectif | 67 |
| Figure III.5 : les dimensions de l'inducteur à optimiser | 67 |
| Figure III.6 : Organigramme d'optimisation avec PSO de la table de cuisson a induction | 70 |
| Figure III.7 : Maillage du système étudié | 73 |
| Figure III.8 : géométrie du système après optimisation avec PSO standard | 73 |
| Figure III.9 : Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec PSO standard | 73 |
| Figure III.10 : Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec PSO STANDARD | 74 |

| | |
|--|----|
| Figure III.11: géométrie du système après optimisation avec WIPSO | 74 |
| Figure III.12: Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec WIPSO | 74 |
| Figure III.13: Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec WIPSO | 75 |
| Figure III.14: géométrie du système après optimisation avec PSO-CFIWA | 75 |
| Figure III.15: Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec PSO-CFIWA | 75 |
| Figure III.16: Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec PSO-CFIWA | 76 |
| Figure III.17: Comparaison de la distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec les trois variantes de la PSO | 78 |
| | |
| Figure IV.1: schéma général d'un system de régulation | 82 |
| Figure IV.2: Schéma de principe d'une chaine de traitement de l'information | 84 |
| Figure IV.3: Schéma de principe d'une chaine de traitement de l'information | 85 |
| Figure IV.4: Schéma de principe d'une chaine de traitement de l'information | 86 |
| Figure IV.5: principe de fonctionnement de régulateur à action à deux positions | 87 |
| Figure IV.6: Organigramme de fonctionnement de régulateur TOR | 87 |
| Figure IV.7: Principe de contrôle de la temperature par hystérésis | 88 |
| Figure IV.8: Schéma général d'un système de contrôle de la température d'hystérésis à bande fixe | 89 |
| Figure IV.9: Ondes de courant et de température avec contrôle de la température à bande d'hystérésis | 90 |
| Figure IV.10: schéma du contrôle de la température par hystérésis à bande fixe de la table de cuisson | 91 |
| Figure IV.11: Évolution de la température en fonction du temps après régulation | 92 |
| Figure IV.12: Répartition de température après optimisation et régulation | 92 |

Notation

| | |
|---------------|---|
| ρ | Résistivité électrique. |
| μ_0 | Perméabilité magnétique à vide. |
| μ_r | Perméabilité magnétique relative. |
| f | Fréquence du courant induit. |
| δ | Profondeur de pénétration. |
| j_x | Densité de courant à la distance x de la périphérie. |
| j_0 | Densité de courant à la surface de l'induit ($x=0$). |
| ρ_θ | Résistivité du matériau à la température $\theta^\circ\text{C}$; |
| ρ_0 | Résistivité du matériau à la température de 0°C ; |
| θ | Variation de la température en degrés Celsius ; |
| α | Facteur dépend de la nature du matériau. |
| I | Courants induits (courant de Foucault) |
| e | Force électromotrice d'induction : |
| Φ | Flux d'induction magnétique |
| R | Résistance du matériau |
| P | pertes joules dues au courant de Foucault |
| H | Champ magnétique |
| E | Champ électrique |
| B | Induction magnétique |
| D | Induction électrique |
| J | Densité de courant de conduction |
| ρ | Densité de charges électriques libres |
| h | Coefficient de convection |
| λ | Conductivité thermique |
| ρ_m | Densité volumique |
| C_p | Chaleur spécifique |
| σ | Conductivité électrique |
| T | Température |

| | |
|------------------|---|
| m | la masse de la pièce à chauffer |
| T_0 | la température ambiante |
| c | la valeur moyenne de la capacité thermique relative du matériau |
| t | le temps nécessaire pour le chauffage |
| v_{ij}^k | La vitesse de la particule I a chaque iteration |
| W | la pondération d'inertie |
| C_1, C_2 | Les coefficients d'accélération |
| $rand_1, rand_2$ | des nombres aléatoires entre 0 et 1 |
| X_{ij}^k | la position de la particule à l'itération k |
| $pbest_{ij}^k$ | la meilleur position de la particule à l'itération k |
| $Gbest_j^k$ | la meilleur position dans l'essaim |
| q_{cond} | le flux de chaleur transmise par conduction |
| q_{conv} | le flux de chaleur transmise par convection |
| h | le coefficient de transfert par convection |
| T_s | la température de la surface |
| T_a | la température ambiante |
| q_{rad} | le flux de chaleur transmise par rayonnement |
| C_s | le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement |
| T_s | la température de la surface |
| T_a | la température ambiante |
| k | constante de Stéfan Boltzmann |
| ϵ | coefficient mutuel de rayonnement |
| B | l'induction, |
| H | le champ |
| μ_0 | la perméabilité du vide. |
| M | l'aimantation et |
| J | la polarisation magnétique. |
| V | le potentiel scalaire électrique. |
| A | le potentiel vecteur magnétique |
| q | l'énergie générée par une unité de volume (source de chaleur) |

Résumé

الملخص

في السنوات الأخيرة، زادت صناعة اجهزة الطهي التحريضي من حصتها السوقية في مجال طهي الطعام ، نتيجة لمميزاتها مقارنة بطرق الطهي الأخرى ، فمن مميزاتها انها لا تنتج تلوث و لا غازًا سامًا ، ولا تسبب انفجار بالمقارنة مع أدوات المطبخ التقليدية. على العكس من ذلك ، تقدم هذه العملية العديد من المزايا مثل كفاءة الطاقة المحسنة بشكل كبير ، السلامة المتزايدة (لا يوجد خطر حدوث حروق خطيرة) ، النضافة، بساطة الاستخدام ودقة ضبط الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو تحسين وتنظيم درجة الحرارة في أسفل الحاوية المخصصة لجهاز الطهي التحريضي. أولاً ، تتم الدراسة على نطاق واسع من تحليل الظاهرة الحرارية المغنطيسية التي تتحكم في نظام الطهي التحريضي علي محور ثنائي الأبعاد وهذا باستخدام طريقة العناصر المحددة من أجل معرفة توزيع درجة الحرارة في اسفل الحاوية. ثم نقوم بتطبيق طريقة تحسين درجة الحرارة على أساس استخدام أسراب الجسيمات لتحسين توزيع درجة الحرارة اسفل الحاوية.

و في الاخير وبالاعتماد علي تقنية التحكم في درجة الحرارة عن طريق التخلف الثابت. قمنا باستخدام هذه الاخيرة من أجل تحديد درجة الحرارة المناسبة لنظام الطهي التحريضي.

كلمات المفتاح: صفيحة الطهي التحريضي(T.C.P.I) , طريقة العناصر المحدودة(M.E.F), تحسين درجة الحرارة عن طريق سرب الجسيمات(OEP) , التحكم في درجة الحرارة عن طريق التخلف الثابت.

Abstract

In recent years, induction cooking has increased its market share in cooking food, a consequence of its great advantages (compared to other cooking methods), it will not produce waste or toxic gas, nor will it cause explosion compared to traditional kitchen appliances. On the contrary, this process offers several advantages such as greatly improved energy efficiency, increased safety (no risk of serious burns), ability to stay clean, simplicity of use and precision of power adjustment.

The aim of this work is to optimize and regulate the temperature in the bottom of a pan intended for an induction hob. First, the study makes extensive use of the analysis of the magnetothermal phenomenon governing the induction cooking system in axisymmetric 2D by the finite element method in order to determine the temperature distribution in the bottom of the container.

Then, a heuristic optimization method based on the use of particle swarms is implemented to optimize the quality of heating.

A regulation technique has been adopted for work using the hysteresis temperature control with fixed band in order to determine the temperature suitable for the induction cooking system.

Keywords: Cooking surfaces by induction, Finite Element Method (FEM), Optimization of the temperature by particle swarm, fixed band hysteresis temperature control.

Résumé:

Au cours de ces dernières années, la cuisson par induction accroît ses parts de marché dans la cuisson des aliments, conséquence de ses grands avantages (comparé aux autres modes de cuissons), elle ne produira pas de déchets ou de gaz toxique, ni ne provoquera d'explosion par rapport aux appareils et ustensiles de cuisine traditionnels. Au contraire, Ce procédé offre plusieurs avantages tels que : un bon rendement énergétique, sécurité accrue (pas de risque de brûlure grave), aptitude à rester propre, simplicité d'utilisation et précision du réglage de puissance.

Le but de ce travail est l'optimisation et la régulation de la température dans le fond d'un récipient destiné à une table de cuisson par induction. Dans un premier temps, L'étude fait largement appel à l'analyse du phénomène magnétothermique régissant le système de cuisson par induction en 2D axisymétrique par la méthode des éléments finis afin de déterminer la répartition de la température dans le fond du récipient.

Ensuite, une méthode d'optimisation heuristique se basant sur l'utilisation des essaims de particule est mise en œuvre pour optimiser la qualité de chauffe.

Une technique de régulation a été adoptée pour les travaux utilisant le contrôle de température d'hystérésis à bande fixe afin de déterminer la température adaptée au système de cuisson par induction

Mots clés : Tables de Cuisson Par Induction (T.C.P.I), Méthode des Eléments Finis (M.E.F), Optimisation de la température par essaim de particule, le contrôle de température par hystérésis à bande fixe.

INTRODUCTION GENERALE

Le phénomène de chauffage par induction fut découvert par le physicien anglais Mickael Faraday en 1831. C'est dans les années 1900 que l'on commence à utiliser l'induction comme procédé de chauffage des pièces en métal.

Le chauffage par induction est un procédé d'échauffement d'un matériau magnétique élaboré par deux lois de la physique, la loi de Lenz et l'effet Joule : tout corps conducteur d'électricité soumis à un champ magnétique variable est le siège des courants induits, celui-ci provoque l'échauffement de ce corps par effet Joule [1]. Le chauffage par induction magnétique est donc décrit et modélisé depuis longtemps, il est appliqué dans de nombreux domaines industriels tels que la fusion des métaux, la trempe superficielle et encore dans les industries agro-alimentaires [91]. Ce mode de chauffage a trouvé aujourd'hui sa place dans les cuisines domestiques (table de cuissons par induction).

La cuisson à induction est souvent considérée comme l'une des technologies les plus efficaces pour la cuisson domestique. Avec cette technologie, jusqu'à 90% de l'énergie consommée est transférée aux aliments, et environ 74% pour les systèmes électriques traditionnels et 40% pour le gaz [110]. Cette technologie repose sur le principe de l'induction magnétique, dans lequel les courants de Foucault sont générés dans un récipient ferromagnétique (la charge) en présence d'un champ magnétique variable. Ces courants induits dissipent la chaleur par effet de Joule dans la charge.

Depuis quelques années, le développement des plaques de cuissons par induction est en croissante progression en raison des niveaux de fiabilité et de coût atteint. Bien que leurs coût soit plus élevée que celui des autres systèmes (plaques électrique, cuisinière à gaz), ils apportent à leurs utilisateurs des avantages importants, notamment en consommation d'énergie ainsi que sur le plan sécuritaire. Avec la cuisson à induction, c'est le récipient qui est directement chauffé, tandis que le plan en vitrocéramique reste froid, ce qui élimine le danger de brûlure chez les jeunes enfants. En effet, la puissance de la cuisson programmée est directement convertie en chaleur à l'intérieur du récipient.

Une plaque de cuisson à induction est formée de trois sous-ensembles principaux ; Le convertisseur de puissance, l'inducteur et le récipient (la charge).

Dans les applications des plaques de cuissons par induction, la résistivité électrique ρ et la perméabilité magnétique relative μ_r de la charge à traiter dépendent fortement de la nature du matériau et des conditions imposées (température, intensité du champ magnétique). Au-dessus de la température de Curie, cette influence est fortement non-linéaire ce qui entraîne une variation de la profondeur de pénétration, de la température et la densité de puissance Il faut bien donc noter que tous les éléments constitutifs d'une plaque de cuisson par induction sont extrêmement liés et interdépendants. Les contraintes à respecter lors de la conception sont nombreuses [50] :

- Une bonne répartition de la température possible ;
- Une bonne régulation de la température ;
- Une perturbation rayonnée minimale,

En plus, l'optimisation de l'ensemble inducteur-récipient ne peut se faire sans une bonne connaissance de ses paramètres. Une plaque de cuisson à induction est un appareil complexe.

En dépit d'une théorie solide de plus de 100 ans, il n'est pas toujours simple d'étudier les structures électromagnétiques (inductances, transformateurs, machines tournantes, électroaimants) de façon analytique. Et même, lorsqu'une formulation analytique, munie d'un certain nombre d'hypothèses est utilisable pour dimensionner le dispositif, le concepteur préfère vérifier le respect du cahier des charges par simulation numérique avant de construire un premier prototype. La théorie de Maxwell qui a jeté les bases de l'électromagnétisme est constituée des équations aux dérivées partielles reliant, le champ magnétique et le champ électrique. Ces équations utilisant des grandeurs locales permettent d'accéder aussi aux grandeurs globales, telles que le courant, le flux et la force.

Les logiciels de simulation utilisent donc des méthodes numériques de résolution des équations de Maxwell pour modéliser une structure électromagnétique. Parmi ces méthodes nous trouvons la méthode des éléments finis (MEF) [58, 108, 109]. Beaucoup de travaux ont été élaborés sur les techniques d'alimentation des plaques de cuisson à induction, ainsi que sur la répartition de la température [57]. Cependant, peu de travaux ont été effectués l'optimisation de la température par les méthodes heuristique [106, 107] (PSO). et la régulation de la température, tenant compte du couplage magnétothermique.

Notre objectif dans ce manuscrit est de contribuer en premier lieu à la détermination de la répartition de la température dans le fond du récipient puis l'application des techniques d'optimisation et de régulation en vue d'améliorer les performances des plaques de cuisson par induction afin d'avoir une température convenable à la température de cuisson. Pour ce faire on a adopté le plan de travail constitué de quatre chapitres Organisés comme suit :

Dans le premier chapitre de cette thèse, une étude théorique et un état de l'art de la technologie du chauffage par induction et son principe de fonctionnements sont présentés.. par la suite, nous avons présenté une études comparatives entre la plaque de cuisson par induction et aux autres techniques de cuisson (gaz, résistances électrique) du point de vue consommation d'énergie, souplesse d'emploi, rendement, rapidité de cuisson des produits alimentaires et leurs sécurité.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation mathématique des phénomènes magnétodynamiques et thermiques qui régissent le système de cuisson par induction afin de déterminer la répartition de la température dans le fond d'un récipient. Il est important à noter que, pour le problème thermique, nous nous sommes limités par la conduction et la convection thermique. Les problèmes magnétodynamiques et thermiques intervenant dans le système étudié sont étroitement liés, ce qui implique de résoudre le problème couplé (magnéto-thermique). Pour ce faire, nous avons fait la résolution en utilisant la méthode des éléments finis en géométrie 2D axisymétrique. Cette étude nous a montre que la répartition de la température dans le fond du récipient n'est pas uniformément homogène.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons à la présentation de l'outil d'optimisation proposé pour le but d'optimiser la géométrie de l'inducteur contenant des bobines afin d'avoir une répartition homogène de la température dans le fond du récipient. Nous avons commencé premièrement, par donner un aperçu sur les paramètres intervenant dans les algorithmes d'optimisations en générale, puis nous avons présenté la méthode d'optimisation par essaim de particule (OEP) et ses deux autres variantes que nous avons appliqué à notre système étudié. La nouvelle disposition des bobines obtenues nous a donné une bonne répartition de la température dans le fond du récipient. Deuxièmement, nous avons présenté par une comparaison entre les résultats portes par les trois variantes de la méthode appliquée (OEP).

Le dernier chapitre est dédié à la régulation de la température dans le fond du récipient afin d'avoir une température stable et adaptable pour la cuisson habituelle des aliments. Pour ce

faire, nous avons appliqué une technique se basant sur " régulateur à hystérésis"[102]. Celle-ci a pour but de maintenir et de stabiliser automatiquement la température dans le récipient aussi proche que possible de la valeur désirée.

Après avoir appliqué ce type de régulation, une analyse comparative des résultats obtenus avant et après la régulation est présentée. Une étude de sensibilité permet également de vérifier la robustesse du régulateur.

On clôture ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et par des recommandations sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

Chapitre I

Généralités sur les tables de cuisson par induction

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

I.1. Historique

C'est dans les années 1990 que l'on a commencé à utiliser l'induction comme un procédé de chauffage de pièce en métal. Le phénomène de l'induction magnétique fut découvert vers 1831 par le physicien anglais Michael Faraday. Vers 1860, Maxwell propose une théorie générale de l'électromagnétisme classique qui pose les fondements de la théorie moderne. L'emploi de l'induction magnétique était très limité à cause des faibles puissances disponibles. L'avènement des générateurs dynamiques, en 1922, le rend plus efficace et des études scientifiques montrent que l'on peut chauffer différentes parties d'une pièce métallique sans chauffer les autres en jouant sur la fréquence, la puissance ainsi que les paramètres des matériaux tels que la résistivité électrique et la perméabilité magnétique.

Le traitement superficiel par l'induction est né, Vers les années 1960, avec l'arrivée des générateurs statiques, le développement de l'électronique de puissance et l'apparition des semi-conducteurs qui permettent de donner de plus grandes puissances et plus grande fréquence.

Aujourd'hui, grâce à l'évolution rapide de la technologie et aux techniques de simulations numériques, Le chauffage par induction est très répandu en milieu industriel, pour les traitements thermiques ou pour les opérations de soudure entre pièces métalliques ou encore dans le domaine domestiques (La cuisson par induction).

I.2. Principe du chauffage par induction

Le chauffage par induction est une technique de chauffage reposant sur l'induction électromagnétique et l'effet Joule. Toute substance conductrice de l'électricité plongée dans un champ magnétique variable (créée par l'inducteur) est le siège des courants électriques induits. Ces courants à leurs tours dissipent de la chaleur par effet Joule dans la substance (la charge) où ils ont pris naissance [1, 2]. Concrètement, l'inducteur (la bobine) et la charge (la pièce à chauffée) sont les principaux composants d'un système chauffage par induction. La relation I.1 donne la puissance dissipée dans la charge [3].

$$P = R.I^2 \quad \text{I.1}$$

Avec :

R et I sont respectivement la résistance de la charge et le courant qui la traverse.

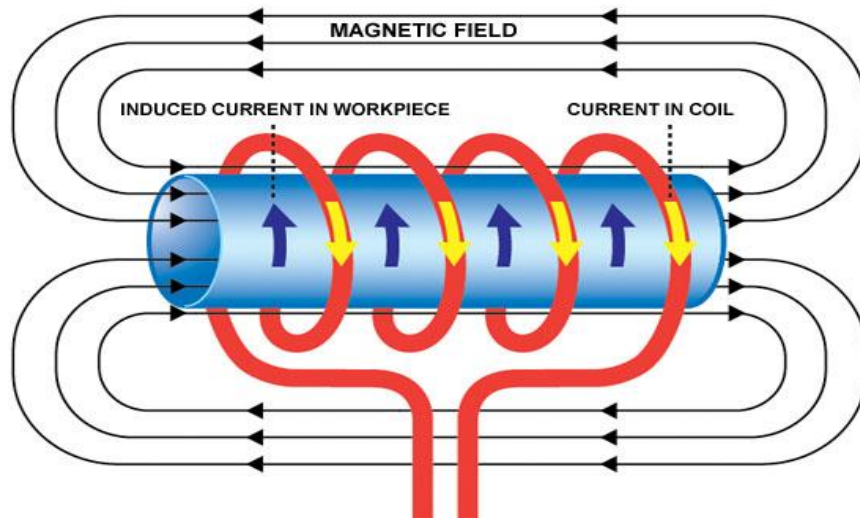


Figure I.1: Principe du chauffage par induction

En générale, dans les applications du chauffage par induction, l'échauffement par l'effet de Joule obtenu dans la charge dépend des paramètres électriques, magnétiques des matériaux chauffés et la bande de fréquence électrique utilisée, c'est-à-dire par la profondeur de pénétration ainsi par les densités de puissance de chauffage obtenues [4].

Les applications du chauffage par induction ne sont pas limités par la géométrie montré dans la Figure I.1, mais peuvent aussi prendre d'autre type de configurations d'inducteurs et de la pièce à chauffer selon l'application du chauffage (fusion, chauffage homogène, traitement thermique, soudage, cuisson par induction...ect)

D'autre part il est difficile d'établir une formule mathématique qui permis de déterminer la résistance R du conducteur à chauffer pour tout application de la chauffage par induction a cause de la non uniforme de la distribution des courants de Foucault. Cependant on définir la profondeur de pénétration qui est l'épaisseur de peau qui convient la grand partie des courants induits.

I.3. Caractéristiques électriques du chauffage par induction

Dans les applications du chauffage par induction on distingue deux principales grandeurs caractérisant l'efficacité thermique et énergétique de l'induction [4]:

- l'effet de peau, et l'un des caractéristiques du chauffage par induction qui est définit par la pénétration et la répartition des courants induits dans la pièce à chauffée, Ou les courants sont plus important à la périphérie qu'au cœur de la pièce.
- la puissance dissipée par effet de joule dans la pièce qui caractérise la pénétration de l'énergie dans la charge

I. 3.1. Profondeur de pénétration

L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui est défini par la profondeur de pénétration « δ » des courants induits dans un conducteur placé dans un champ magnétique variable [5]. Elle est donnée par la relation (I.2). Ce phénomène démontre également que plus la fréquence d'alimentation f augmente, plus les courants induits se concentrent à la surface de la pièce.

La valeur de la densité de courant induit est toujours plus forte lorsqu'en s'approche de la périphérie du conducteur, a contrario elle décroît progressivement lorsqu'en s'approche à l'intérieur du conducteur. Il en résulte que la chaleur est principalement générée à l'extérieur du conducteur par effet Joule.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

ρ : Résistivité électrique [$\Omega \cdot \text{m}$].

μ_0 : Perméabilité magnétique à vide [H/m].

μ_r : Perméabilité magnétique relative.

f : la fréquence du courant induit [Hz].

Puisque $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, la relation (I.2) peut s'écrire :

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad (\text{I.3})$$

En effet, la densité des courants induits décroît de manière exponentielle vers le centre de la pièce avec la distance à la surface comme il est montré dans la figure (I.2) [4]. La relation (I.4) exprime que la répartition de la densité de courant J depuis la surface de la pièce à chauffée.

$$j_x = j_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

j_x : Densité de courant à la distance x de la périphérie.

j_0 : Densité de courant à la surface de l'induit ($x=0$).

δ : Profondeur de pénétration.

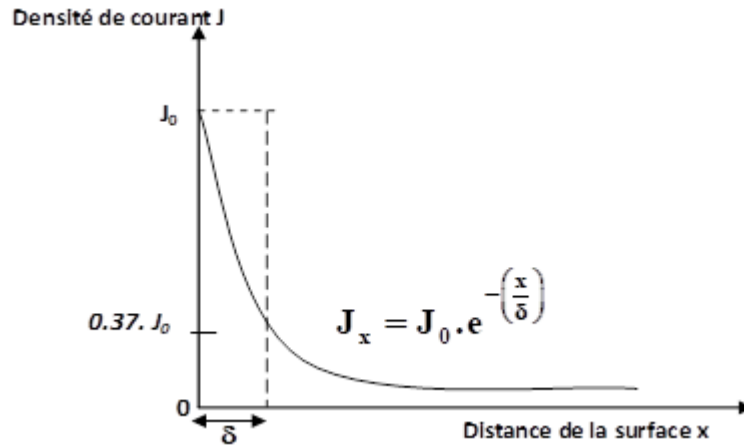


Figure. I.2: Répartition de la densité de courant depuis la surface[4].

I. 3.2. La résistivité électrique

La résistivité électrique est l'un des caractéristiques qui influent sur la profondeur de pénétration selon la relation (I.2). Pour tous matériaux magnétiques, la résistivité croit généralement avec la température [6]. L'évolution de la résistivité électrique en fonction de la température et de temps est généralement donnée par la relation (1.5):

$$\rho_{\theta} = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta] \quad (I.5)$$

Avec :

ρ_{θ} : Résistivité du matériau [$\Omega \cdot m$] à la température θ °C ;

ρ_0 : Résistivité du matériau à la température de 0°C ;

θ : Variation de la température en degrés Celsius ;

α : Facteur dépend de la nature du matériau.

Le tableau I.1 montre la variation de la résistivité du matériau « medium Carbon Steele » en fonction de la température.

Tableau. I.1: Résistivité en fonction de la température du medium Carbon Steele

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T[k] | 293 | 373 | 473 | 573 | 673 | 773 | 873 | 973 | 1013 | 1073 | 1273 | 1473 |
| ρ_{θ} [$\Omega \cdot m$] | 1.70 | 2.32 | 3.10 | 4.10 | 5.05 | 5.05 | 7.72 | 9.35 | 10.3 | 11.3 | 11.3 | 12.3 |
| * 10^{-7} | | | | | | | | | | | | |

I. 3.3. La perméabilité magnétique relative.

Selon la relation (I.3), la profondeur de pénétration dépend de la perméabilité magnétique (μ). Généralement, pour les matériaux magnétiques ($\mu_r > 1$), les valeurs de la perméabilité magnétique variant avec la température [7]. Ces derniers sont à prendre comme une valeur moyenne, car dans ce type des matériaux la profondeur de pénétration est toujours réduite. Dans le cas de l'acier magnétique, on doit distinguer deux états :

1. Avant la température de Curie ($< 760 \text{ }^\circ\text{C}$) : $\mu_r \gg 1$; le matériau est dans l'état ferromagnétique ;
2. Après la température de Curie ($> 760 \text{ }^\circ\text{C}$) : $\mu_r = 1$; le matériau devient amagnétique.

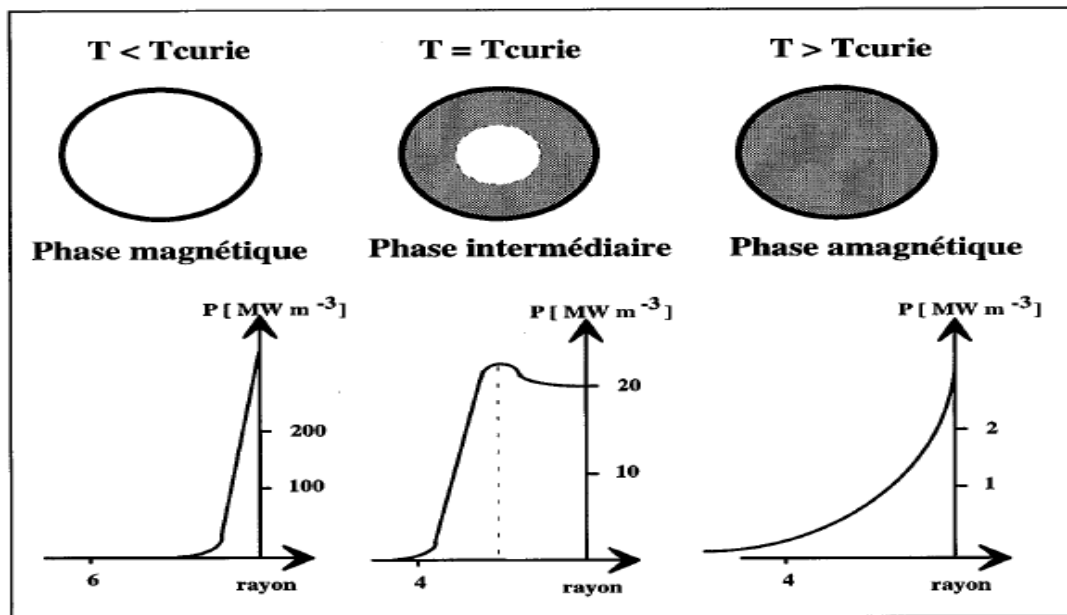


Figure. I.3: distribution de puissance pour une billette en acier magnétique [8].

La figure (1.3) montre les trois phases principales au cours du processus d'échauffement d'une billette d'acier magnétique de diamètre 120 mm, avec une fréquence d'alimentation de 300 Hz

- la température de la billette est inférieure à la température de Curie en tous points de la billette; la profondeur de peau n'est pas importante dans la phase magnétique.
- la phase amagnétique démontre que la température de la billette est supérieure à la température de Curie; la profondeur de peau est alors très grande.
- Dans la phase intermédiaire on peut observer les deux phases citées précédemment en même temps

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

I.3.4. Influence de la fréquence.

La fréquence f est l'un des paramètres qui joue un rôle important sur La profondeur de pénétration. D'après la formule (I.3), La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence. Alors que la résistivité et la perméabilité magnétique relative sont des caractéristiques de la pièce à traité, la fréquence est donc un moyen de contrôle de la profondeur de pénétration [9]. La plage de fréquence souhaitable sont données sur le tableau (I.2).

Tableau. I.2: Lien entre les fréquences d'utilisation et les applications du chauffage [10].

| Type de chauffage | Fréquence | Application |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Pénétrant | 1Hz à quelque KHz | Forage, fusion, induction cooking |
| Superficiel | 10 à 100KHz | Tremp superficielle, brassage |
| Pelliculaire | 10 à 1000KHz | Soudage des tubes |

Généralement les fréquences utilisées en chauffage par induction sont classifiées en quatre familles :

- Basse fréquence, ou fréquence du réseau 50Hz ;
- Moyenne fréquence de 60 à 10000 Hz ;
- haute fréquence de 10 à 300 KHz ;
- hyperfréquence au delà de 300 KHz.

Le tableau (I.3) présente les valeurs δ pour différents matériaux à plusieurs températures

Tableau. I.3 : valeur de δ (mm) pour divers matériaux à différentes températures [7, 10].

| f(Hz) | Acier $\mu_r=100$ 20°C | Acier 800°C | Cuivre 20°C | Cuivre $\mu_r=100$ 20°C | Aluminium 20°C | Aluminium 500°C | Graphite 20-1300 °C |
|-----------------|------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| 50 | 3.18 | 67.2 | 9.35 | 19.4 | 11.9 | 19.4 | 201 |
| 10 ² | 2.25 | 47.5 | 6.61 | 13.4 | 8.4 | 13.4 | 142 |
| 10 ³ | 0.71 | 14.6 | 2.09 | 4.26 | 2.66 | 4.26 | 45 |
| 10 ⁴ | 0.225 | 4.75 | 0.661 | 1.34 | 0.84 | 1.34 | 14.2 |
| 10 ⁵ | 0.071 | 1.46 | 0.209 | 0.42 | 0.266 | 0.42 | 4.5 |
| 10 ⁶ | 0.0225 | 0.475 | 0.066 | 0.134 | 0.084 | 0.134 | 1.42 |

7

I.3.5. Puissance nécessaire au traitement thermique

La puissance nécessaire de traitement thermique recherchée, dans les systèmes de chauffage par induction, dépend de la masse à chauffer, de la température à atteindre et du temps de chauffe. Elle est donnée par la relation (I.6) [11].

$$P = mc(T - T_0)/t \quad (I.6)$$

Avec :

m : est la masse de la pièce à chauffer

T₀ : est la température ambiante

c : est la valeur moyenne de la capacité thermique relative du matériau

t : est le temps nécessaire pour le chauffage

I.4. Transfert Thermique

Dans le procédé de chauffage par induction, la répartition de la température dans la pièce à chauffer est déterminée par la répartition des courants de Foucault et par la transmission de la chaleur et des processus de stockage [12]. La transmission de la chaleur entre les milieux peut devenir un véritable problème lorsqu'elle dépend d'un problème multi-physique.

En générale, Le transfert de chaleur est défini par trois types. Il s'agit du transfert par conduction, par convection et par rayonnement [13].

I.4.1. La conduction

La conduction de la chaleur consiste à transmettre la chaleur entre les différentes parties de la pièce à chauffée, ceci dû à la non uniformité de la répartition de température au niveau de la surface extérieur de cette pièce. La conduction est donc le transfert de la chaleur des parties chaudes vers les parties froides de la pièce, ce phénomène est due à la diffusion progressive de l'agitation thermique au sein d'une pièce. Ce mode de transfert porte le nom de conductivité thermique et est décrit par la loi de Fourier donnée par la relation (1.7) [12, 13]:

$$q_{cond} = -\lambda grad(T) \quad (I.7)$$

Où :

q_{cond} est le flux de chaleur transmise par conduction ($W.m^{-2}$).

λ est la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

T est la température (K).

I.4.2. La convection

La convection thermique est le transfert de chaleur qui se fait à travers les surfaces et en présence de fluides. Autrement dit c'est le transfert de la chaleur de la surface de la pièce à chauffée vers l'air ambiant. Ce mode de transfert est le plus utilisé dans les études des échanges thermiques entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert de la chaleur par convection dans une pièce à travers sa surface est décrit par la loi de Newton donnée par la relation (1.8) [12, 13]:

$$q_{conv} = h (T_s - T_a) \quad (I.8)$$

Avec :

q_{conv} est le flux de chaleur transmise par convection ($W.m^{-2}$),

h est le coefficient de transfert par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$),

T_s est la température de la surface (K) et

T_a est la température ambiante (K).

I.4.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Ce mode est un processus physique de transmission de la chaleur entre deux corps mis en vis-à-vis et sans contact entre eux. Un des exemples le plus simple est le rayonnement solaire. Une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid causée par la différence de température ,qui est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann donnée par la relation (1.9) [14]:

$$q_{rad} = k \varepsilon (T) (T_s^4 - T_a^4) \quad (I.9)$$

Où:

q_{rad} est le flux de chaleur transmise par rayonnement ($W.m^{-2}$).

T_s est la température de la surface (K) et

T_a est la température ambiante (K).

K est constante de Stéfan Boltzmann égale à $5,67 * 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$;

ϵ est coefficient mutuel de rayonnement

I.5. Couplage électromagnétique-thermique

Nous avons vu précédemment les caractéristiques électriques et thermiques du chauffage par induction. Ces caractéristiques sont liées dans le processus d'échauffement d'un corps magnétique par induction (Figure I.1). Dans ce qui suit nous présentons les relations entre les

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

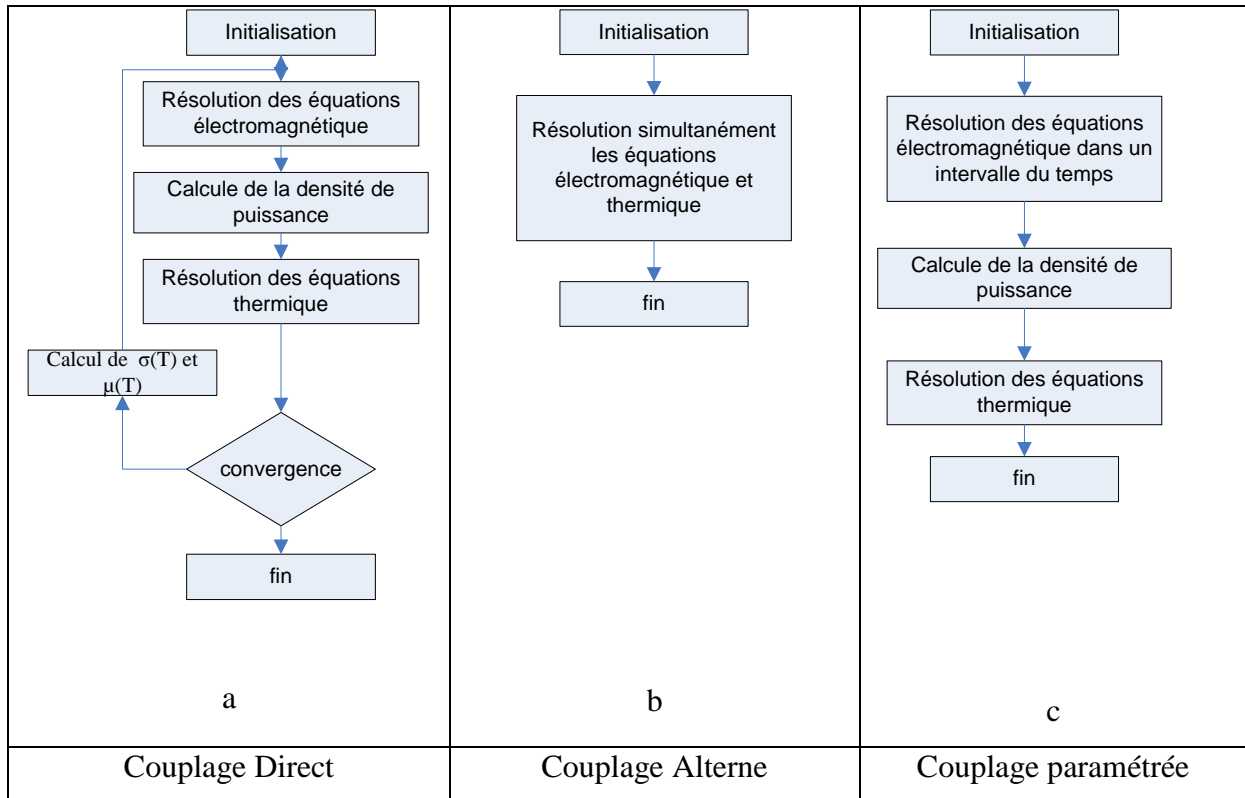
deux phénomènes électriques et thermiques. Les sources de la chaleur sont principalement les courants induits qui sont générés par l'inducteur, ceux-ci provoquent directement l'échauffement par l'effet de joule du corps ou ils sont nés, en plus les propriétés de matériau dépendent directement de la température. On peut dire que le phénomène électrothermique dépend des caractéristiques physiques des matériaux et des caractéristiques électriques (la fréquence, le courant ...ect). L'ensemble de ces caractéristiques sont couplées entre eux pour former ce qu'on appelle le chauffage par induction.

Le chauffage par induction est l'un des systèmes électromagnétiques couplés [15]. Il existe trois types du couplage électrothermique qui sont utilisé pour la résolution des problèmes dit couplée [12].

- Modèle Du Couplage Direct (FORT)
- Modèle Du Couplage Alterne (FAIBLE)
- Modèle Du Couplage paramétrée

Le tableau (I.4.) montre les trois procédures de couplage électromagnétique et thermique. (a) : Couplage Direct, (b) : Couplage Alterne, (c) : Couplage paramétrée.

Tableau. I.4: algorithme de couplage magnétothermique



Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

Dans ce travail nous nous intéressons à la méthode de couplage dit fort (fully coupled). ce type de couplage permet la résolution des équations magnétiques et thermiques simultanément à chaque pas de temps ce qui minimise le temps de calcul globale, tandis que le couplage faible est possible, sauf qu'il prend beaucoup plus du temps par rapport au couplage fort [15].

I.6. Table de cuisson par induction

Au cours de ces dernières années, la technique du chauffage par induction est largement utilisée dans les milieux industriels, Elles concernent plus particulièrement la métallurgie et les traitements des métaux ou encore pour des opérations de soudure entre pièces métalliques. La cuisson par induction est l'un des applications du chauffage par induction, elle très utilisée de nos jours grâce à ces avantages par rapport de la cuisson par gaz [16, 17].

I.6.1. Composants d'une table de cuisson par induction

Une table de cuisson par induction comprend généralement de trois éléments :

- Un ou plusieurs inducteurs de forme (pane-cake) de différente topologie.
- Une source tension à basse ou moyenne fréquence associant un convertisseur de fréquence (le générateur de type onduleur à résonance)
- Le récipient (la charge)

La figure (1.4) montre les principaux composants de la table de cuisson par induction.

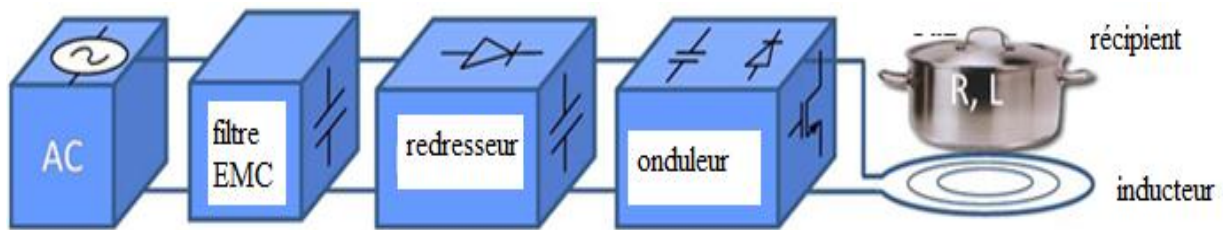


Figure. I.4: Composants principaux de la table de cuisson par induction[18].

I.6.2. Inducteur

L'inducteur est l'élément principal dans les applications du chauffage par induction. Il en est de même pour les tables de cuisson par induction. La taille et la forme de l'inducteur doivent correspondre à la forme de la pièce à chauffer [19]. Plusieurs topologies d'inducteurs ont été présentées au cours de ces dernières années afin d'améliorer le rendement et l'efficacité de la table de cuisson. Généralement la topologie spirale d'inducteur de forme pane-cake qui est la plus couramment utilisée et elle est construite à partir des fils de litz en raison de leur faible

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

résistance aux fréquences élevées. La Figure 1-5 montre des exemples sur la configuration d'inducteurs, (a) : inducteur de type bobinage concentré, (b) : multi-inducteur circulaire, (c) : multi-inducteur posé en parallèle, (d) : multi petit inducteur pose en série [19, 20]. Une bonne conception de l'inducteur permet d'obtenir une évolution de la température homogène dans la charge à chauffée, de maximiser le rendement et améliore l'efficacité de la table de cuisson par induction.

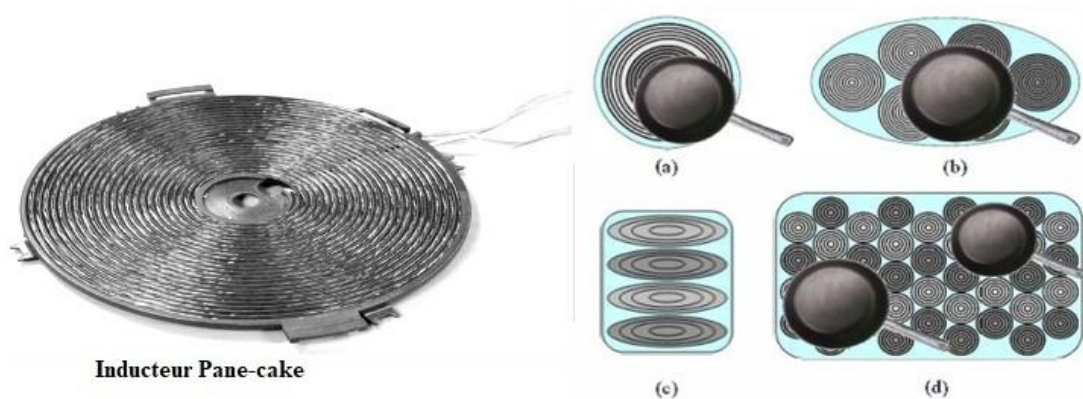


Figure I.5: différents types de topologie d'inducteurs [19].

I.6.3. La charge (récipients)

La plupart des récipients utilisés pour les tables de cuisson par induction sont de géométrie circulaire et leurs dimensions dépendent de l'utilisateur [16]. Ces récipients sont généralement construits à base des matériaux ferromagnétique [21], C'est le cas des récipients à base de fer tels que l'acier ou la fonte, et aussi à base des aciers inoxydables s'ils sont en inox ferromagnétique.

- Les principaux matériaux ferromagnétiques sont le fer, le cobalt, le nickel, le gadolinium, et leurs alliages. Il faut toutefois signaler que certains alliages de fer ne sont pratiquement pas ferromagnétiques, tels que l'alliage 80% fer 12%Mn et l'alliage 68%Fe 32%Ni qui se comportent comme des matériaux paramagnétiques. Il en est d'ailleurs de même pour tous les matériaux ferromagnétiques au-dessus d'une température dite "de Curie" exemple : (TC : fer = 770°C, Ni=358°C, Co=1 127°C). Par contre, certains alliages comme l'alliage 61%Cu 23,5%Mn 15%Al sont fortement ferromagnétiques alors que, tous les constituants pris séparément, ne possèdent pas des propriétés ferromagnétiques. Ainsi, pour les matériaux de base utilisés pour la fabrication des ustensiles de cuisson, nous présentons les valeurs indiquées au **Tableau 1.5** pour une fréquence d'induction de 25 kHz.

Tableau 1.5: Valeurs des paramètres pour divers matériaux.

| Matériaux | Résistivité ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$) | Perméabilité | Epaisseur de peau (mm) |
|-------------------|---|--------------|------------------------|
| Aluminium | 3 | 1 | 1.7 |
| Inox austénitique | 80 | 1.02 | 2.8 |
| Inox ferritique | 60 | 90 | 0.25 |
| Acier extra doux | 20 | 50 | 0.2 |

I.6.4. Onduleurs

L'alimentation de la plaque à induction est une partie principale du dispositif, c'est grâce à elle que nous pouvons contrôler la puissance injectée dans la pièce. Généralement ce dispositif est alimenté par des onduleurs à résonance pouvant développer des alimentations hautes fréquences (Figure I.8) [22].

L'impédance des bobines de l'inducteur est un paramètre qui peut être utilisé pour déterminer le type de source, courant ou tension [10]. Une source de courant doit être choisie lorsque la valeur de l'impédance est faible. Et contrairement une source de tension doit être appliquée si la valeur de l'impédance est plus élevée. La figure (I.6) présente les structures des onduleurs de tension et de courant

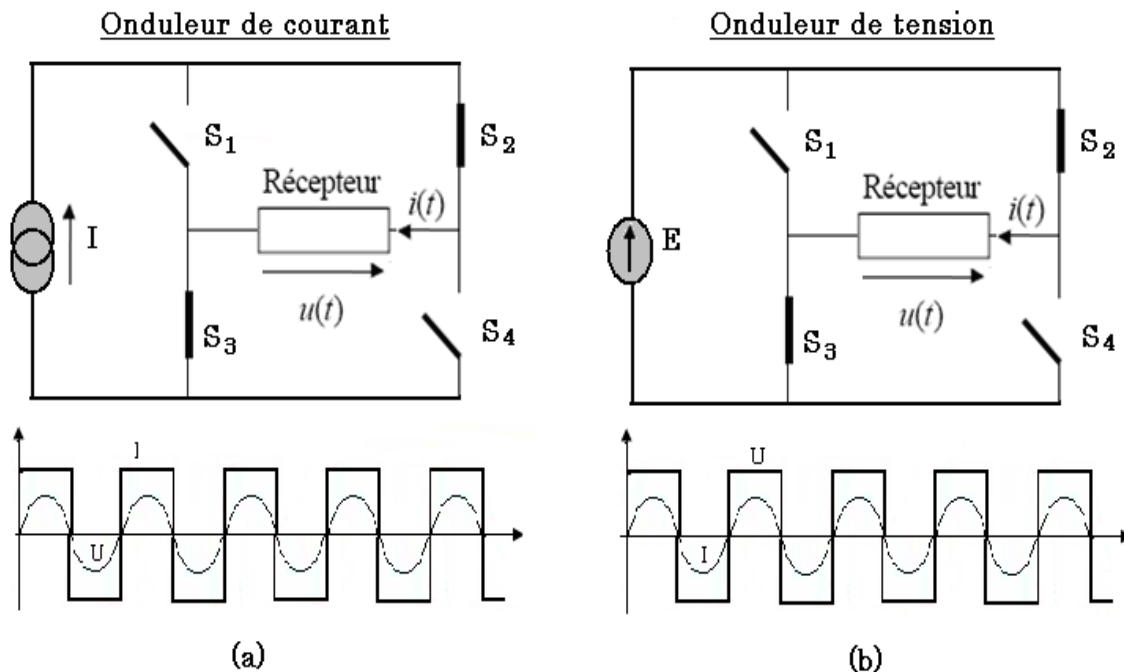


Figure. I.6: Onduleur de tension et Onduleur de courant

I.6.5. Avantages de la plaque a induction

- La possibilité de contrôler la répartition de la température dans le fond du récipient par l'optimisation de la forme de l'inducteur.
- Une faible inertie thermique ;
- Réglage très précis de la puissance et de la température ;
- Une rapidité de chauffage ;
- Sécurité envers l'utilisateur ;
- Localisation précise des zones à chauffer sur la pièce à traité ;
- Un rendement de chauffage souvent très élevé ;
- Facilité de contrôle, régulation et automatisation.

I.6.6. Inconvénients

- Des coûts d'acquisition élevée pour les fortes puissances ;
- Son prix d'achat est supérieur par rapport aux autres systèmes de cuisson ;
- Des récipients adaptables (généralement sont de type ferromagnétiques).

I.7. Classification des matériaux

Les théories de la physique des matériaux montrent qu'en présence d'un champ magnétique d'excitation, les matériaux sont classés en quatre types sur la base de leur comportement [23]:

- Les matériaux ferromagnétiques
- Les matériaux diamagnétiques
- Les matériaux paramagnétiques
- Les matériaux ferrimagnétiques

I.7.1. Les matériaux magnétiques

Les matériaux se caractérisent par leurs réactions à la grandeur physique qui est le champ magnétique, celui-ci lié directement au courant électrique [24]. Le champ magnétique ne peut être mesuré directement, il est déduit de la mesure de l'induction dans le vide. L'induction est alors la quantité de flux magnétique par unité de surface. La relation entre l'induction et le champ magnétique peut être décrit par la relation (I.9).

$$B = \mu_0 H \quad (I.10)$$

Avec :

Chapitre -I : Généralités sur les tables de cuisson par induction.

B est l'induction,

H est le champ

μ_0 est la perméabilité du vide.

L'aimantation et la polarisation magnétique pour un matériau magnétique sont liées par la relation (I.11):

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 H + J \quad (\text{I.11})$$

Avec :

M est l'aimantation et

J est la polarisation magnétique.

Avec :

$$H = B \mu_0 - M \quad (\text{I.12})$$

Pour de nombreuses substances magnétiques, M est reliée à H par l'égalité suivante :

$$M = xH \quad (\text{I.13})$$

Les valeurs typiques de susceptibilité rencontrées pour ces types de matériaux ainsi que quelques exemples de matériaux représentatifs sont présentées au tableau 1.6.

Tableau 1.6: Susceptibilité magnétique des principaux types de matériaux magnétiques [25].

| Type de matériau | Susceptibilité magnétique | exemple |
|------------------|---------------------------|------------|
| Diamagnétique | -1×10^{-5} | Cu, Au |
| Ferrimagnétique | 3000 | FeO, MnO |
| Ferromagnétique | 50 à 10000 | Fe, Ni, Co |
| Paramagnétique | 10^{-5} à 10^{-3} | AL |

I.8. Technologies électriques des plaques de cuisson

Les types des systèmes de cuisson sont nombreux suivant la nature de la source d'énergie (électrique ou bien gaz) et les caractéristiques de la plaque de cuisson (récipient). L'évolution de la technologie électrique permet de développer plusieurs systèmes de cuissons électriques telles que La plaque électrique avec foyer en fonte, La plaque vitrocéramique et La plaque à induction. Ces derniers sont totalement différents de point de vue technologique (Figure I.7).

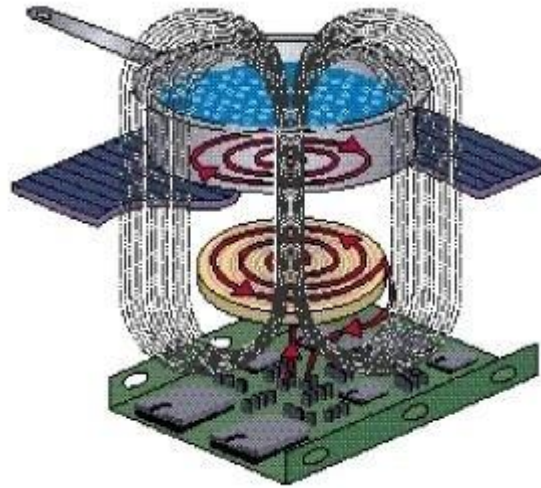


Figure I.7: Système électrique de la table de cuisson à induction

I.9. Comparaison des différents modes de cuisson

Plusieurs travaux de recherches ont été présentés pour la comparaison des performances des différentes méthodes de cuisson. Ces travaux montrent également qu'il n'est pas facile de faire une étude comparative des performances des plaques de cuisson à cause de la disponibilité de plusieurs versions de chaque type de plaque de cuisson sur le marché. Pour ce faire, une étude basée sur la vitesse de croissance de la température dans une plage de 20 à 95°C de deux volumes d'eau 0.5 et 1.5L et les énergies consommées (Figure I. 8), (Figure I. 9). Les résultats obtenus par cette dernière figure montrent que la plaque à induction fournit une grande efficacité énergétique par rapport aux autres systèmes de cuisson [26, 27].

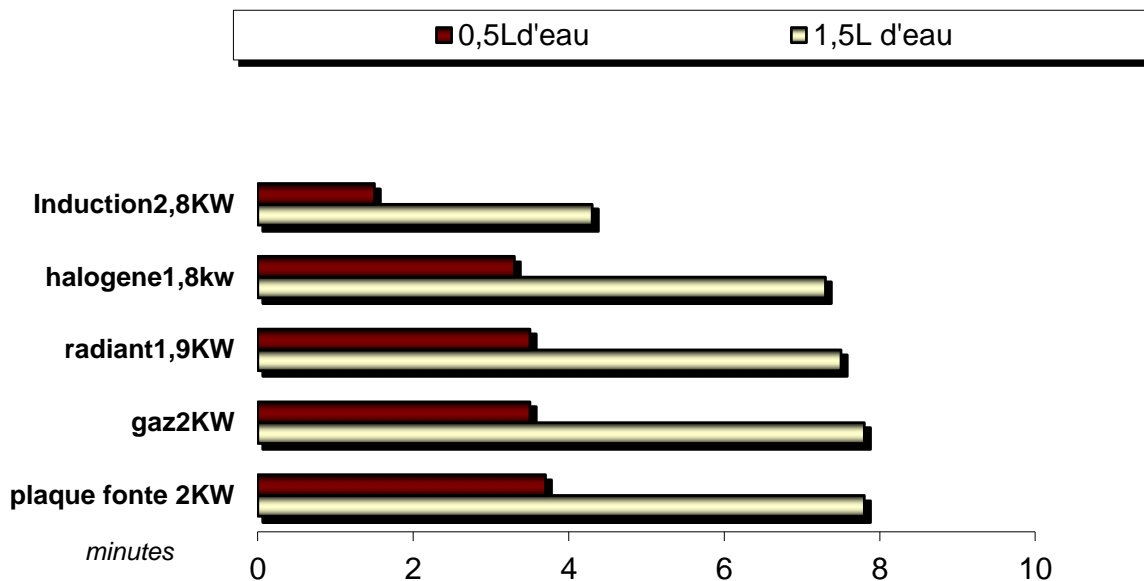


Figure. I.8: temps de croissance de la température

Chapitre -I: Généralités sur les tables de cuisson par induction.

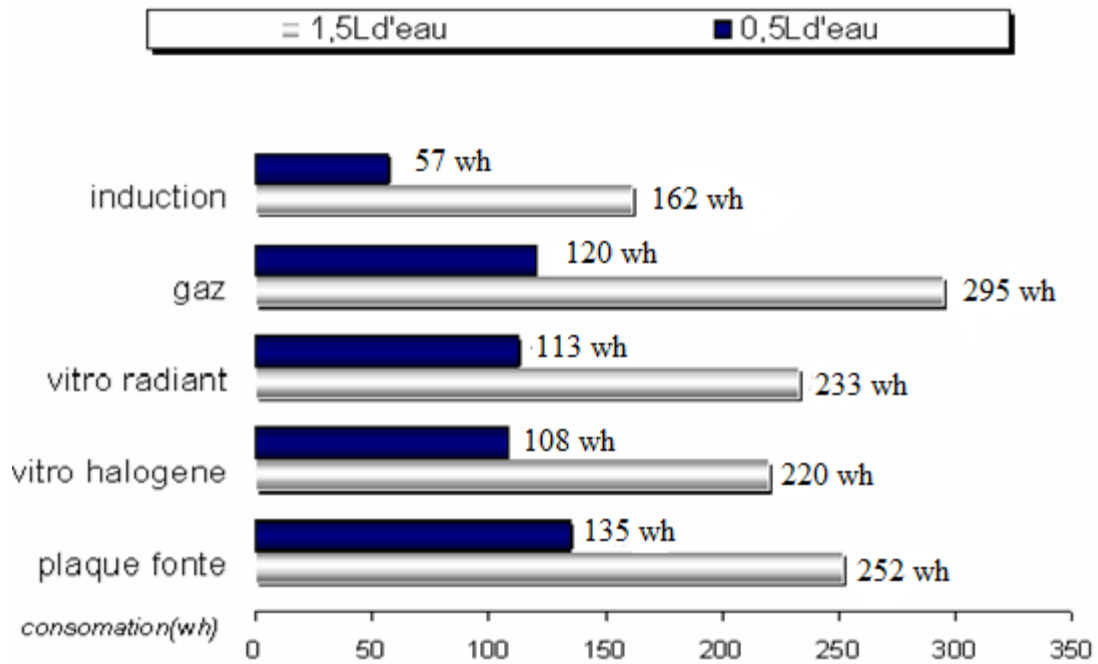


Figure. I.9: consommation d'énergies

I.10. Sécurité thermique du plan de cuisson

Une table à induction ne produit de chaleur que grâce au récipient [28]. D'autre part, le récipient étant le générateur de chaleur, la vitrocéramique reste froide, pas de risque de brûlure, alors que pour les tables halogènes, la température de la vitrocéramique peut atteindre 500°C. Sans compter les facilités de nettoyage : plus de carbonisation lors des débordements (figure 1.10).

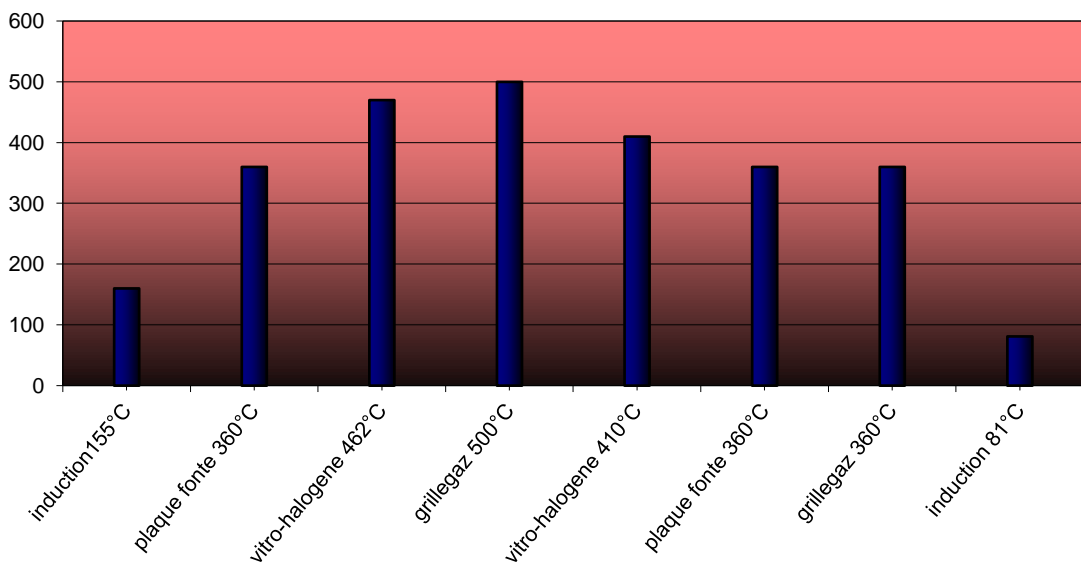


Figure. I.10: consommation d'énergie pour plusieurs types de cuisson

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqués un historique avec un principe générale sur les caractéristiques du chauffage par induction, telles que : la transmission de la chaleur dans le corps à chauffer à partir des courants de Foucault, les paramètres qui interviennent sur la répartition de la chaleur, les différentes applications du chauffage par induction.

La cuisson par induction est l'une des applications du chauffage par induction. Elle est constituée par une bobine en forme pane-cake placée sous l'induit (le récipient). Dans le système de cuisson à induction, la chaleur est produite directement dans le récipient grâce au champ magnétique crée par l'inducteur.

Pour l'étude, le calcul et le développement de ces inducteurs, un code utilisant des éléments finis en 2D sera développé dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Modélisation de la table de cuisson par induction

II.1. Introduction

La modélisation de la table de cuisson par induction n'est pas un problème nouveau, et la formulation mathématique de ce type de problème que nous allons utiliser dans ce chapitre est déjà utilisée dans plusieurs travaux précédents. La simulation numérique est l'un des méthodes la plus utilisée dans la résolution des problèmes électromagnétiques et thermiques, elle permet de comprendre tous les phénomènes physiques régissant le procédé de cuisson par induction et d'analyser les paramètres qui influent sur la répartition de la température dans le fond du récipient.

Dans ce chapitre nous déterminons l'évolution de la température sur le long du rayon de la plaque à chauffée (Récipient). Nous allons premièrement appliquer les équations de Maxwell, leurs relations constitutives et les procédures de calcul électromagnétique pour la détermination de la densité de puissance. La deuxième partie présente la modélisation des problèmes thermiques et les différents types de transfert thermiques. Dans la troisième partie du chapitre Nous présentons le couplage magnétothermique afin de déterminer l'évolution de la température dans la charge.

II.2. Description physique du problème

Principalement un dispositif de chauffage par induction est souvent constitué d'un matériau conducteur que l'on souhaite chauffer (la charge) au moyen de courants de Foucault générés par un champ magnétique variable dans le temps, créé par des enroulement parcourues par un courant électrique alternatif (l'inducteur). A leur tour, ces courants de Foucault, dissipent de la chaleur par effet Joule [4, 29].

La représentation du dispositif du système étudié (Table de Cuisson Par Induction T.C.P.I) est donnée par la figure (II.1).

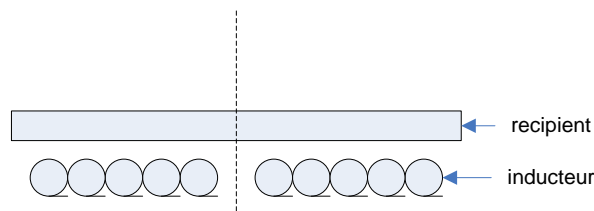


Figure II.1: schémas du système étudié

L'inducteur est constitué par des bobines placées dans un support en ferrite. La charge (récipient) est constituée avec un matériau ferromagnétique.

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que, Les propriétés physiques des matériaux ferromagnétiques utilisés dans la charge dépendent de la température et leurs variations imposent des changements sur la répartition et l'intensité du champ magnétique. A son tour la variation du champ magnétique implique une variation de la température dans la pièce à chauffer. On peut dire alors que le processus d'échauffement par l'induction magnétique est défini par des réactions réversible entre le champ magnétique, les propriétés physiques des matériaux constituent le corps à chauffer et la température (Figure II.2).

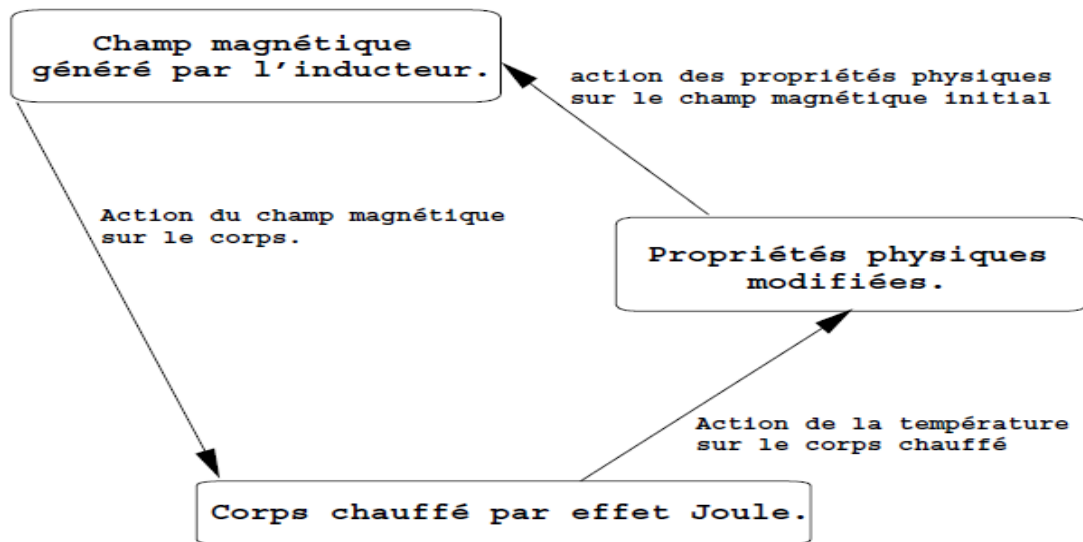


Figure II.2: Schéma de processus du chauffage par induction [29].

la modélisation mathématique de tous les phénomènes électriques et magnétiques de n'importe quel problème en électrotechnique, fait appel aux équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux [30]. Il s'agit des modèles:

- Electrostatique
- Magnétostatique
- Electrocinétique
- Magnétodynamique

Dans ce travail nous nous intéressons au modèle magnétodynamique [31] car les sources de courant et de tension sont variables en fonction de temps.

II.3. Model axisymétriques

Dans les études des systèmes électromagnétiques (machine tournante, transformateur, les tables de cuisson par inductionect), certains systèmes ayant une géométrie symétrique, comme par exemple la plaque de cuisson par induction [32].Plusieurs problèmes traités comme des modèles bidimensionnels alors que dans la réalité ce sont des modèles tridimensionnels, cependant dans le cas d'une table cuisson par induction le modèle bidimensionnel n'est pas applicable, mais elle peut être étudiée en modèle symétrie axiale car elle respect les conditions suivantes [33, 34]:

- Les géométries et les propriétés des matériaux des dispositifs présentent une symétrie de révolution autour d'un axe.
- Autour de l'axe de symétrie, Les sources de courants J sont les mêmes ;
- Le domaine d'étude Q choisi et les conditions aux limites sur frontière de ce domaine respectent l'axisymétrie des matériaux et des sources.

La figure II.3 montre la géométrie en symétrie axial de la table de cuisson par induction utilisé dans notre travail.

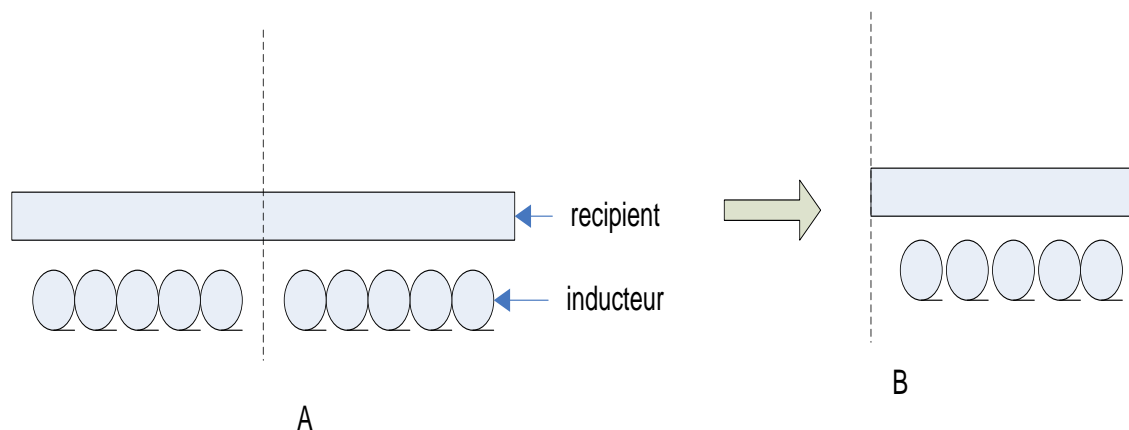


Figure II.3: chauffage par induction en Modèle axisymétrique

II.4. Calcul de la puissance

Dans ce paragraphe nous allons traiter le calcul de la puissance, en général deux types de dissipations électromagnétiques se trouvent dans les dispositifs chauffage par induction: dissipation par hystérésis magnétique et par l'effet Joule crée par courants induits dans les corps a chauffé [35, 36].En utilisant la loi d'Ohm:

$$J = \sigma \cdot E \quad (\text{II.1})$$

L'expression générale des pertes Joules provoquent par les courant de Foucault est donnée par :

$$P = E.J = \frac{J^2}{\sigma} \quad (\text{II.2})$$

Où: E, J, σ sont respectivement les valeurs locales des vecteurs champs électrique et densité de Courant électrique, est la conductivité électrique.

II.5. Modélisation de l'électromagnétisme.

II.5.1. Les lois fondamentales de l'électromagnétisme

Le comportement physique du champ magnétique dans un dispositif électromagnétique quelconque est régi par un ensemble de quatre équations développées par **J. C. Maxwell**, appelées les lois fondamentales de l'électromagnétisme. Il est bien connue que Ces dernières équations sont liées aux lois de comportements des mielleux et les conditions de limites et de continuités [37].

II.5.1.1. Les équations de Maxwell

Pour calculer la puissance dissipée P donnée par (II.2), on utilise un système de quatre d'équations, pour permettre de modéliser tous les phénomènes électromagnétiques [12, 31].

$$\text{Équation de Maxwell-Ampère} \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J}_t + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Équation de Maxwell-Faraday} \quad \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Équation du flux magnétique} \quad \text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Équation de Maxwell-Gauss} \quad \text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.6})$$

Où :

- H est le Champ magnétique [A/m] ;
- E est le Champ électrique [V/m] ;
- B est l'Induction magnétique [T] ;
- D est l'Induction électrique [C/m²] ;
- J est la Densité de courant de conduction [A/m²] ;
- ρ est la Densité de charges électriques libres [C/m³].

L'équation (II.3) représente deux types de sources du champ magnétique, soit par les courants électriques (théorème d'Ampère), ou bien par la variation d'un champ électrique. Soit par les deux en même temps. L'équation (II.4) exprime comment la variation d'un champ magnétique généré (induire) un champ électrique et des courants induits dans un autre conducteur posé à

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

proximité du champ magnétique, alors que l'équation (II.5), s'explique que la divergence de la densité du flux magnétique est nulle, c'est la loi de la conservation du flux magnétique.

II.5.1.2. Les lois constitutives des matériaux

Pour la résolution d'équations de MAXWEL précédentes, il est primordial d'associer ces derniers aux relations milieux (lois de comportements des matériaux). Ces lois sont utilisés pour relier les grandeurs physique des matériaux et les grandeurs physique indiqués sur les équations de MAXWELL [31, 38].

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.8})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide (H/m) ;

μ_r est la perméabilité magnétique relative du matériau ;

ϵ_0 est la permittivité électrique du vide (F/m) ;

ϵ_r est la permittivité relative électrique du matériau ;

σ est la conductivité électrique du matériau (S.m⁻¹).

II.5.1.3. Les conditions de passage

La circulation et Le transfert du champs magnétique et électrique entre deux milieux , ce derniers est provoqué par une discontinuité à la circulation, il existe quatre types décrivant les conditions de transfert du champ magnétique et électrique entre les milieux [30, 37].

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho \quad (\text{II.10})$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{n} = J \quad (\text{II.12})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.13})$$

II.5.1.4. Les conditions aux limites

Il n'est pas question de modéliser et de résoudre les 'équations de maxwell d'un dispositif sur un espace infini. Il faut alors donc imposer des conditions aux limites afin de limiter les

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

calculs sur des frontières bien déterminées [37, 39]. Il est bien connu en électromagnétique qu'il existe deux types des conditions aux limites les plus utilisées qui sont :

- Condition de Dirichlet homogène
- Condition de Neumann homogène

II.5.2. Hypothèses simplificatrices de la magnétodynamiques

Dans le cadre des modélisations des dispositifs électromagnétiques, plusieurs travaux ont été présentés par des simplifications sur les équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux afin d'avoir un modèle mathématique le mieux adapté, ainsi pour faciliter la résolution numérique [33, 40].

- Comme nous avons vu précédemment La modélisation de la cuisson par induction et basée sur le modèle la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire:
- La densité de courant de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ est négligeable dans ce type d'application car

il est toujours relativement faible pour des basses fréquences, la relation (II.3) devient

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_t \quad (\text{II.14})$$

- la densité de courant totale \vec{J}_t et compose de deux parties, la première et la densité de courant d'excitation \vec{J}_{ex} (les courants de source) et sa valeur doit être connue, tandis que la seconde représente la densité des courants de Foucault \vec{J} (les courants induits) :

$$\vec{J}_t = \vec{J} + \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

- Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul car les courants de Foucault sont générés par les champs magnétiques et les champs électriques
- Le modèle porté dans ce travail est un chauffage par induction axisymétrique. l'analyse de celle-ci est fondée sur le calcul du potentiel vecteur magnétique [8].

Dans ce cas le problème est étudié dans le plan (r-z) en coordonnées cylindriques

(r, Φ , z). Montré sur la figure (II.4.).

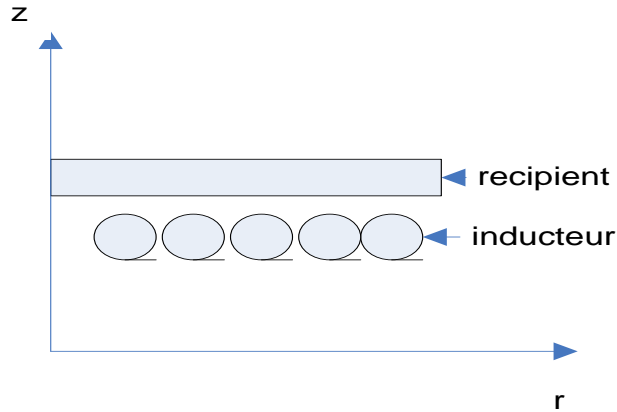


Figure II.4: chauffage par induction dans le plan de coordonnées cylindriques (r, Φ, z)

II.5.3. Formulations magnétodynamiques

A ces systèmes d'équations précédentes ((II.3), (II.4), (II.5),(II.6), en ajoute les lois de comportement des milieux [41].

Dans la Charge métalliques (récipient) :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{II.17}$$

Dans Inducteurs:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H}\end{aligned}\tag{II.18}$$

Dans la Ferrite :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \sigma &= 0\end{aligned}\tag{II.19}$$

Les propriétés physiques de la ferrite permettent de négliger l'effet de l'hystérésis et les courants de Foucault. Nous devons donc résoudre le problème magnétodynamique présenté par

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

le système d'équations (II.4), (II.5) et (II.14), (II.15) et les équations de comportement des milieux (II.8) et (II.9).

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \overrightarrow{Jex} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.22})$$

Sachant que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.23})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ Dans les charges, } \vec{J} = 0 \text{ ailleurs.} \quad (\text{II.24})$$

$$\overrightarrow{Jex} \text{ Connue dans es inducteurs, } \overrightarrow{Jex} = 0 \text{ ailleurs} \quad (\text{II.25})$$

Il est clair que le problème précédent (les équations ((II.20) (II.21) (II.22) (II.23) (II.24)) comprend un grand nombre d'inconnues, ces derniers imposent des difficultés à la résolution numérique [33]. Pour cette raison différentes formulations ont été utilisées dans les méthodes de calcul par les éléments finis pour résoudre les équations de Maxwell en Magnétodynamique. Parmi les plus utilisé c'est celle qui est basé sur le potentiel vecteur magnétique A et le potentiel scalaire électrique V . ceux-ci a été développée par M.V.K. Chari [42, 43] et validé par une comparaison enter les résultats numériques et les calculs analytiques [13].

Nous avons donc, La relation $\text{div } \vec{B} = 0$ est vérifiée lorsque nous dérivons la densité du flux magnétique d'un potentiel vecteur A tel que :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{II.26})$$

La combinaison d'équations (II.22) et (II.26) donnent :

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \Rightarrow \vec{E} = -\text{grad } V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.27})$$

Où V : représente le potentiel électrique.

La combinaison d'équations (II.21), (II.24) et en tenant compte de l'équation (II.23) et on trouve :

$$\text{rot } \frac{\vec{B}}{\mu} = \sigma \vec{E} + \overrightarrow{Jex} \quad (\text{II.28})$$

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

En combinant d'équations (II.26), (II.27) et (II.28) nous obtenons :

$$\text{rot} \frac{\vec{1}}{\mu} \text{rot} \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad} \vec{V} = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.29})$$

Lorsque la densité volumique de charge est nulle ceci implique que $\vec{v} = \vec{0}$ est imposé à tout instant. les équations (II.26) et (II.27) qui représentent les solutions du problème (II.29) doivent être caractérisés par un potentiel vecteur unique A, donc il est important d'ajouté la condition du jauge (II.30) [33].

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.30})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.31})$$

Nous démontrons que pour résoudre le problème (II.29) est équivalent à résoudre le problème suivant:

$$\text{rot} \frac{\vec{1}}{\mu} \text{rot} \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.32})$$

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.33})$$

L'étude de notre système (table de cuisson par induction) dans un Domain Ω repéré en coordonnées cylindriques (r, Φ, z) implique que les conditions de la symétrie axiale sont valable [33], de plus tous les grandeurs intervenant dans le problème (II.32) sont dépendantes de Φ . Il est donc possible de résoudre le problème (II.32) sur une partie de Ω comme elle est indique sur la figure (II.5).

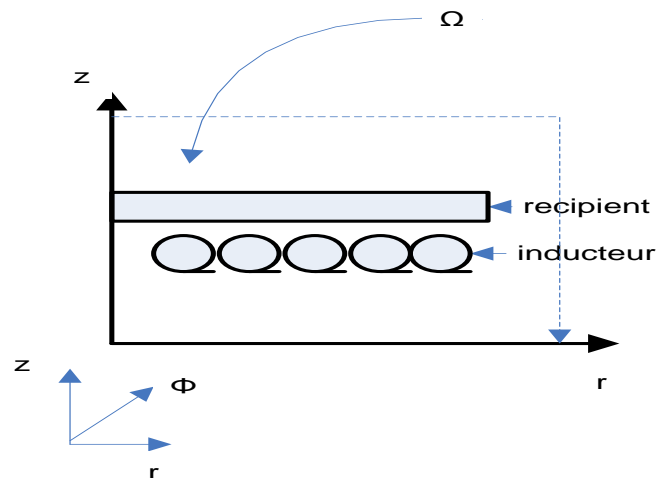


Figure II.5: l'axisymétrique du système et le Domain d'étude

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

La résolution du problème présenté par l'équation (II.32) peuvent être applicable dans une configuration axisymétrique, où le champs électrique E, Le potentiel vecteur A et la densité de courant ne dépendent pas des coordonnées (r et z), tandis que, Le champ magnétique H et l'induction magnétique B dépendent fortement des coordonnées (r et z) [44]. Par analogie de cette description, on peut conclure immédiatement que les courants sont perpendiculairement au plans d'étude (r, z), ainsi le potentiel vecteur magnétique A et fortement nul sur l'axe de symétrie. Ceci implique que :

$$\text{div } A = 0 \text{ car le potentiel vecteur n'est pas variable par rapport au l'axe } \Phi$$

En peut écrire donc les différents grandeurs vectorielle de la manier suivent :

$$\vec{J}_{ex} \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ J_{ex\theta} & \vec{e}_\theta \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases}, \quad \vec{E} \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ E_\theta & \vec{e}_\theta \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases}, \quad \vec{A} \begin{cases} 0 & \vec{e}_r \\ A_\theta & \vec{e}_\theta \\ 0 & \vec{e}_z \end{cases}, \quad \vec{B} \begin{cases} B_r & \vec{e}_r \\ 0 & \vec{e}_\theta \\ B_z & \vec{e}_z \end{cases}, \quad \vec{H} \begin{cases} H_r & \vec{e}_r \\ 0 & \vec{e}_\theta \\ H_z & \vec{e}_z \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Par ailleurs, en utilisant l'expression du rotationnel du potentiel vecteur magnétique en coordonnées cylindriques, on déduit :

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{e}_r & r\vec{e}_\theta & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & rA_\theta & A_z \end{vmatrix} \quad (\text{II.35})$$

D'après les relations donnés par l'équation (II.34) les composants A_r et A_z sont nul la relation (II.35) devient :

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{e}_r & r\vec{e}_\theta & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & rA_\theta & 0 \end{vmatrix} \quad (\text{II.36})$$

La représentation vectorielle de La relation (II.36) devient :

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial rA_\theta}{\partial z} \right] \vec{e}_r + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial rA_\theta}{\partial r} \right] \vec{e}_z \quad (\text{II.37})$$

Le premier terme de la relation (II.32) s'écrite en coordonnées cylindriques comme suite :

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

$$\text{rot } v \text{ rot } \vec{A} = v \frac{1}{r^2} \begin{vmatrix} \vec{e}_r & r\vec{e}_\theta & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial r A_\theta}{\partial z} & 0 & \frac{\partial r A_\theta}{\partial r} \end{vmatrix} \quad (\text{II.38})$$

La représentation vectorielle de La relation (II.38) devient :

$$\text{rot } v \text{ rot } \vec{A} = v \frac{1}{r^2} \left[\left[-\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial r \vec{A}_\theta}{\partial z} \right] + \left[-\frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial r \vec{A}_\theta}{\partial r} \right] \right] r \vec{e}_\theta \quad (\text{II.39})$$

En Remplacent la grandeur $r \vec{A}_\theta$ par \vec{A} pour raison de ne pas complique les indice dans la méthode numérique et la formulation faible, La relation (II.39) devient :

$$\text{rot } v \text{ rot } \vec{A} = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} \right) \right] \vec{e}_\theta \quad (\text{II.40})$$

En remplacent le premier terme de L'équation de la magnétodynamique (II.32) par la relation (II.40) on trouve ce qui suite

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \overline{J_{ex}} \quad (\text{II.41})$$

Cette dernier équation peu être écrit sous la forme d'une représentation de Fresnel pour modéliser la variation temporelle puisque $\overline{J_{ex}}$ le courant de source et alternatif. En remplacent alors le deuxième terme de la relation (II.41) comme suite :

$$\frac{\sigma}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = j \omega \frac{\sigma \vec{A}}{r} \quad (\text{II.42})$$

Le modèle magnétodynamique axisymétrique de la table de cuisson par induction en coordonnées cylindriques s'écrite alors

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} \right) + j \omega \frac{\sigma \vec{A}}{r} = \overline{J_{ex}} \quad (\text{II.43})$$

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad (\text{II.44})$$

L'équation (II.44) est connue par la condition de jauge elle est ajoutée à l'équation (II.43) pour assurer l'unicité du potentiel vecteur solution [45].

Il est important d'introduire les conditions aux limites du domaine d'étude et de résolution de système d'équations précédents, nous avons vu au dessus dans ce chapitre qu'il existe deux type de conditions aux limites les plus utilisés dans la littérature [40]. Dans ce travail la figure (II.6) montre le Domain d'étude et les différentes conditions aux limites que nous avons optée a utilisées pour la résolution d'équations (II.43) et (II.44).

Au niveau de la surface extérieur Γ du Domain d'étude, une condition de type Dirichlet doit être imposée. On a donc le champ magnétique est nul sur Γ .

$$\vec{A} = 0 \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{II.45}).$$

Dans l'axe de symétrie, une condition de type Neuman doit être imposé

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_s \quad (\text{II.46}).$$

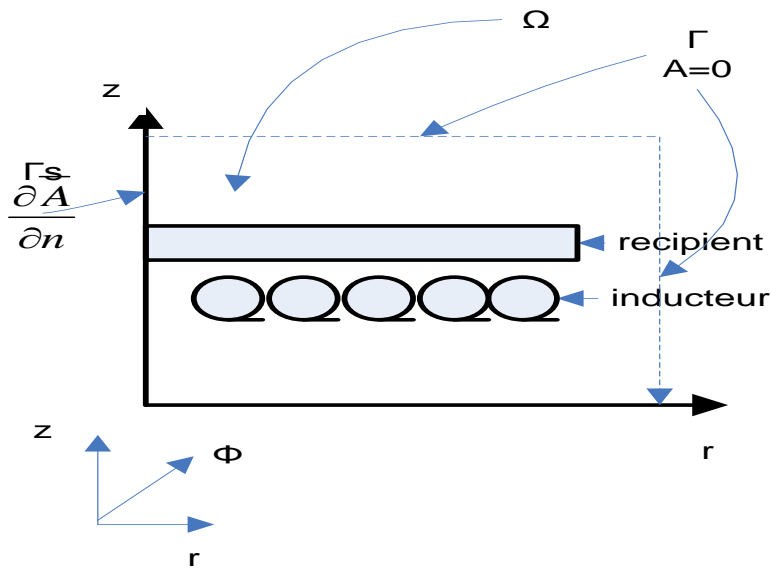


Figure II.6: le Domain d'étude et les conditions aux limité imposées

La densité du courant J développée dans un matériau conducteur peut être exprimée en termes du potentiel vecteur comme suit :

$$J = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.47})$$

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

Les relations (II.2) et (II.47) donnent :

$$P = \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^2 \quad (\text{II.48})$$

Dans le cadre des Hypothèses simplificatrices de la magnétodynamiques dans un plan axisymétrique ou les courants induits sont radial par rapport a la pièce à chauffé on a par conséquent:

$$A = a(r, z, t) e_\theta \quad (\text{II.49})$$

On déduit aisément de (II.49) que l'équation (II.43) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial \bar{A}}{\partial r} \right) + j\omega \frac{\sigma \bar{A}}{r} = \overline{J_{ex}} \quad (\text{II.50})$$

II.6. Modélisation des phénomènes thermiques

Nous avons donné dans le chapitre précédent les phénomènes thermiques et les différents types du transfert de la chaleur dans les milieux, nous nous expliquons dans cette section la modélisation mathématique du problème thermique évolué dans les systèmes de cuisson par induction.

L'ensemble des trois modes de transfert thermique présentés précédemment, intervenant directement dans le procédé de chauffage par induction, ces derniers sont interprétés par des relations mathématiques reliant les grandeurs physiques des corps à chauffé par les phénomènes magnétique et thermique.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous établirons les formules mathématiques des phénomènes thermiques et leurs conditions aux limites régissent le chauffage par induction,

II.6.1. Mode de transfert de la chaleur

Dans les systèmes du chauffage par induction, la transmission de la chaleur par conduction ce fait aux niveaux des solides et à l'intérieur du corps à chauffer. Tandis qu'aux niveaux des surfaces de la mémé corps à chauffer le transfert de la chaleur se fait par convection et rayonnement.

II.6.2. L'équation différentielle de la chaleur.

Le comportement thermique du matériau est régi par le premier et le second principe de la thermodynamique qui peut être présenté par le bilan calorifique suivant [46] :

$$\text{div} (\lambda \text{ grad } T) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.51})$$

Où : T représente la température, λ la conductivité thermique du matériau, q représente l'énergie générée par une unité de volume (source de chaleur), ρ la masse volumique, C_p la chaleur spécifique à pression constante du matériau.

Le premier terme de l'équation (II.51) représente la transmission de la densité de puissance dans les milieux, cependant le deuxième terme indique la densité de puissance générée dans un milieu, et le dernier terme représente la variation de la densité d'énergie interne [47].

Pour la résolution numérique de cette dernière équation avec la méthode des éléments finis en 2D [48], on peut écrire cette équation en fonction des coordonnées cylindriques comme suite :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.52})$$

II.6.3. Transfert thermique par conduction

Ce mode de transfert peut être exprimé comme la transmission d'un flux de chaleur Dans un matériau d'un point chaud vers un point froid [34, 49]. Elle est exprimée par la loi de Fourier (II.53).

$$\varphi = -\lambda \text{ grad}(T) \quad (\text{II.53})$$

Cette équation montre que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température et la conductivité thermique du matériau qui dépend lui-même de la température. Par analogie de cette dernière équation, une grande différence de la température entre deux points d'une même matériau permet un transfert important de la chaleur entre ces points.

II.6.4. Conductivité thermique.

Généralement la conductivité thermique λ est considéré comme constante pour des faibles variations de la température dans les solides. Par contre elle est fortement dépendante des

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

grandes variations de la température. la variation de la conductivité thermique en fonction de la température peut être exprimé par la relation suivante [36, 50]:

$$\lambda = \lambda_0(1 + a T) \quad (\text{II.54})$$

Où λ_0 est la conductivité thermique initiale et a est un coefficient dépendant du matériau.

II.6.5. Transfert thermique par convection

D'après la loi Newton, le flux de chaleur est transféré à partir de la surface d'un solide vers un fluide [51]. ce mode de transfert énonce que la quantité de flux de chaleur transmise par convection est directement proportionnel à la différence de la température entre la surface de la pièce et l'environnement ambiant [12].

$$\varphi = h (T_s - T_f) \quad (\text{II.55})$$

Où :

h représente le coefficient de transfert convectif,

T_s la température de la surface du solide

T_f la température du fluide

II.6.6. Les conditions aux limites

La résolution du problème thermique présenté par l'équation de Fourier de la thermique (II.51) n'est pas un problème nouveau [52]. Les conditions initiales temporelles et les conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude de cette dernière équation sont décrites sous les formes suivantes [48,53, 54] :

II.6.6.1. Condition initiale temporelle :

La température T_0 à l'instant t_0 est donnée par une relation connue :

$$T(r, \theta, z; t_0) = T_0(r, \theta, z) \quad (\text{II.56})$$

II.6.6.2. Conditions aux limites spatiales :

- Condition de Dirichlet :

Dans la surface du contact la température est imposée par l'égalité suivante

$$T = T_p \text{ sur } S_T \quad (\text{II.57})$$

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

- Condition de Fourier :

Dans l'étude de la thermique il existe deux type de conditions de Fourier : la premier ci celle qui représente les échanges par convection et la seconde représentant les échanges par rayonnement, ces derniers sont régies par la loi d'échange thermique qui est bien connue sur la surface du contact entre un solide et leur l'environnement ambiant. En peut alors écrire la densité de flux φ imposée sur la surface de contact comme suite :

$$\varphi = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{surface} = g(r, \theta, z, t) \quad (\text{II.58})$$

Où $g(r, \theta, z, t)$ est une fonction donnée sur la surface de contact, Le transfert de chaleur vers le milieu ambiant peuvent être divisées en quatre groupes.

- ✓ Transfert par convection :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_f - T) \quad (\text{II.59})$$

- ✓ Transfert par rayonnement

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T^4) \quad (\text{II.60})$$

- ✓ Transfert par convection et rayonnement :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_f - T) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T^4) \quad (\text{II.61})$$

- ✓ Condition de Neumann Densité de flux φ_s imposée

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varphi_s \quad (\text{II.62})$$

Avec

ε est l'émissivité

σ est La constant de Stefan-Boltzmann

II.7. Couplage magnéto-thermique - Equations couplée

L'étude des deux problèmes physiques (thermiques et électromagnétiques) régissant le fonctionnement des dispositifs du chauffage par induction, montrent que les propriétés électromagnétiques (conductivité électrique et réluctivité magnétique) dépendent de la

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

température [55]. C'est-à-dire que l'évolution des phénomènes électromagnétiques sont influencés par les phénomènes thermiques et vis versa. On peut alors constaté que La répartition de la température dépend fortement à la distribution des courants de Foucault

Pour résoudre le problème magnéto-thermique, nous avons utilisé la Méthode des Eléments Finis(FEM) [56, 57]. Celle-ci consiste donc à résoudre un système d'équations magnéto-thermique composé de l'équation électromagnétique (II.50) et l'équation thermique (II.52), qui s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial t} + \text{rot}(v(T) \text{rot}(A)) = J_s \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-\lambda \text{grad}(T)) = q \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

L'organigramme de la résolution de système d'équation II.63 en couplage fort est présenté par la figure (II.7)

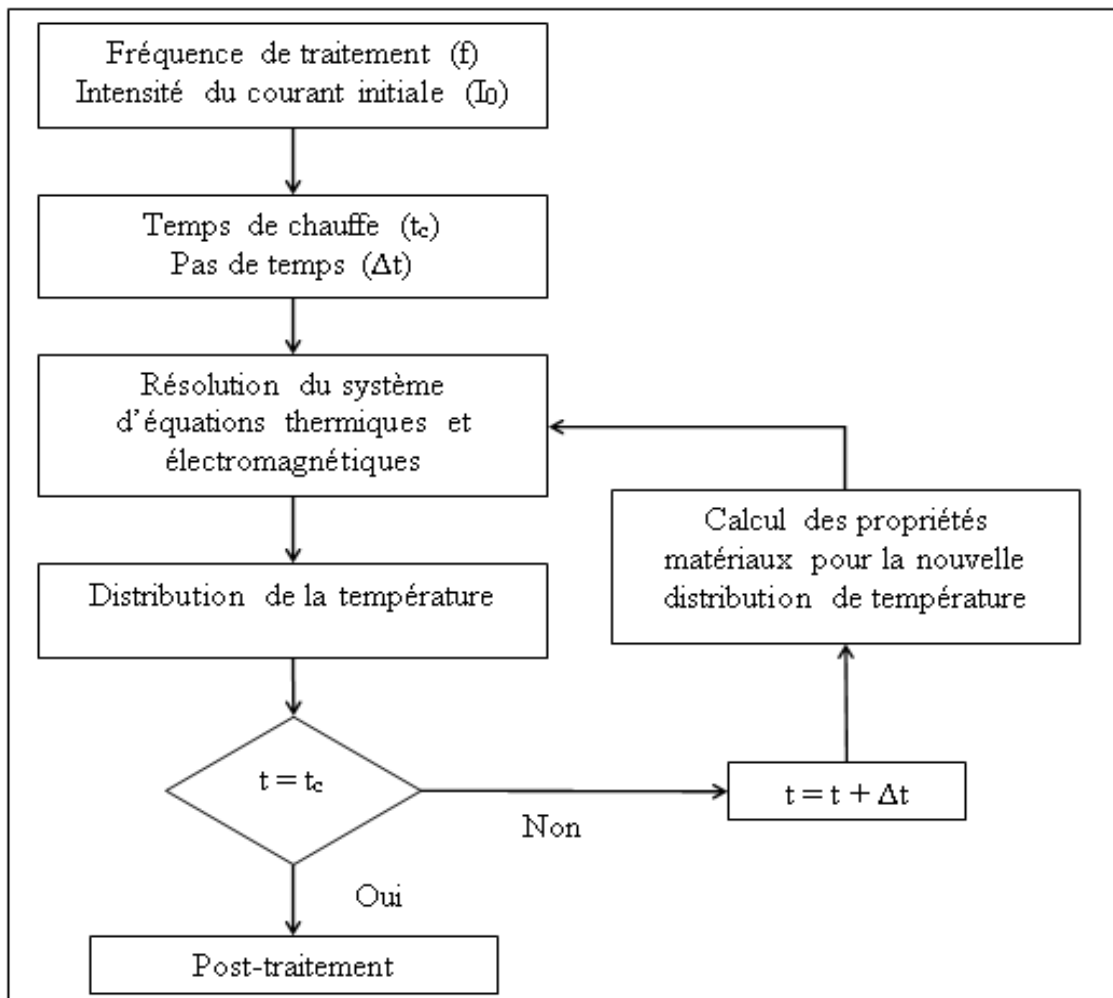


Figure II.7: Schéma du couplage fort [12].

II.8. Méthodes numériques de résolution

Les méthodes numériques ont pour objectif la résolution des formulations magnétothermique (II.63) qui sont présentées sous forme des équations aux dérivées partielles. Il est bien connu qu'il n'est pas facile d'avoir des solutions de ces dernières équations à l'aide des méthodes analytique de plus il est nécessaire d'imposer des hypothèses simplificatrices afin de faciliter la résolution ce qui conduit à des résultats non satisfaisant. Il est donc important de passer par les méthodes numériques à cause de ces avantages concernant la satisfaction des solutions.

Plusieurs recherches approfondies ont depuis longtemps été consacrées sur le développement des méthodes numériques fiable pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Parmi les plus utilisées en électromagnétique on peut citer : éléments finis (MEF) et la méthode des volume fini (MVF).

Dans ce travail nous nous intéressons par la méthode des éléments finis pour analyser la répartition de la température dans le fond d'un récipient d'une table de cuisson par induction [40].

II.8.1. La Méthode des Eléments Finis

La méthode des éléments fins a été appliquée dans plusieurs problèmes de la physique, tel qu'en génie civil en mécanique etc....Elle a trouvée sa place dans ces dernières années pour la résolution des problèmes d'électrotechnique. Dans ce travail la méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution du problème donné par le system d'équation (II.63). Elle est basée sur deux étapes, la première consiste à une discrétisation géométrique du domaine d'étude. La deuxième étape est une discrétisation des formulations électromagnétiques. Ces étapes sont utilisé afin d'avoir une formulation intégrale qui peut conduire à un système algébrique simple. Pour passer le système d'EDP présenté par le problème donné par (II.63) à une formulation intégrale, nous utilisons l'une des deux types de formulation intégrale : la méthode de Galerkin ou la formulation vibrationnelle [37].

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial t} + \text{rot}(v(T) \text{rot}(A)) = J_s \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-\lambda \text{grad}(T)) = q \\ \frac{\partial \bar{A}}{\partial n} = 0 \text{ sur } \Gamma_n \text{ neumann homogène} \\ \Gamma_0 \text{ dirichlet entre le vide et le domain d'étude} \end{array} \right. \quad (\text{II.64})$$

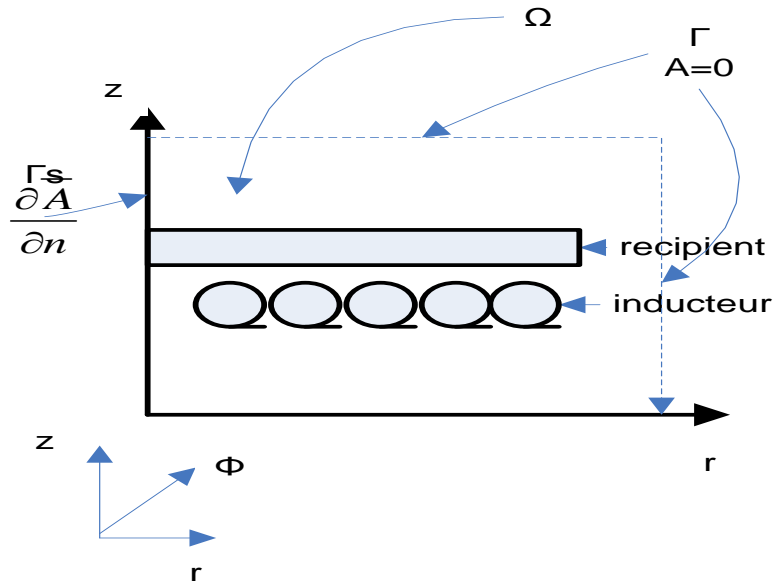


Figure II.8: domaine d'étude

II.9. Application : Table de cuisson à induction

La cuisson par induction est l'un des applications du chauffage par induction, elle consiste à chauffer des récipients par l'induction magnétique. Elle est réalisée par la circulation des courants électriques dans les bobines de l'inducteur. Ces courants créent par la suite des courants de Foucault dans la charge (Récipient) et qui causent l'échauffement de la charge par l'effet de joule. La répartition de ces courants dans le fond du récipient présente l'image de la répartition de la température.

Dans le but d'améliorer les performances des tables de cuisson par induction, il est donc important de connaître la répartition de la température dans le fond du récipient. Cette condition est possible que par la résolution des phénomènes magnéto-thermique.

Le système qu'on veut étudier présente une symétrie axiale. Ceci nous a permis d'étudier et d'analyser notre modèle par l'utilisation de la méthode des éléments finis en 2D axisymétrique.

Pour déterminer la répartition du champ magnétique et la température sur le fond du récipient, les équations de la magnéto-thermique sont traitées dans un plan en coordonnées cylindriques qui sont données par [50]:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \omega \frac{\sigma \vec{A}}{r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) = \vec{J} \end{array} \right. \quad (\text{II.65})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial r} \left(-\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = r \cdot q \end{array} \right. \quad (\text{II.66})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{1}{r^2} \sigma \omega^2 \vec{A} \vec{A}^* \end{array} \right. \quad (\text{II.67})$$

Où :

\vec{A} est le potentiel vecteur (avec $\vec{A} = r \vec{A}_\theta$ qui est la composante azimuthale)

v est la reluctivité magnétique,

σ est la conductivité électrique du matériau,

J est la densité de courant, λ est la conductivité thermique,

T est la température,

q est la source de chaleur,

ρ_m est la densité volumique et

C_p est la chaleur spécifique.

II.9.1. Description du problème

Dans ce travail, nous présentons l'étude d'un système de cuisson par induction. Il est constitué de deux partie : d'un inducteur sous forme d'un disque en ferrite dans lequel sont placés des bobines, et d'un récipient en acier inoxydable Fev 1000 65 HD [58].le système étudié est représenté sur la Figure (II.9).

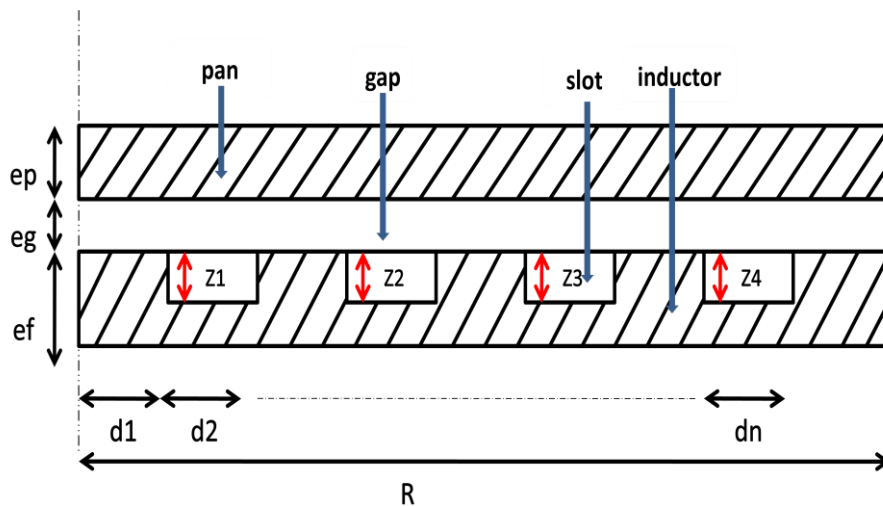


Figure II.9: Géométrie du système étudié (mm).

Chapitre -II : Modélisation de la table de cuisson par induction

Les figures (II.10 et II.11) présentent la géométrie de la table de cuisson par induction utilisé pour la simulation. Elles montrent aussi le domaine d'étude et les différentes conditions aux limites. La figure II.12 montre le type de maillage que nous avons utilisé pour analyser les phénomènes évoluent dans le récipient, l'inducteur et l'air. Les types des conditions aux limites imposées pour la résolution des équations magnétiques et thermiques sont donnés par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.68})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = h(T - T_a) \end{array} \right. \quad (\text{II.69})$$

Où :

h, T_a sont respectivement le coefficient de convection et la température ambiante.

A noter que notre modèle utilise toutes les variations des paramètres du matériau constituant le récipient en fonction de la température, contrairement à des plusieurs modèles dans la littérature qui utilisent la linéarité des paramètres des matériaux afin de simplifier les calculs, ce qui conduit à augmenter l'erreur de calcul.

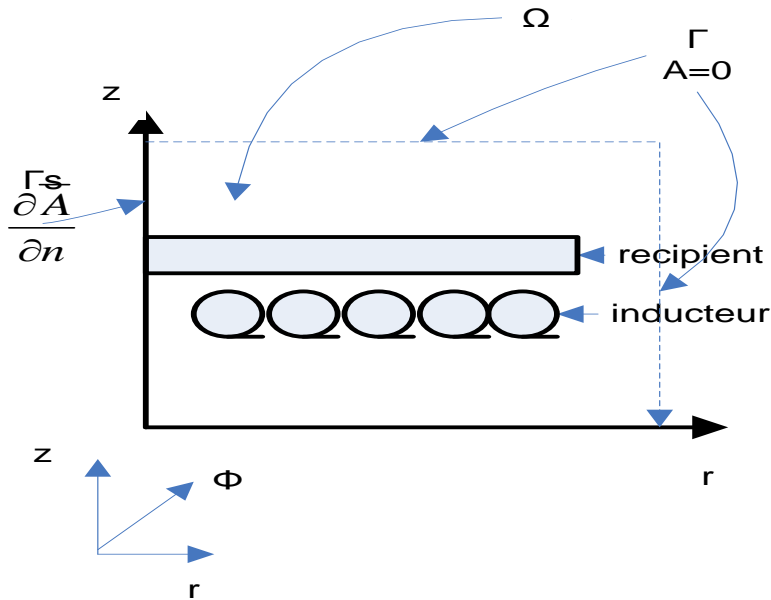


Figure II.10: Domaine de résolution du dispositif

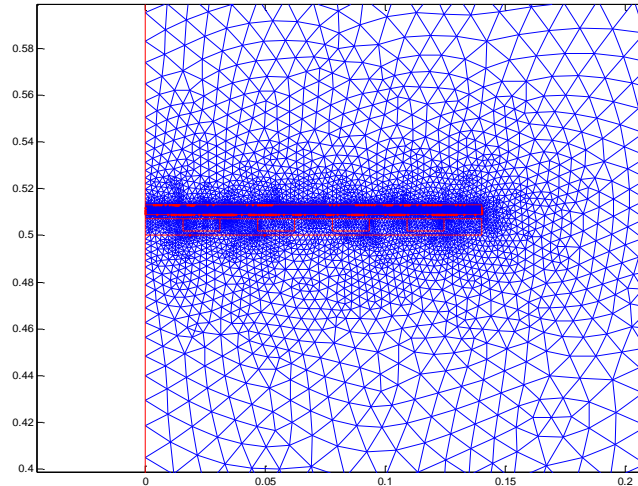


Figure II.11: Maillage dans le système étudié (inducteur, charge)

II.9.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau

Le matériau utilisé dans notre récipient est un acier inoxydable, ses propriétés physiques (conductivité σ et réluctivité ν) sont généralement dépendantes de la température. La variation de $\sigma(T)$ et $\nu(T)$ en fonction de la température sont exprimé par les équations suivants [57, 59] :

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha T} \quad (\text{II.70})$$

$$\nu(T) = \nu_0 \left(1 - e^{-\frac{T-750}{150}} \right) \quad (\text{II.71})$$

Avec :

$$\rho_0 = 1 / \sigma_0 = 13.75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \quad \alpha = 0.004;$$

$$\rho(T) = 1 / \sigma(T) \quad \text{et} \quad \mu(T) = 1 / \nu(T).$$

Les courbes de $\sigma(T)$ et $\mu(T)$ sont représentées respectivement dans la Figure(II.12) et la Figure (II.13).

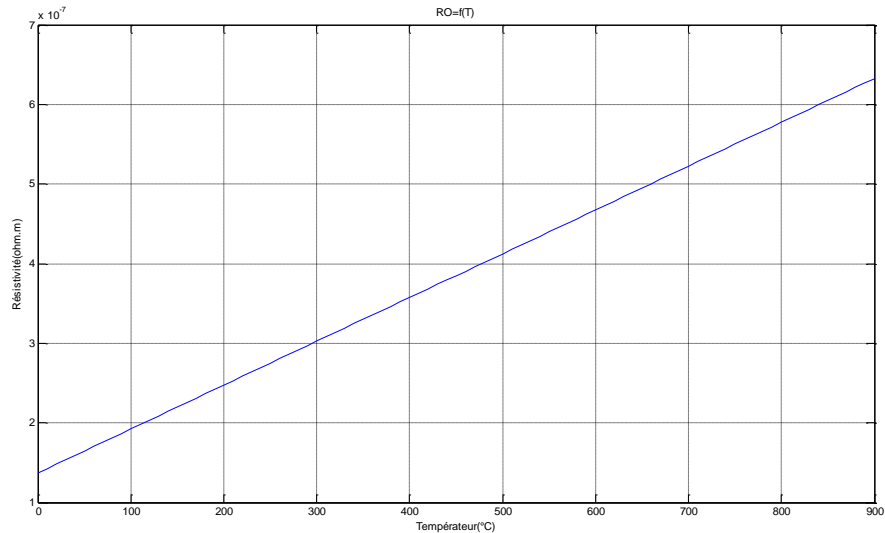


Figure II.12: Résistivité en fonction de la température $\rho(T)$

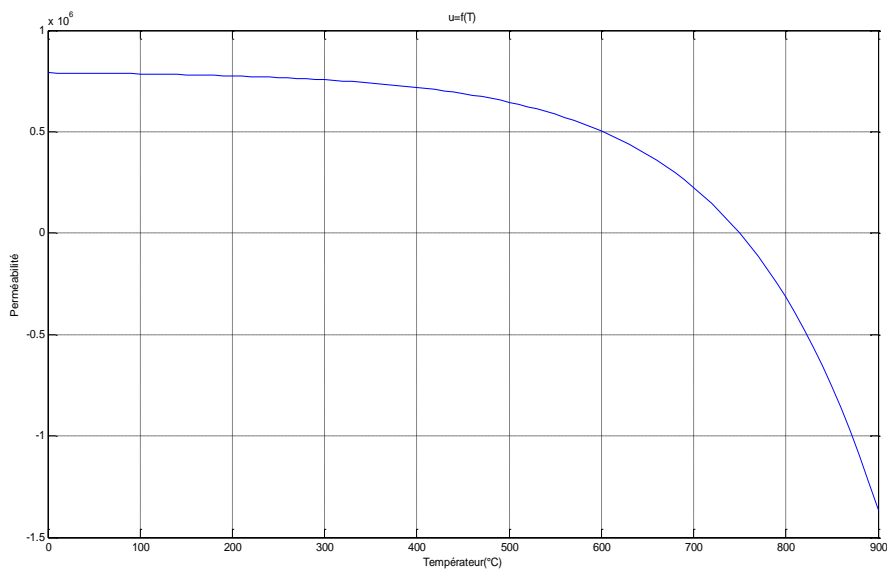


Figure II.13: perméabilité en fonction de la température

II.9.3. Procédure, Géométrie et paramètres de simulation

Pour le calcul de notre système en magnétothermique nous avons élaboré un programme de calcul en 2D axisymétrique. On introduit dans ce programme le nombre de gorges dans l'inducteur et les paramètres principaux du système (tableau 1). Les procédures de calcul du problème magnétothermique sont montrées par l'organigramme présente dans la figure (II.14). Le problème thermique est résolu pas par pas dans le temps. La température désirée est 230°C environ Figure (II.15).

Tableau II.1: Paramètres du système [56].

| Paramètres | Désignations | Dimensions |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| R | Rayon du récipient | 140 mm |
| e_i | Epaisseur de l'inducteur | 5 mm |
| e_g | Epaisseur de l'entrefer | 2 mm |
| e_c | Epaisseur du récipient | 4 mm |
| d_1, d_2, \dots, d_i | Distances inter-gorges | 16.25 mm |
| e_f | Epaisseur de la ferrite | 2 mm |
| μ_f | Perméabilité relative de la ferrite | 2500 |
| μ_r | Perméabilité relative de la charge | 260 |
| f | fréquence | $20 \cdot 10^3$ Hz |
| J | Densité de courant | $0.63 \cdot 10^6$ A/m ² |
| λ | Conductivité thermique | 26 W/m/°C |
| h | Coefficient de convection | 20 W/ (m ² °C) |
| ρ_m | Densité volumique | 7700 kg/m ³ |
| C_p | Chaleur spécifique | 460 J/Kg. C° |

Le model de la géométrie obtenue par le programme est donné par la figure II.11. Dans ce cas nous avons établis une répartition di uniforme des gorges. Les Courbes de la répartition de la densité de courant et de la température sur le fond du récipient sont données respectivement par les figures (II.16) et (II.17).

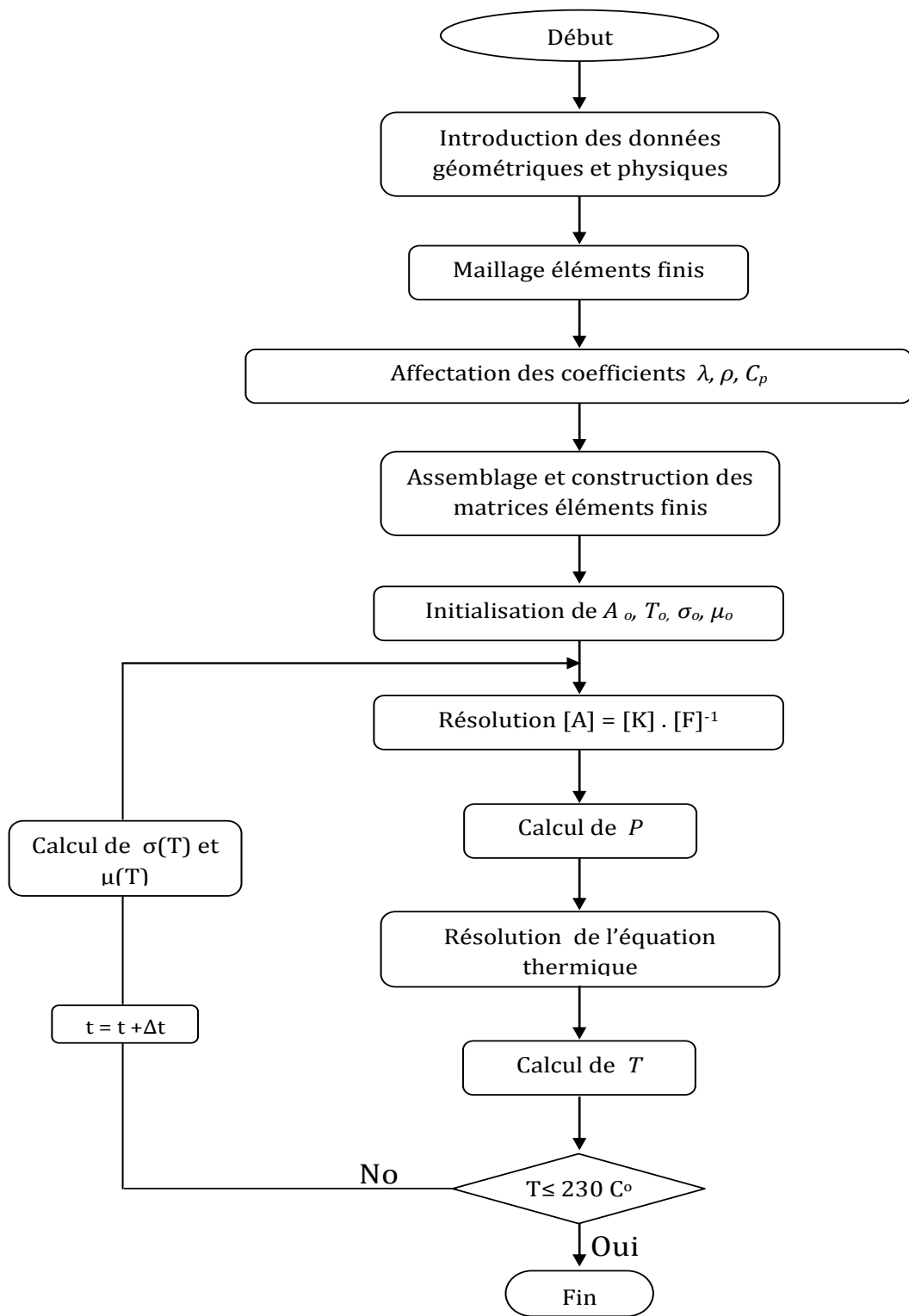


Figure II.14: Organigramme du modèle magnétothermique

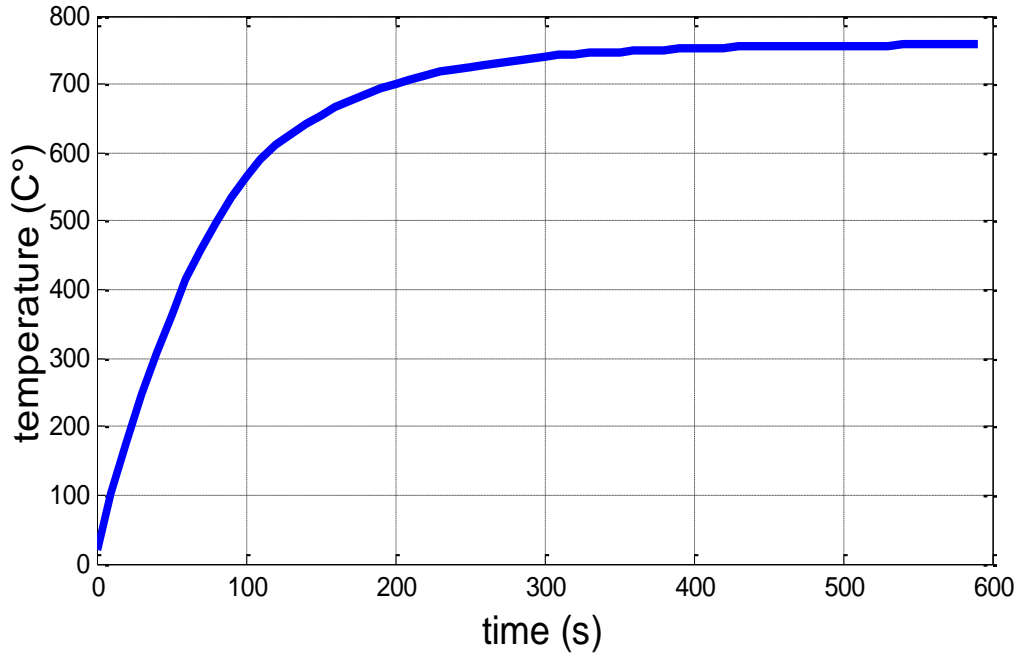


Figure II.15: Evolution de la température en fonction du temps

Les figures (II.16) et (II.17) représentent respectivement la répartition de la densité de puissance et l'évolution de la température en fonction du temps sur un point dans le récipient.

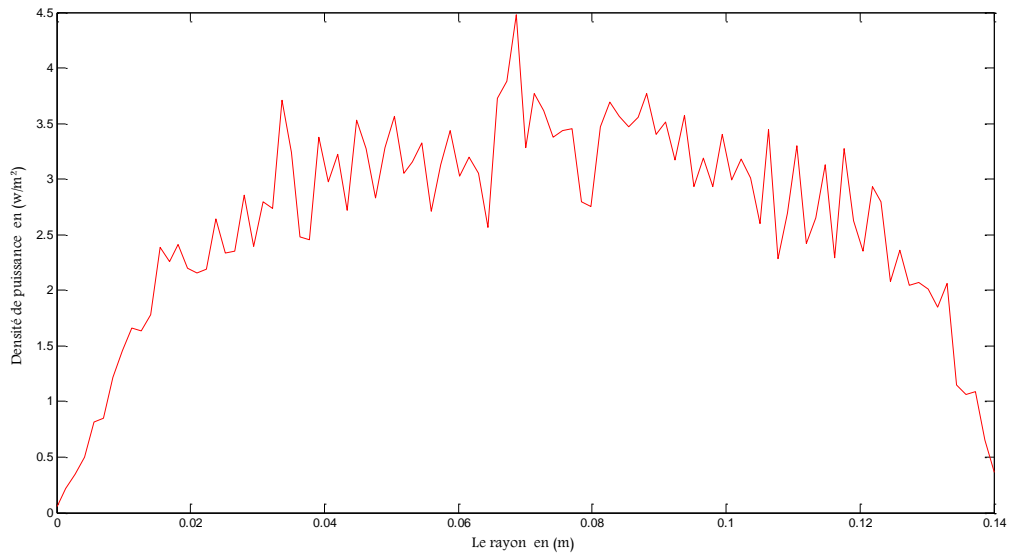


Figure II.16: Distribution de la densité de puissance le long du rayon de la charge

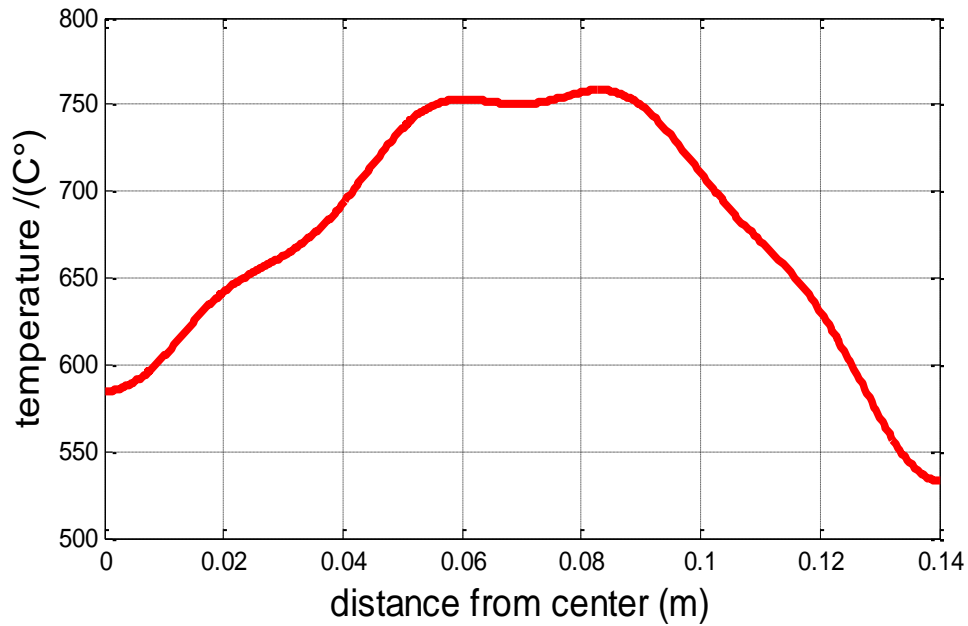


Figure II.17: Distribution de la température le long du rayon de la charge

La figure (II.17) représente la répartition de la température sur le long du rayon du récipient après 60s d'échauffement. On peut y constater que la température est plus élevée dans le centre du récipient par rapport aux leurs extrémités. Ce phénomène lié directement à la répartition et les dimensions des bobines et aussi dépende fortement de l'effet de peau magnétique. Car les courants induits sont générés par la circulation des courants d'excitations dans les bobines et la répartition de ces derniers influent directement sur la répartition des courants induits. Par analogie de cette description la répartition de la température dépende fortement sur les dimensions et les positions des bobines.

En effet, la chaleur générée au centre du fond du récipient (effet de peau) n'a pas suffisamment de temps pour se transférée dans les extrémités du récipient

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les lois de l'électromagnétisme et de la thermique régissant le chauffage par induction. La modélisation et les différents types de couplage de la formulation électromagnétique et thermique (magnétothermique) ont été présentés. L'analyse de l'évolution du champ magnétique et le transfert thermique dans le corps à chauffé (récipient) ont été obtenus par l'application de la méthode des éléments finis 2D.

Cette étude a pour but de déterminer la répartition de la température dans le fond du récipient du système étudié tout en tenant compte de la non-linéarité, des caractéristiques électrique et magnétiques du matériau, en fonction de la température.

D'après la figure (II.17), on peut conclure que la répartition de la température au niveau du fond du récipient n'est pas uniforme. Pour l'homogénéisation de la distribution de la température, une méthode d'optimisation est proposée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Optimisation de la table de cuisson par induction

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

III.1. Introduction

L'optimisation est une résolution des problèmes mathématiques qui correspond à des problèmes physiques, chimiques, économiques etc..., dite difficiles. Ces problèmes Ce sont en général des problèmes aux données incomplètes, incertaines, bruitées ou confrontées à une capacité de calcul limitée.

En général les méthodes d'optimisations sont conçues pour but de maximisation des performances, minimisation des coûts etc... Il est primordial parfois en ingénierie d'utiliser des nouvelles méthodes de résolution, car les techniques existantes ne sont pas précisément adaptées aux problèmes posés. Ces méthodes d'optimisations sont, pour la plupart, inspirées de la physique (recuit simulé), de la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou de l'éthologie (essais particuliers, colonies de fourmis), ou peut être issue de la modélisation des systèmes complexes naturels [60].

L'analyse de la simulation des comportements collectifs des oiseaux migrateurs, des bancs de poissons etc... montre aux chercheurs de développer des méthodes puissantes pour la conception d'algorithmes d'optimisation combinatoire. L'étude menée par des chercheurs éthologiste montre que ces techniques s'appliquent aujourd'hui à tout un ensemble de problèmes scientifiques et techniques.

Les méthodes métaheuristiques forment un ensemble de méthodes utilisées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle pour résoudre des problèmes d'optimisation réputés difficiles [61]. Résoudre un problème d'optimisation combinatoire, c'est trouver l'optimum d'une fonction, parmi un nombre fini de choix, souvent très grand. Les applications concrètes sont nombreuses, que ce soit dans le domaine de la production industrielle, des transports ou de l'économie – partout où se fait sentir le besoin de minimiser des fonctions numériques, dans des systèmes où interviennent simultanément un grand nombre de paramètres.

Dans ce chapitre on va appliquer à notre système étudié (inducteur -charge), quelques méthodes métaheuristiques parmi lesquelles la méthode d'optimisation par essaim de particule « OEP » [62-64], puis on va étudier et tester trois variantes de la méthode OEP. L'application de ces méthodes nous permet d'optimiser de la répartition des bobines dans l'inducteur afin d'avoir une bonne répartition de la température dans le fond du récipient. Enfin, une régulation de température est proposée dans le chapitre suivant.

III.2. Définition de l'optimisation

L'optimisation est la résolution d'un problème mathématique posé et défini par une fonction objectif où le but est la recherche du minimum ou du maximum de cette fonction objectif [65].

Dans certain problème d'optimisation, les paramètres d'optimisation sont dépendants à des contraintes et qui sont aussi limités à évoluer dans des plages bien déterminée. Ce type de problème dit un problème d'optimisation sous contraintes. Les fonctions objectifs et les contraintes d'optimisation sont diverses, se sont liées directement de type de problème [66].

III.2.1. Description générale des problèmes d'optimisation

Généralement un problème d'optimisation est défini par les règles suivantes [65, 67] :

- **Fonction objectif:** c'est une équation mathématique qui représente et généralise le problème à optimiser. Elle est aussi connue par fonction coût. Selon les problèmes à optimisés, les fonctions objectifs sont classifiée en deux type :

- Problème mono-objectif : est un problème qui est présenté comme suite :

Minimiser $f(x,u)$ (fonction à optimiser)

Un problème mono-objectif est un problème comporte une seul fonction objectif

- Problème multi-objectif : est caractérisé par l'optimisation simultanément de plusieurs fonctions objectifs d'un même problème.

Minimiser $f_i(x,u)$, $i=1,\dots,Nobj$ ($Nobj$ nombre de fonction à optimiser)

Les deux types des fonctions objectifs ont un ensemble de variables, un ensemble de fonctions objectif et un ensemble de contraintes.

- **L'espace d'état:** est le domaine de recherche de dimension D , où toutes les variables du problème d'optimisation appartient et engendré dans un espace d'état.
- **Paramètres:** ce sont les variables du problème à optimiser et qui sont représentent dans la fonction objectif. Le but de l'optimisation est de trouver les meilleures valeurs des variables qui donnent la meilleur valeur de la fonction objectif.
- **Espace de recherche:** L'espace de recherche est définie par le nombre des paramètres Qui sont au voisinage de la solution optimal de la fonction objectif.
- **Espace des objectifs:** ensemble de l'espace de recherche, déterminé par toutes les Valeurs possibles des fonctions objectifs;
- **Les Contraintes:** ce sont des conditions appliqué sur les variables définies dans un espace d'état.
- **Domaine réalisable:** une partie dans l'espace où les contraintes sont contrôlées.

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

- **Domaine non-réalisable:** une partie dans l'espace où les contraintes ne sont pas contrôlées.

III.2.2. Formulation mathématique d'un problème d'optimisation

L'objectif d'application d'une méthode d'optimisation est d'avoir des meilleurs paramètres d'un problème physique. Ces paramètres peuvent être des grandeurs physiques, des dimensions, etc. Généralement un problème d'optimisation peut être donné par les formules mathématiques suivantes [65]:

$$(p) = \begin{cases} \min/\max f_{obj}(x) \in I \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, P \\ h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, q \\ x_{k \min} \leq x_k \leq x_{k \max} \quad k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (III.1)$$

Où :

fobj = f (x) : la fonction objectif à minimiser.

x : un vecteur à n variables

xk : les paramètres du problème à optimiser

gi (x) = G(X) , hj (x) = H(X) : représentent les contraintes d'inégalité et d'égalité.

Xkmin et Xkmax : la valeur minimal et maximal du variable d'optimisation

i : la dimension du problème.

Les valeurs optimales de x représentent la meilleure solution d'un problème Où la fonction objectif est le plus optimal.

III.3. l'optimisation par essais particuliers

En 1995 KENNEDY et EBERHART développent une méthode d'optimisation s'appelle : « Optimisation par Essaim particulaire (OEP) (*Particle Swarm Optimization* (PSO) ». C'est une méta-heuristique biologique dont le principe de fonctionnement est basé sur le comportement et le mouvement de certains animaux évoluant en essaims, tels que les oiseaux ou encore les poissons [67]. Cette technique est abstraite par la simulation de déplacement d'un groupe d'oiseaux ou d'un banc de poissons. D'une autre façon, elle s'inspire principalement par l'observation des relations grégaires d'oiseaux migrateurs, qu'ils ont parcourus de longues distances, et leur capacité à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction [68], tout en but à minimiser l'énergie dépensée, de temps, (etc.).

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

III.3.1. Inspiration Biologique de l'OEP (PSO)

Nous avons vu précédemment que, la technique OEP est venue par le déplacement collectif des oiseaux évoluant en essaim. Dans l'OEP (PSO), les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim. Chaque particule dans l'essaim est caractérisée par une intelligence et une mémoire, ces derniers sont utilisés pour le déplacement de chaque particule à la recherche de la nourriture et à l'aide des informations de d'autres animaux (particules) dans l'essaim. Le déplacement de ces particules de l'essaim en intelligence collective est un processus relativement complexe, elle est principalement basée sur des règles simples de comportement local, on peut alors noter que chaque particule a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale par rapport aux autres particules dans l'essaim [69].

Chaque particule de l'essaim n'a pour connaissance que les positions et les vitesses des particules de son voisinage. Chaque particule utilise donc, son expérience personnelle ainsi que les expériences de son voisinage.

Chacune des particules est alors dotée par [70]:

- une position qui est définie par des coordonnées dans un espace de la recherche des solutions
- une vitesse qui rend à la particule de se déplacer. Par cette information, chaque particule tend à changer sa position en fonction de sa meilleure expérience, de son meilleur voisinage et de son expérience précédente.
- un voisinage qui comporte plusieurs particules

le processus de déplacement des particules est régi par des règles qui sont associées à chaque particule [71]:

- Chaque particule caractérisée par une mémoire et une certaine intelligence
- Chaque particule fournit des informations de leur situation (position et vitesse) à chaque particule de son voisinage.
- Chaque particule doit respecter les trois règles suivantes, « rester proche des autres particules », « aller dans une même direction » ou « voler à la même vitesse ».

Toutes ces règles sont primordiales pour que l'essaim doive se déplacer en cohésion, ceci par l'adoption d'un comportement collectif complexe et adaptatif.

III.3.2. Principe

La méthode d'optimisation par essaim de particules est constituée d'un ensemble d'individus (les particules) qui sont déposés d'une façon aléatoire. Chaque particule dans

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

l'essaim se déplace dans l'espace de la recherche et explore la meilleure position. La position de chaque particule représente une candidate solution au problème posé [72].

Dans L'OEP (PSO), chaque particule est dotée d'une position. La valeur de la fonction objectif pour cette position ; a une vitesse, une mémoire personnelle sur laquelle la meilleure position visitée doit enregistrer et une mémoire collective sur laquelle la meilleure position visitée par le voisinage est aussi enregistrée. Par analogie de cette description Les particules changent leur vitesse en se basant sur leur mouvement actuel, leur mémoire personnelle et leur mémoire collective [73].

A la base de ces dernières informations, la particule tend à suivre sa volonté à retourner vers sa meilleure solution, par rapport aux autres solutions trouvées de son voisinage. On peut alors définir un optimale globale d'un problème posé par la recherche des optimums locaux jusqu'au la convergence vers la meilleure solution des particules [71].

III.3.3. Mode de fonctionnement de l'algorithme PSO

Dans la technique PSO, les positions de n particules de l'essaim représentent des solutions candidates au problème traité dans un espace de recherche de dimension D. Les particules changent leurs positions à partir des règles et conditions bien spécifiques, et à partir les positions des particules de son voisinage [74].

Chaque particule i est déplacée dans l'espace de recherche de dimension D, cherchent la meilleur position (solution) qui peut donner une meilleure valeur de la fonction objectif. Le déplacement des particules donc est lié par les trois règles suivantes :

- Une composante d'inertie : la particule tend à suivre sa propre expérience ;
- Une composante cognitive : la particule tend à retourner vers sa meilleure position ;
- Une composante sociale : La particule tend à suivre la meilleure position trouvée par le voisinage.

La position de chaque particule est déterminée par la position la plus optimale lors de Son expérience et par la meilleure position dans l'essaim La figure (III.1) Illustre le principe du déplacement des particules.

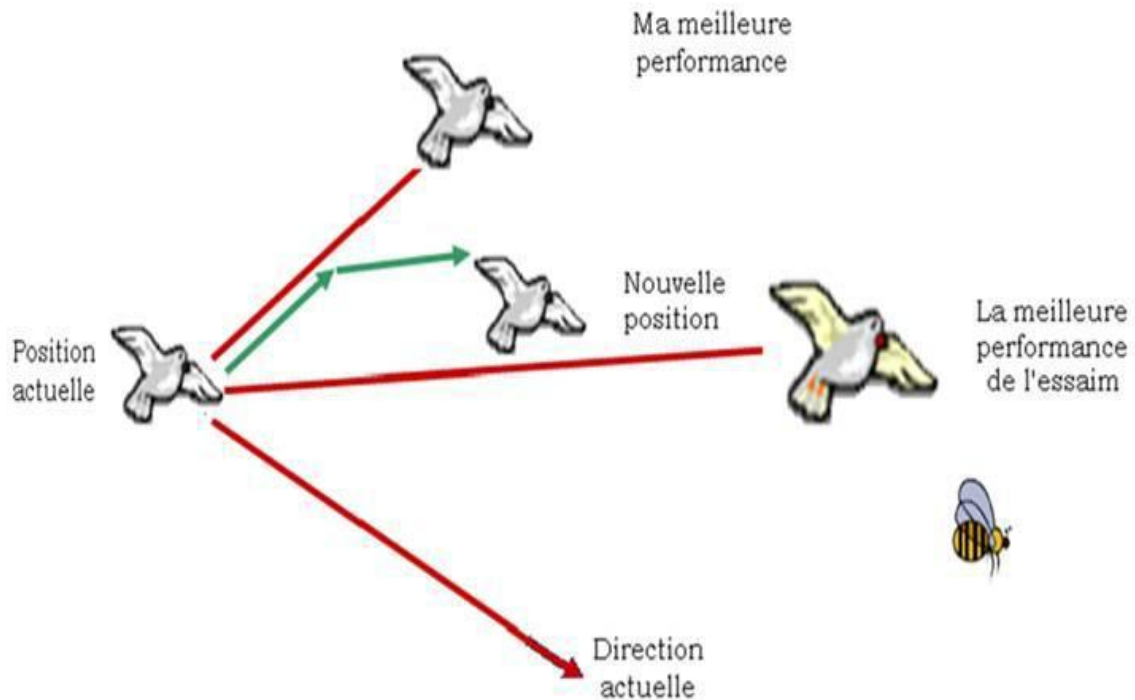


Figure III.1: Schéma de principe du déplacement d'une particule.

III.3.4. Formulation du standard PSO

A l'état initial de l'algorithme PSO, les particules de l'essaim sont réparties aléatoirement dans l'espace de recherche du problème [75, 76].

Chaque particule i de l'essaim est représentée dans un espace de recherche de dimension D , par un vecteur de position et par un vecteur de vitesse qui sont les suivants [71] :

$$X_i = (X_{i1}; X_{i2}; \dots \dots X_{iD}) \quad (\text{III.2})$$

$$V_i = (V_{i1}; V_{i2}; \dots \dots V_{iD}) \quad (\text{III.3})$$

Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note :

$$P_i = (P_{i1}; P_{i2}; \dots \dots P_{iD}) \quad (\text{III.4})$$

La meilleure position atteinte pour toutes les particules de l'essaim est notée :

$$g = (g_1; g_2; \dots \dots g_D) \quad (\text{III.5})$$

A chaque pas du temps Le Processus de calcul de la meilleur solution de la position et de la vitesse de chaque particule sont mise à jour par les équations mathématique (III.6) et (III.7).

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

$$V_{ij}^{k+1} = w * V_{ij}^k + C_1 * rand_1 * (pbest_{ij}^k - X_{ij}^k) + C_2 * rand_2 * (Gbest_j^k - X_{ij}^k) \quad (III.6)$$

$$X_{ij}^{k+1} = X_{ij}^k + V_{ij}^{k+1} \quad (III.7)$$

Où :

| | |
|------------------|--|
| ω | ω est l'inertie, |
| c_1, c_2 | c_1 et c_2 sont des coefficients accélérations. |
| $Rand_1, rand_2$ | sont des nombres aléatoires dans l'intervalle [0 1], qui sont changé a chaque itération, |
| $Gbest$ | est la meilleure solution dans l'essaim trouvée jusqu'à l'instant t |
| $Pbest$ | La meilleur solution de chaque particule jusqu'à l'instant t |

Pour appliquer la méthode d'optimisation par Essaim Particulaire sur un problème quelconque, il est nécessaire de définir les paramètres suivants : la fonction objectif (fitness), le nombre de particule, le nombre d'itération et aussi On doit essentiellement suivre les étapes de l'algorithme présenté dans la section suivante [77].

III.3.5. L'algorithme OEP

Pour résoudre un problème a l'aide de la méthode d'optimisation par essaim de particule.il est obligatoire de définir une fonction objective [78]. considérons le problème de minimisation [79].

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \\ x \in D \end{cases} \quad (III.8)$$

La fonction fitness associée est:

$$fitness(x_j) = f(x_j) \quad (III.9)$$

Les étapes de L'algorithme de l'OEP [80-82] sont comme suite:

- Step 1: initialize the population size m, set the maximum iteration $ietr_{max}$, inertia weight ω , acceleration constants C_1, C_2 , and the number of parameter n to be optimized.
- Step 2: randomly generate the initial position and velocity of each i^{th} particle in swarm as shown in Eqs (III.2) and (III.3).
- Step 3: for each particle parameter, evaluate the fitness function (III.9)

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

- Step 4: assign 'Pbest' as the best fitness values of each particle position (III.4); assign 'Gbest' as the best fitness values among all particle (III.5).
- Step 5 : the steps 5-1 and 5-2 are repeated until the termination criteria are achieved , or until the number of iteration reaches its maximum limit
 - Step 5-1: At each iteration k , the updated velocity and position of i^{th} particle are given by Eq. (III.6) and (III.7).
 - Step 5-2: for each particle i^{th} evaluate a fitness function (III.9) (similar to step3). Assign the new 'Pbest' and 'Gbest' (similar to step4)
- Step 6 : produce the Gbest of particles (III.5).

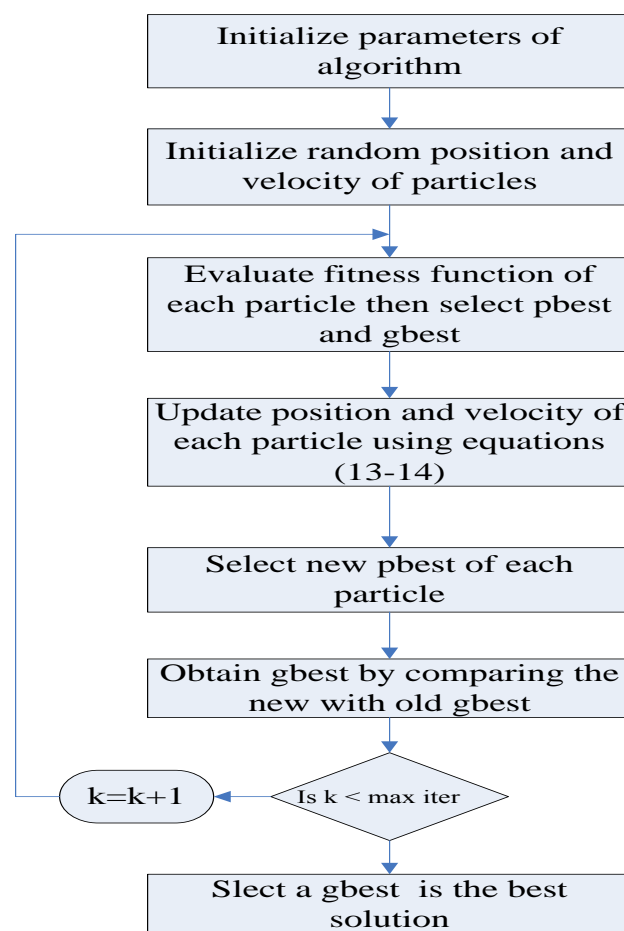


Figure III.2: Organigramme de la méthode PSO[81].

Ces étapes de calcul ne s'arrêtent pas si le critère de convergence n'est pas atteint. Cela peut être :

- le nombre d'itérations ;
- une valeur de la fonction objectif (MIN ou MAX) ;
- la vitesse tend vers le 0

III.3.6. Configuration et paramètres de contrôle

L'algorithme de l'OEP est caractérisé par des liens d'informations entre les différentes particules de l'essaim. Le mécanisme responsable de la recherche des nouvelles solutions candidat est décrit dans les sections (III.3.2) et (III.3.3).

L'algorithme de l'OEP standard qui a été présenté montre qu'il y'a plusieurs paramètres influant sur sa rapidité et son efficacité. ces paramètres sont les suivants [67] :

- La topologie de voisinage
- La dimension du problème,
- Le nombre N de particules,
- Les valeurs des coefficients (Les coefficients de confiance) **C1** et **C2**,
- La taille du voisinage,
- La vitesse.

III.3.6.1. Taille et topologie de voisinage

Le voisinage c'est l'arrangement des particules forment un réseau social pour construire des liens de communications entre ces particules. Plusieurs types de topologie de voisinage ont été étudié mais les trois type les plus utilisée [83] sont montrer dans la figure (III.3):

- **Topologie en étoile** : toutes les particules sont connectées entres eux. Ainsi ce type de topologie de solution est un optimum global (Figure III.3.a).
- **Topologie en anneau**: chaque particule est reliée par trois particules de son voisinage les plus proches (Figure III.3.b).
- **Topologie en rayon** : dans ce type de topologie une seul particule (particule central) fournie des informations à tous les particules de l'essaim (Figure III.3.c)

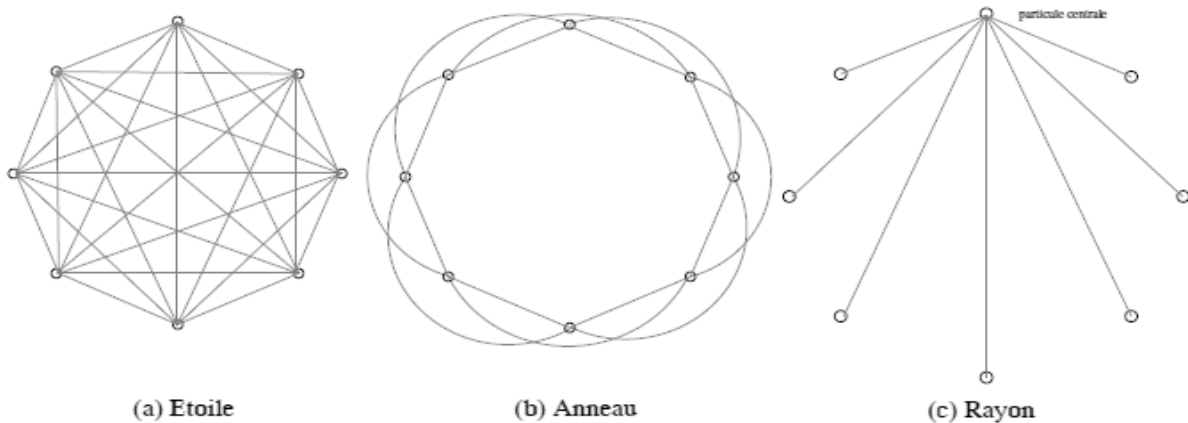


Figure III.3: les trois types de topologie de voisinage

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

III.3.6.2. Nombre de particules

Généralement le nombre des particules dépend essentiellement, des dimensions du problème, de la taille de l'espace de recherche, et de la capacité de la machine à exécuter l'algorithme de calcul par PSO. Fréquemment le nombre de particules utilisés est entre 20- 40. Mais un nombre de 10 particules est suffisamment pour avoir des bons résultats.

III.3.6.3. Dimension des particules

Elle est déterminée par les dimensions du problème à traité, Gamme de particules

III.3.6.4. La vitesse maximale

Dans des applications précédentes de la technique OEP, il a été constaté que le déplacement des particules conduise à sortir de l'espace de recherche. Cela est dû à la croissance explosive au niveau de la vitesse des particules [84]. Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire d'introduire un nouveau paramètre **Vmax**, qui va permettre de contrôler l'explosion du système [85]. Pour ne pas engendrer le processus de calcul à des minima locaux, la valeur **Vmax** doit respectée les conditions suivantes :

$$\text{Si } vid > Vmax \text{ alors } vid = Vmax \quad (III.10)$$

$$\text{Si } vid < - Vmax \text{ alors } vid = - Vmax.$$

Dans des expériences précédent il à été démontré que les paramètres **C1** et **C2** doivent être fixés à 2 à condition que la somme de $c_1 + c_2 \leq 4$, et que le seul composant qui doit être ajusté est le **Vmax**. d'une autre parte le choix de la valeur de **Vmax** dépend des problèmes traités [86].

III.3.6.5. Coefficients de confiance

Les coefficients de confiance $c_1 rand_1$ et $c_2 rand_2$ de l'équation (III.6), jouent des rôles importants sur la recherche de la solution. C'est grâce à elles que la particule tend à suivre son expérience ou l'expérience de son voisinage [83]. $rand_1$, $rand_2$ sont des nombres aléatoire entre 0 et 1, elles sont évaluées à chaque itération et pour chaque dimension. c_1 , c_2 sont des constantes définies par la relation $c_1 + c_2 \leq 4$, généralement $c_1 + c_2 = 2$. Toutefois, d'autres paramètres ont été également utilisés dans des documents différents [72]. Mais habituellement c_1 égale à c_2 et varie dans l'intervalle : [0,4].

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

III.3.6.6. coefficient d'inertie (W)

Le coefficient d'inertie appelé (W) est introduit a la l'équation de la vitesse (III.6) par [83, 85]. Celle-ci a pour but de contrôler l'influence de la vitesse obtenue au pas précédent (itération précédent) sur la convergence de la méthode dans le prochain pas (l'itération suit) entre exploration globale et exploration locale.

Cependant une grande valeur du coefficient d'inertie provoque une exploration globale de l'espace de recherche tandis qu'un petit facteur d'inertie provoque une exploration locale. Des études expérimentales montrent que:

$$\frac{1}{2}(C_1 + C_2) \langle W \rangle < 1 \quad (\text{III.11})$$

III.3.6.7. Le contrôle de position

Dans certaine expérience d'application de la méthode OEP, il a été constaté parfois que les positions des particules ont tendance à sortir de l'espace de recherche lors de leurs déplacements. Celles-ci peuvent rendre la convergence de la méthode impossible, pour y remédier, un mécanisme dit confinement d'intervalle est appliqué afin de gérer le déplacement de la particule est qui consiste à ramener la particule sur un nouveau point appartenant à l'espace de la recherche chaque fois que c'est nécessaire pendant le processus de la recherche de l'optimum.

$$\begin{cases} \text{si } X_{ij} > X_{j \max} & \text{alors } X_{ij} = X_{j \max} \\ \text{si } X_{ij} < X_{j \min} & \text{alors } X_{ij} = X_{j \min} \\ & V_{ij} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Ou: $X_{j \min}$ et $X_{j \max}$ sont les valeurs limites du paramètre X_{ij}

III.3.7. Algorithme de WIPSO

Comme toutes les autres méthodes d'optimisation, l'algorithme PSO peut présente dans son application une divergence ou d'une convergence rapide, ce qui permet de donner des résultats non satisfaisants, pour remédier à ce type de désavantages plusieurs modifications ont été appliquées à l'algorithme de base du PSO pour améliorer ces performances.

Pour améliorer la qualité de la solution et les caractéristiques de la convergence, l'algorithme PSO standard est modifié en utilisant des coefficients d'accélération variable dans le temps et du facteur de pondération d'inertie variant dans le temps, ont démontré qu'une bonne convergence peut être obtenue en rendant dépendants ces paramètres.

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

La formule mathématique de base de la PSO dont le coefficient d'inertie (w) est considéré comme un constant peut être donné sous forme suivante [87]:

$$V_{ij}^{k+1} = w * V_{ij}^k + C_1 * rand_1 * (pbest_{ij}^k - X_{ij}^k) + C_2 * rand_2 * (Gbest_j^k - X_{ij}^k) \quad (III.13)$$

La nouvelle variante dite WIPSO peut être exprimé par les formules suivantes.

$$V_{ij}^{k+1} = w_{new} * V_{ij}^k + C_1 * rand_1 * (pbest_{ij}^k - X_{ij}^k) + C_2 * rand_2 * (Gbest_j^k - X_{ij}^k) \quad (III.14)$$

Avec:

| | |
|------------------|--|
| V_{ij}^k | est la vitesse de la particule I a chaque iteration |
| W | est le pondération d'inertie |
| C_1, C_2 | sont les coefficients d'accélérations |
| $rand_1, rand_2$ | sont des nombres aléatoires entre 0 et 1 |
| X_{ij}^k | est la position de la particule à l'itération k |
| $pbest_{ij}^k$ | est la meilleur position de la particule à l'itération k |
| $Gbest_j^k$ | est la meilleur position dans l'essaim |

A chaque itération, la position et la vitesse de chaque particule sont a mise à jour par l'évaluation de la fonction objectif, et la comparaison entre la nouvelle solution Pbest avec l'ancien Pbest (la meilleur position de chaque particule à l'itération (k-1)), et aussi par la comparaison entre la nouvelle Gbest avec l'ancien Gbest (meilleur position dans l'essaim). Les coefficients d'accélérations (C_1 et C_2) et le facteur de pondération d'inertie (W) de la technique WIPSO sont exprimés par l'équations suivante:

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} \quad (III.15)$$

$$W_{new} = W_{min} + W * rand_3 \quad (III.16)$$

$$C_1 = C_{1max} - \frac{C_{1max} - C_{1min}}{iter_{max}} * iter \quad (III.17)$$

$$C_2 = C_{2max} - \frac{C_{2max} - C_{2min}}{iter_{max}} * iter \quad (III.18)$$

Avec:

| | |
|--------------------------|---|
| W_{max}, W_{min} | sont la valeur initiale et finale de coefficient d'inertie. |
| $iter_{max}, iter_{min}$ | sont le nombre maximale et minimale de l'itération |

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

C_{1max} , C_{1min} sont la valeur initiale et finale de coefficients d'accélération
 C_{2max} , C_{2min} sont la valeur initiale et finale de coefficients d'accélération
 $rand_3$ est un nombre aléatoire entre 0 et 1

III.3.8. Algorithme de PSO-CFIWA

La PSO-CFIWA est une autre variante de la méthode PSO de base, elle a été développée par Sangeeta Mandal dans le but d'améliorer la convergence et l'efficacité de la PSO de base [88]. Elle est caractérisée par la variation du facteur de pondération d'inertie dans le temps. Contrairement de la méthode WIPSO concernant les coefficients cognitif et social C_1 , C_2 qui sont considérés comme des constantes en fonction du temps. Dans cette variante, un autre facteur dit Constriction Factor K a été introduit par M. Clerc, J. Kennedy [89] qui permet de mieux contrôler la divergence des particules et de s'affranchir de la définition de V_{max} . Cette variante de PSO, qui a été largement utilisée dans la littérature, est connue sous le nom de Canonical PSO [72]. La nouvelle variante peut s'exprimer par les formules suivantes :

$$V_{ij}^{k+1} = k * (W * V_{ij}^k + C_1 * rand_1 * (pbest_{ij}^k - X_{ij}^k) + C_2 * rand_2 * (Gbest_j^k - X_{ij}^k)) \quad (III.19)$$

$$W = W_{max} - ((W_{max} - W_{min}) / iter_{max}) * ietr \quad (III.20)$$

$$k = \frac{2}{|2 - \Phi - \sqrt{\Phi^2 - 4\Phi}|} \quad (III.21)$$

III.4. Application de l'optimisation par essaim de particule sur la table de cuisson à induction

L'objectif de ce travail est d'avoir une géométrie optimale de l'inducteur destiné à la table de cuisson par induction qui peut donner une bonne répartition des courants induits dans le fond d'un récipient afin d'avoir une bonne distribution de la température (la plus homogène).

Pour atteindre cet objectif, il est possible de faire varier les dimensions des bobines (les distances d_i et les épaisseurs z_i) constituent l'inducteur et aussi l'emplacement de ces bobines par rapport au récipient (Figure. III.5). Cette solution est très pratique, car par définition du chauffage par induction les courants induits sont principalement générés par la circulation des courants d'alimentation dans les bobines de l'inducteur, ces courants induits provoquent à leur tour l'échauffement du récipient par effet de joule. Ce qui montre analogiquement que la répartition de la température dépend fortement de la géométrie des bobines.

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la résolution des équations de la magnétodynamique et de la thermique régissant le system de cuisson par induction est un processus complexe, non-linéaire et difficile. Il est bien connue par littérature qu'il est difficile d'établir un modèle mathématique du phénomène magnéto-thermique qui nous a permis de déterminer analytiquement les différents paramètres et les dimensions du système. Pour cela nous avons opté pour le choix de la méthode d'optimisation par essaim de particule (PSO) afin de trouver une configuration optimale de l'inducteur qui nous permet d'atteindre notre objectif.

En plus de ce travail et dans le même objectif, nous avons appliqué d'autres méthodes d'optimisation métaheuristiques [90]: Standard PSO, WIPSO et la PSO-CFIWA. Les résultats sont comparés par rapport a la méthode standard PSO, en utilisant comme référence la répartition de la température avant l'optimisation qui a été obtenue dans le chapitre précédent.

III.4.1. Représentation du problème d'optimisation

La méthode d'optimisation par essaim de particule (PSO) à pour objectif de trouver des nouvelle dimensions et des meilleurs positionnements des bobines de l'inducteur peuvent donner une bonne répartition de la température sur le long du rayon de la charge.

III.4.2. Fonction objectif

La fonction objectif à minimiser dans cette application représente la différence de la température entre la valeur désiré et la mesuré dans chaque nœud de maillage qui est définie sous la forme suivante:

$$f_{obj}(d_i, z_i) = f_{obj}(d_1, d_2, \dots, d_9, z_1, z_2, \dots, z_4) \quad (\text{III.22})$$

$$f_{obj}(d_i, z_i) = \sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{T_i - T_f}{T_f} \right) \leq \varepsilon \quad (\text{III.23})$$

d_i les largeurs des bobines et les distances entre les bobines

z_i l'épaisseur des bobines

T_f la temperature désiré

T_i La température en chaque point de calcul dans le fond du récipient;

Le choix de cette fonction est guidé par l'objectif à atteindre, celui d'avoir une structure optimale de la répartition des gorges dans l'inducteur qui donne une bonne répartition de la densité de courant et de la température dans le fond du récipient le long du rayon. Pour cela, plusieurs itérations k de tests de calcul doivent être effectuées afin de déterminer la géométrie optimale de l'inducteur. L'organigramme du code de calcul est résumé sur la figure (III.4).

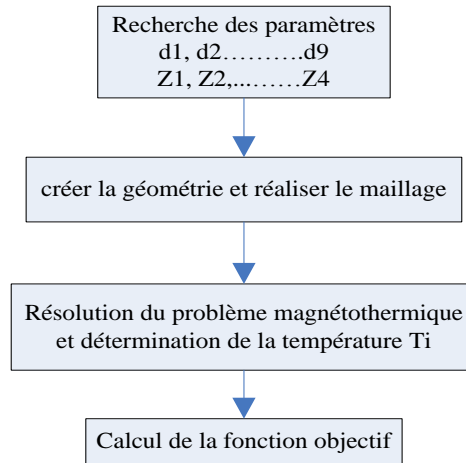


Figure III.4: Organigramme d'évaluation de la fonction objectif

III.4.3. Organigramme de la technique PSO appliquée à l'optimisation de l'inducteur

Dans la technique PSO, chaque particule de l'essaim se déplace dans un espace à (D) dimensions dans le but de la recherche de la meilleure position qui est définie par une fonction objectif. Dans notre travail, nous avons treize (13) paramètres (d_i, z_i) à optimiser (Figure. III.5), qui sont les dimensions des emplacements et des bobines de l'inducteur, Où la position de chaque particule représente l'image de ces derniers paramètres.

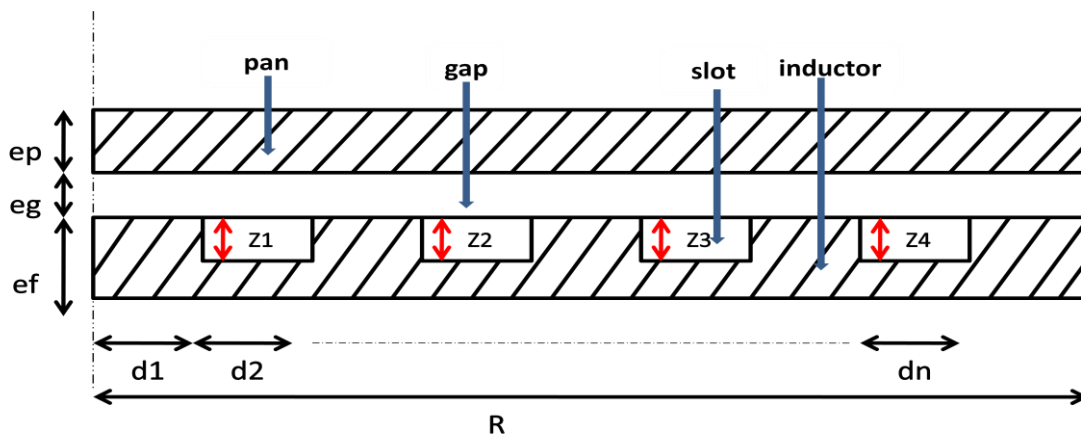


Figure III.5: les dimensions de l'inducteur à optimiser

L'algorithme PSO commence par une génération aléatoire de l'essaim et chaque particule se déplace dans l'espace de recherche avec une vitesse qui est aussi générée aléatoirement [9]. Dans ce travail, chaque particule est définie comme suit:

$$\{d_{1i}, d_{2i}, \dots, d_{9i}, z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{4i}\}$$

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

Avec :

$d_1, d_{2i}, \dots, d_{9i}$ Les distances des bobines et l'espace entre les bobines

$z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{4i}$ Les épaisseurs des bobines

Le vecteur de position et de vitesse de la particule (i) a l'itération k dans l'espace de treize dimensions sont donnés par les équations (III.24) et (III.25) respectivement.

$$\begin{bmatrix} d_{1i}^k, d_{2i}^k, \dots, d_{9i}^k, z_{1i}^k, z_{2i}^k, \dots, z_{4i}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^k & d_{21}^k & \dots & d_{91}^k & z_{11}^k & z_{21}^k & \dots & z_{41}^k \\ d_{12}^k & d_{22}^k & \dots & d_{92}^k & z_{12}^k & z_{22}^k & \dots & z_{42}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ d_{1m}^k & d_{2m}^k & \dots & d_{9m}^k & z_{1m}^k & z_{2m}^k & \dots & z_{4m}^k \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$\begin{bmatrix} V_{d1i}^k, V_{d2i}^k, \dots, V_{d9i}^k, V_{z1i}^k, V_{z2i}^k, \dots, V_{z4i}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d11}^k & V_{d21}^k & \dots & V_{d91}^k & V_{z11}^k & V_{z21}^k & \dots & V_{z41}^k \\ V_{d12}^k & V_{d22}^k & \dots & V_{d92}^k & V_{z12}^k & V_{z22}^k & \dots & V_{z42}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ V_{d1m}^k & V_{d2m}^k & \dots & V_{d9m}^k & V_{z1m}^k & V_{z2m}^k & \dots & V_{z4m}^k \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Nous avons vu que les positions de chaque particule sont générées aléatoirement, il est donc important de les contrôler avec les équations suivantes ((III.26), (III.27), (III.28))

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{1\min} \leq d_{1\max} \\ d_{2\min} \leq d_{2\max} \\ d_{3\min} \leq d_{3\max} \\ d_{4\min} \leq d_{4\max} \\ d_{5\min} \leq d_{5\max} \\ d_{6\min} \leq d_{6\max} \\ d_{7\min} \leq d_{7\max} \\ d_{8\min} \leq d_{8\max} \\ d_{9\min} \leq d_{9\max} \end{array} \right. \quad (\text{III.26})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{1\min} \leq z_{1\max} \\ z_{2\min} \leq z_{2\max} \\ z_{3\min} \leq z_{3\max} \\ z_{4\min} \leq z_{4\max} \end{array} \right. \quad (\text{III.27})$$

$$R_{\min} \leq \sum_{i=1}^9 d_i \leq R_{\max} \quad (\text{III.28})$$

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

Avec:

Rmin la longueur minimum du rayon de l'inducteur

Rmax la longueur maximal du rayon de l'inducteur

- La position de la particule donnant la meilleure valeur de la fonction objectif à l'itération (k) est enregistrée et représentée sous la forme :

$$\{Pbestd_{1i}^k, Pbestd_{2i}^k, \dots, Pbestd_{9i}^k, Pbestz_{1i}^k, Pbestz_{2i}^k, \dots, Pbestz_{4i}^k\} \quad (III.29)$$

- La meilleure position donnant la meilleur valeur de la fonction objectif parmi toutes les particules de l'essaim à l'itération (k) est représentée par :

$$\{Gbestd_1^k, Gbestd_2^k, \dots, Gbestd_9^k, Gbestz_1^k, Gbestz_2^k, \dots, Gbestz_4^k\} \quad (III.30)$$

A chaque pas de temps, la position et la vitesse de chaque particule i sont mises à jour en évaluant la fonction objectif et en comparant :

- la nouvelle meilleure position **Pbest** par rapport à l'ancien **Pbest** (la meilleure position de la particule i à l'itération (k-1)).
- la nouvelle meilleure position de la particule dans l'essaim **Gbest** par rapport à l'ancien **Gbest** (la meilleure position de la particule dans l'essaim à l'itération (k-1)).

L'organigramme d'optimisation avec PSO de la table du système étudié est donné par la figure (III.6).

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

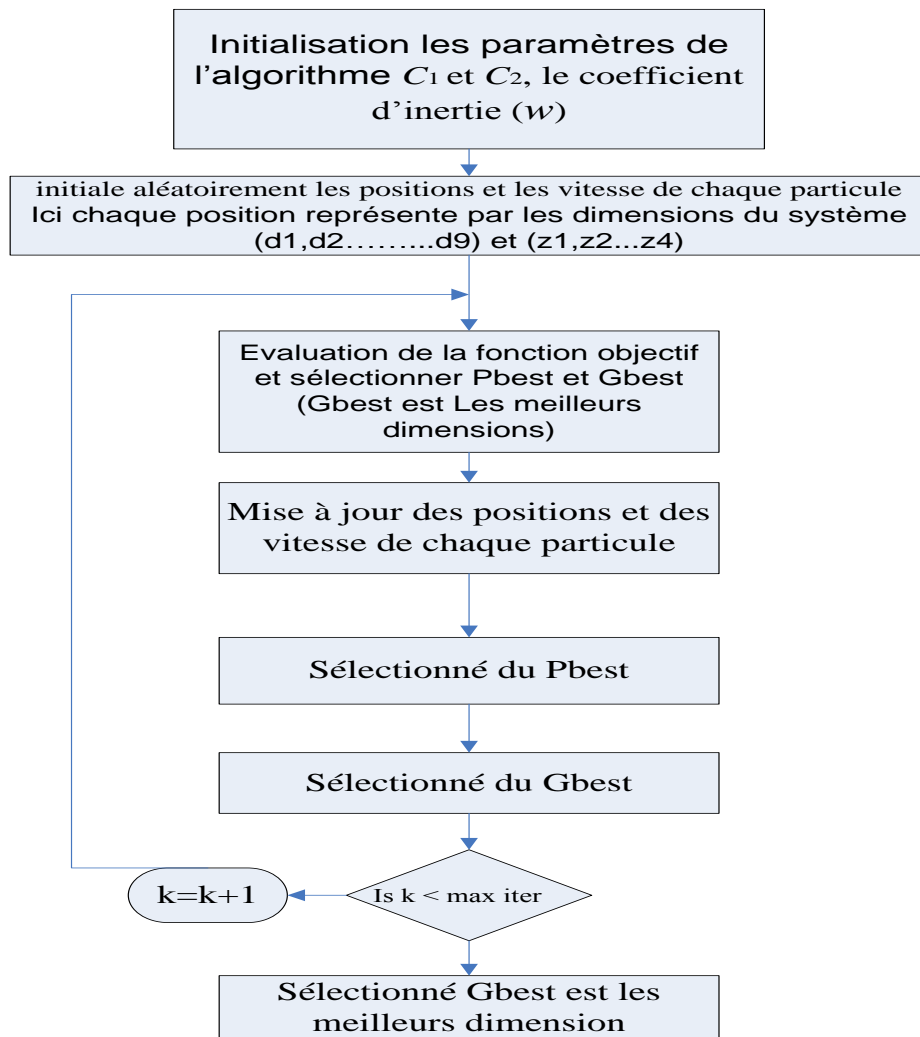


Figure III.6: Organigramme d'optimisation avec PSO de la table de cuisson à induction

III.4.4. Application de la méthode PSO dans le système étudié (T.C.P.I)

Pour déterminer la distribution optimale des bobines et leurs dimensions, l'algorithme PSO a été utilisé en utilisant les étapes suivantes:

- **Etape1** : initialiser la taille de la population m , définir le nombre maximale d'itération ($iter_{max}$), le coefficient d'inertie (w), les constantes d'accélération (C_1 et C_2). et le nombre de paramètres n à optimiser. les paramètres du système simulé sont indiqués dans le **Tableau. II.1**.
- **Etape 2** : générer de manière aléatoire la position et la vitesse initiale de chaque particule dans l'essaim (chaque particule dans l'essaim représente le nombre des paramètres à optimisé), comme indiqué dans les équations (III.24) et (III.25).
- **Etape 3** : Pour chaque particule, résolvez le problème magnéto-thermique, puis évaluez la fonction de fitness (le processus de calcul de la fonction de fitness pour chaque particule est présenté à la (Figure III.4) A chaque étape donnée du processus de

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

calcul, le programme élaboré affecte les propriétés physiques (σ , μ et J) correspondant à chaque température

- **Etape 4.** Assigne '**Pbest**' comme la meilleure position de chaque particule jusqu'ici qui donne la meilleure valeur de la fonction objectif. attribué '**Gbest**' la meilleure position parmi toutes les particules.
- **Etape 5.** les étapes 5-1 et 5-2 sont répétées jusqu'à ce que les critères de terminaison soient atteints ou jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne sa limite maximale.
 - **Etape 5-1.** À chaque itération k , les mises à jour de la vitesse et la position de chaque particule sont données par les équations (III.6) et (III.7).
 - **Etape 5-2.** pour chaque particule, évaluer la fonction de fitness (similaire à l'étape 3). Puis attribuez les nouveaux "**Pbest**" et "**Gbest**" (similaire à l'étape 4).
- **Etape 6.** Sélectionné '**Gbest**' comme la meilleure position parmi toutes les particules et la prendre ensuite comme les dimensions optimales des bobines de l'inducteur, qui pouvant donner une répartition uniforme de la température au fond de la casserole.

Celle-ci peut être exprimée par :

$$\{Gbestd_1^k, Gbestd_2^k, \dots, Gbestd_9^k, Gbestz_1^k, Gbestz_2^k, \dots, Gbestz_4^n\}$$

III.4.5. Paramètres de simulation des algorithmes PSO

Pour les méthodes stochastiques, il est nécessaire de procéder à plusieurs tests des algorithmes car les résultats ne sont jamais les mêmes par les procédures aléatoires utilisées.

Pour chaque variante de la PSO, l'optimisation est appliquée selon les étapes de l'organigramme de la figure (III.6). Les paramètres d'optimisation des trois variantes de la méthode d'essaim de particules (PSO) peuvent être ajustés pour que l'algorithme arrive à trouver la solution optimale. Les valeurs optimales des paramètres de simulation de la méthode d'optimisation par l'essaim de particules sont présentées dans le **tableau III.1** :

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

Tableau III.1: Les valeurs optimales des paramètres des algorithmes PSO

| L'algorithme | Algorithme PSO standard | Algorithme de WIPSO | Algorithme de PSO-CFIWA |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Nombre de particules N | 24 | 24 | 24 |
| Nombre d'itération itermax | 40 | 40 | 40 |
| $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ | X | 0.9, 0.4 | 1, 0.4 |
| $C_{1\max}, C_{1\min}$ | x | 2, 0.1 | x |
| $C_{2\max}, C_{2\min}$ | x | 0.1, 2 | x |
| C_1, C_2 | 2.05, 2.05 | x | 2.05, 2.05 |
| ω | 1 | x | x |
| k | x | x | 0.729 |

III.4.6. Cadre Expérimental

Dans ce travail, la simulation a été effectuée dans un environnement de matériel et de logiciel présentant les caractéristiques suivantes :

- Un microprocesseur avec Intel (R) Pentium (R) CPU @2.16 GHz 2.16 GHz
- 2 GB RAM
- Un disque dur de 500 Go.
- Un système d'exploitation Windows 7.
- MATLAB

III.4.7. Résultat de la simulation

De chaque étape donnée du calcul du processus, le programme élaboré reconstitue la géométrie à partir du choix des distances di , réalise le nouveau maillage et résout le problème magnétothermique. Les résultats déterminant la répartition de la température dans le fond du récipient sont présentés dans la figure (III.9), la figure (III.12) et la figure (III.15).

La nouvelle géométrie du système obtenu par chaque variante de la méthode PSO sont présentes dans la figure (III.8) et la figure (III.11) et la figure (III.14).

Cette modification apportée aux dimensions du système empêche la concentration de la température au centre du récipient. Les nouvelles dimensions du système sont données par le tableau III.3:

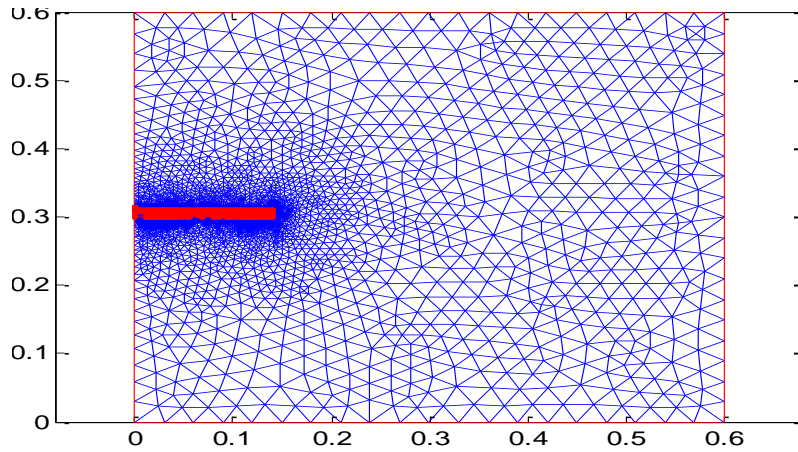


Figure III.7: Maillage du système étudié

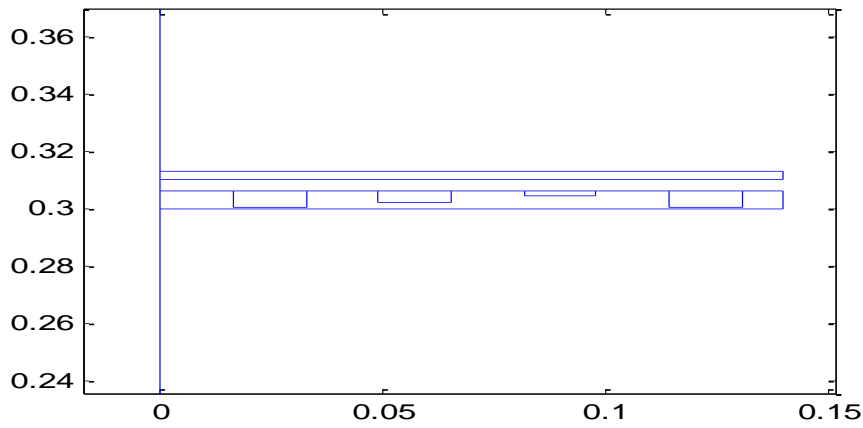


Figure III.8: géométrie du système après optimisation avec PSO standard

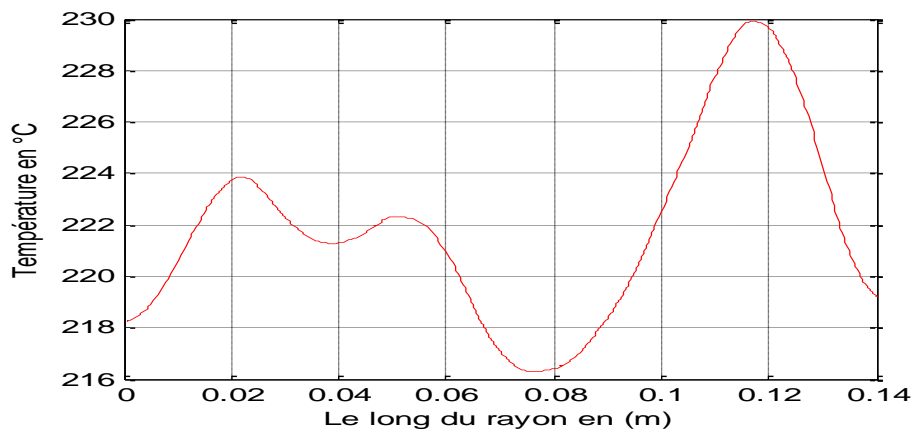


Figure III.9: Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec PSO standard

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

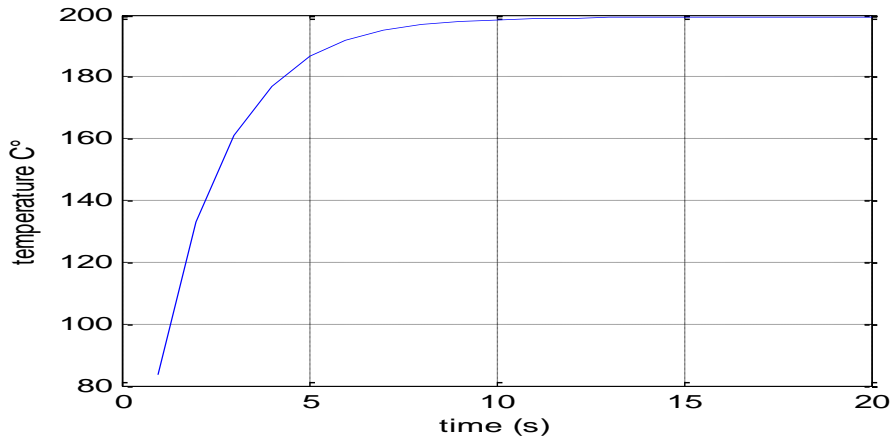


Figure III.10: Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec PSO STANDARD

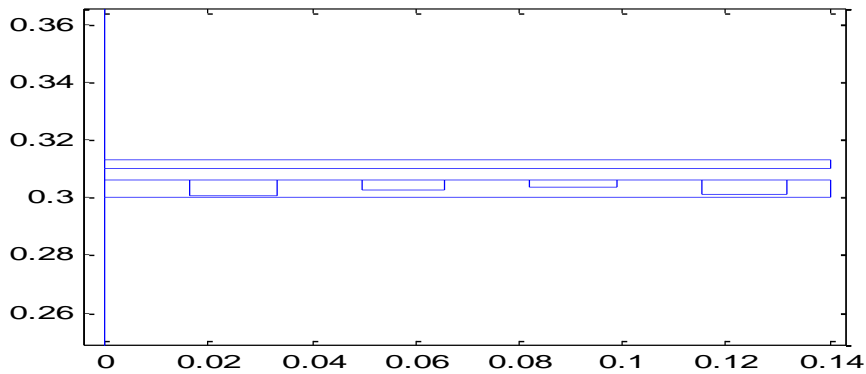


Figure III.11: géométrie du système après optimisation avec WIPSO

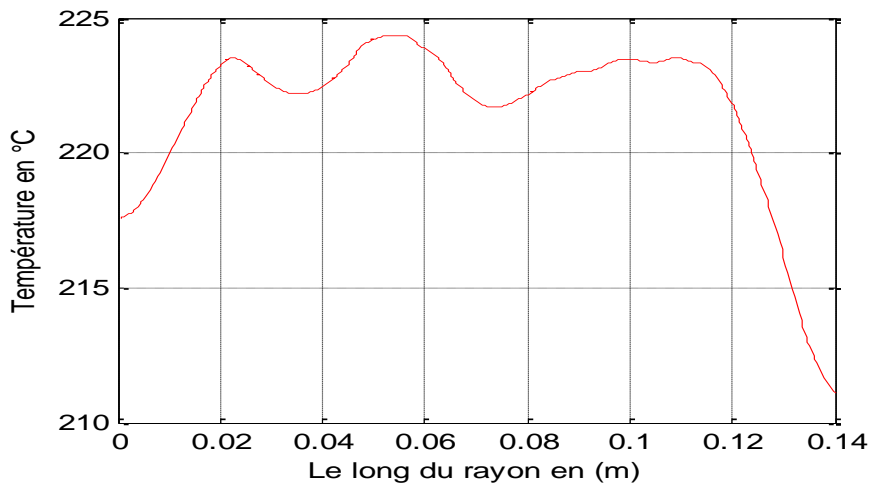


Figure III.12: Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec WIPSO

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

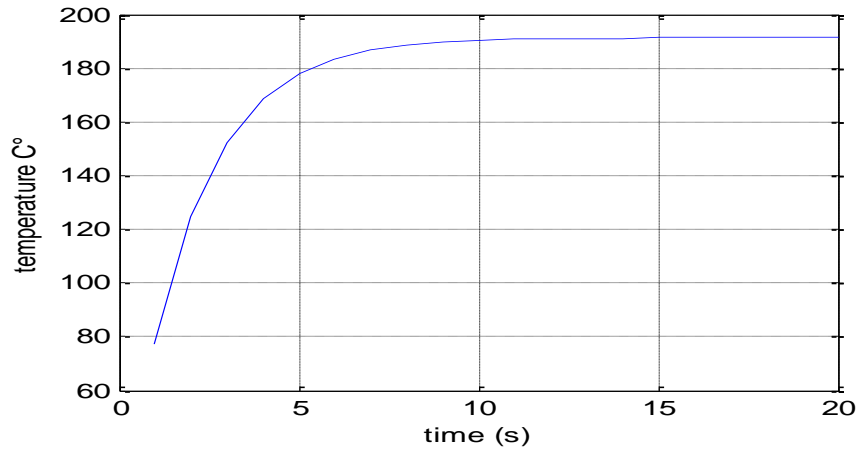


Figure III.13: Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec WIPSO

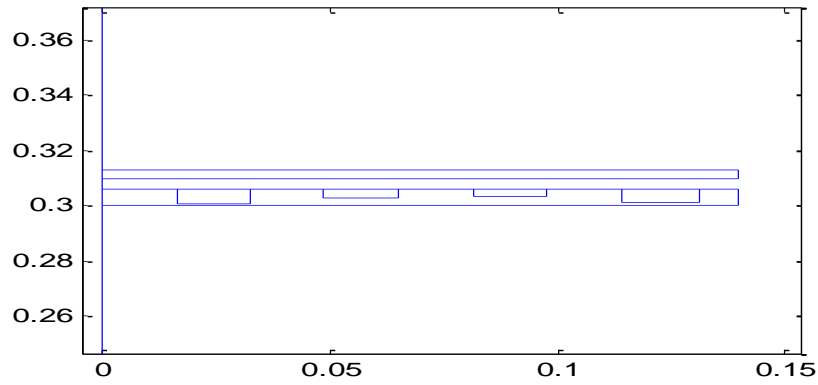


Figure III.14: géométrie du système après optimisation avec PSO-CFIWA

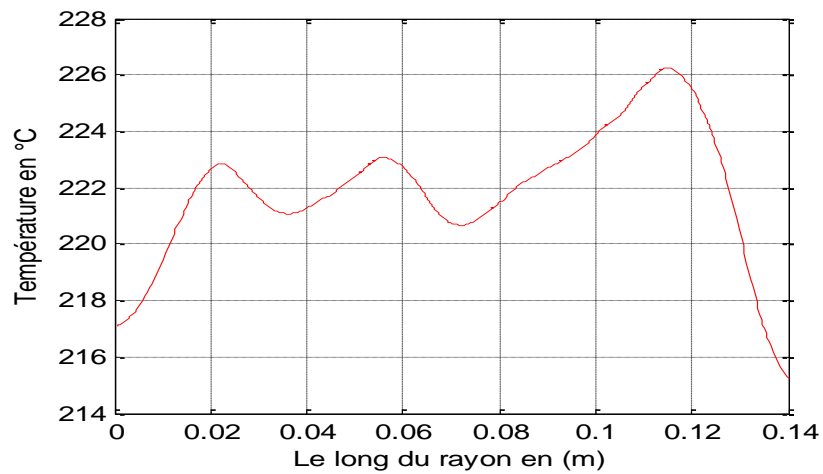


Figure III.15: Distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec PSO-CFIWA

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

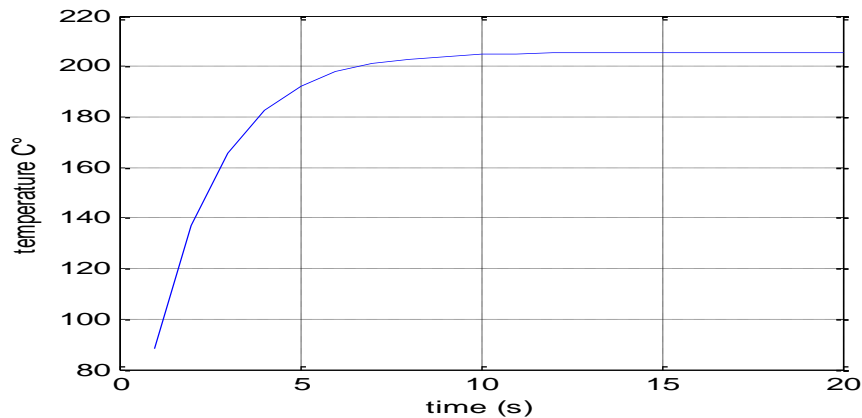


Figure III.16: Evolution de la température en fonction du temps après optimisation avec PSO-CFIWA

Tableau III.2: les valeurs optimales de la fonction objective et le temps d'achèvement de chaque algorithme

| Méthode d'optimisation | Nombre d'itérations | Temps de calcul Tim (s) | Erreur : ε F object=(Ti-Tf)/Tf |
|------------------------|---------------------|-------------------------|---|
| PSO-CFIWA | 40 | 21775.846687 | 0.0064 |
| Standard PSO | 40 | 22320.690888 | 0.0130 |
| WIPSO | 40 | 21403.862786 | 0.0073 |

Il est clairement visible par les figures. **III.9**, **III.12** et **III.15** que l'optimisation par la méthode PSO et ses variantes permettent de limiter la concentration de la température dans le centre du fond de la casserole comparativement à celle obtenue sans optimisation. Ce qui en résulte une bonne répartition de la température et meilleure géométrie de l'inducteur. Par analogie à cette constatation on peut dire que ces derniers algorithmes peuvent être utilisés pour améliorer le rendement de tous dispositifs de chauffage par induction.

Le tableau **III.2** résume les résultats numériques après 40 itérations correspondant avec un temps d'environ 10 h pour chaque variante de la méthode PSO avec une erreur acceptable de $\varepsilon = 0.0064$, pour la PSO-CFIWA, $\varepsilon = 0.0073$ et pour la WIPSO et $\varepsilon = 0.0130$ pour le standard PSO. On peut remarquer que l'optimisation par PSO-CFIWA a donné des résultats très acceptables par rapport aux deux autres méthodes (WIPSO et standard PSO) en terme minimisation de la fonction objectif.

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

Les résultats du **tableau III.2** montrent bien que la différence de la convergence entre la méthode PSO-CFIWA et la méthode WIPSO.

Tableau III.3 : Les dimensions des bobines avant et après optimisation

| Les Distances (mm) | Valeurs initiale Sans optimisation | Valeurs optimisée WIPSO | Valeurs optimisée PSO standard | Valeurs optimisée PSO-CFIWA |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| d1 | 16.25 | 0.0162 | 0.0163 | 16.3 |
| d2 | 16.25 | 0.0168 | 0.0163 | 16.1 |
| d3 | 16.25 | 0.0165 | 0.0163 | 16.1 |
| d4 | 16.25 | 0.0161 | 0.0163 | 16.4 |
| d5 | 16.25 | 0.0166 | 0.0163 | 16.5 |
| d6 | 16.25 | 0.0167 | 0.0163 | 16.0 |
| d7 | 16.25 | 0.0165 | 0.0163 | 16.9 |
| d8 | 16.25 | 0.0162 | 0.0163 | 17.0 |
| Z1 | 0.0055 | 0.0052 | 0.0055 | 5.5 |
| Z2 | 0.0055 | 0.0035 | 0.0035 | 3.3 |
| Z3 | 0.0055 | 0.0024 | 0.0016 | 2.4 |
| Z4 | 0.0055 | 0.0050 | 0.0055 | 4.9 |

Les résultats obtenus de la température avant et après l'optimisation sont donnés par la figure III.17

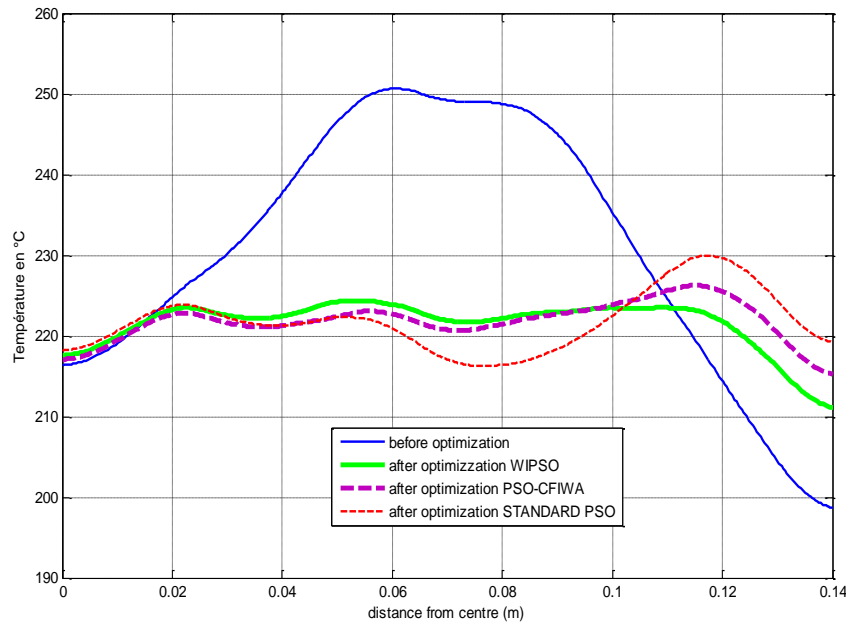


Figure III.17: Comparaison de la distribution de la température le long du rayon de la charge après optimisation avec les trois variantes de la PSO

III.4.8 Interprétation des résultats

Les résultats de la répartition de température le long du rayon de la charge, obtenus par l'application des différentes méthodes d'optimisation (WIPSO et PSO-CFIWA), sont présentés dans la figure **III.17**. Nous remarquons que les courbes obtenues de la température après optimisation présentent une bonne répartition de la température par rapport à celle donnée avant optimisation.

Nous remarquons que la méthode d'optimisation WIPSO et PSO-CFIWA donnent une bonne répartition de température comparativement à celle de la PSO standard. En plus ,nous pouvons dire que d'après le tableau **III.2** les deux méthodes (WIPSO et La PSO-CFIWA) offrent de meilleurs performances par rapport à l'autre méthode (PSO standard) en terme de la rapidité ,de convergence et de l'efficacité.

Chapitre -III : Optimisation de la table de cuisson par induction

III.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principes de base des méthodes d'optimisations par PSO, leurs formulations mathématiques et les paramètres principaux constituant ces méthodes. En plus nous avons exposé les trois variantes de la méthode PSO qui ont été développées depuis des modèles plus complexes afin d'améliorer les caractéristiques de la convergence et d'obtenir des meilleurs résultats.

En fin, nous avons appliqué ces trois variantes de la méthode PSO à notre système pour déterminer des nouvelles configurations de l'inducteur, afin d'obtenir une bonne répartition de la température dans le fond du récipient. La comparaison entre les résultats de chaque variante montre que la WIPSO fournit une bonne convergence en termes de rapidité et fiabilité. Pour le contrôle de cette température convenable à la température de cuisson (180-200°C), une méthode de régulation est appliquée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Régulation de la température

Chapitre -IV : Régulation de la température

IV.1. Introduction

L'évolution de la température dans un récipient chauffé par induction est fortement liée à des propriétés thermiques et électromagnétiques du matériau constituant le récipient. Nous avons vu d'après les courbes obtenues (Figure II.15 et Figure II.17) que la température dans la charge croit progressivement jusqu'à atteindre la température de cuire (env.760C° pour les récipients en ferromagnétiques). Cette dernière qui dépasse la température de cuisson (180-220°C).

Afin de remédier à ce problème, il est donc nécessaire d'appliquer un système de régulation pour contrôler de la température et la maintenir autour d'une valeur désirée. Vu que L'évolution de la température dans le récipient est difficile à déterminer en raison de son variation, et vu que la non-linéarité et l'incertitude du système de cuisson par induction, il est très difficile d'établir un modèle mathématique précis pouvant être utilisé pour les algorithmes de contrôle. Pour cette raison, une régulation utilisant un matériau intelligent, basée sur nouveau alliage magnétique (FeNiCr- T curie=270C°) placé dans le fond extérieur du récipient, à été proposée par [21, 91] afin d'assurer une autorégulation de la température. Une autre solution à été proposée par [92] concernant l'utilisation d'un régulateur non linéaire dit logique flou pour le but d'éviter une surchauffe du récipient.

Dans ce travail et pour le même contexte d'avoir une température stable et adaptable à la cuisson, nous proposons un autre type de régulateur électronique dit régulateur non linéaire, celui-ci permet de commander directement les interrupteurs de puissance. Un des ces régulateurs, le plus utilisé dans la littérature, est le régulateur dit "à hystérésis", il est caractérisé par sa simplicité d'utilisation et par sa robustesse face aux variations paramétriques du processus commandé. Un autre avantage de ce régulateur est d'assurer une bonne régulation de la température sans l'utilisation d'un modèle mathématique précis du système de cuisson par induction.

Le régulateur par hystérésis a pour rôle de commander l'organe de commutation (interrupteur), afin de contrôler l'évolution de la température et d'avoir une température adaptable pour la cuisson. D'après le principe de fonctionnement des régulateurs on peut dire que, lorsque la température du récipient est inférieure à la consigne le régulateur doit assurer le déclenchement du processus d'échauffement du récipient. Tandis que lorsque la température est supérieure à la température de consigne, le régulateur doit commuter l'interrupteur afin d'arrêter l'échauffement.

Dans ce chapitre nous présentons l'évolution de la température dans la table de cuisson par induction après l'optimisation de l'inducteur, par la suite nous présentons l'utilisation d'un

Chapitre -IV : Régulation de la température

régulateur de température de type à hystérésis qui nous permet de contrôler la progression de la température dans le fond du récipient.

IV.2. Généralités sur la régulation et les systèmes non linéaires

La régulation permet de maintenir et de stabiliser automatiquement une grandeur physique à régler aussi proche que possible de la valeur désirée (la valeur de consigne) quel que soit les perturbations provoquées par l'environnement. Un système de régulation comporte généralement le système à régler, un régulateur, un dispositif de mesure de la grandeur commande et un actionneur (l'organe de réglage). Le régulateur reçoit à son entrée la différence entre la valeur de référence (consigne) et celle de mesure (valeur réelle). Cette différence est appelée « Écart de réglage ». La figure (IV.1) représente un schéma général d'un system de régulation.

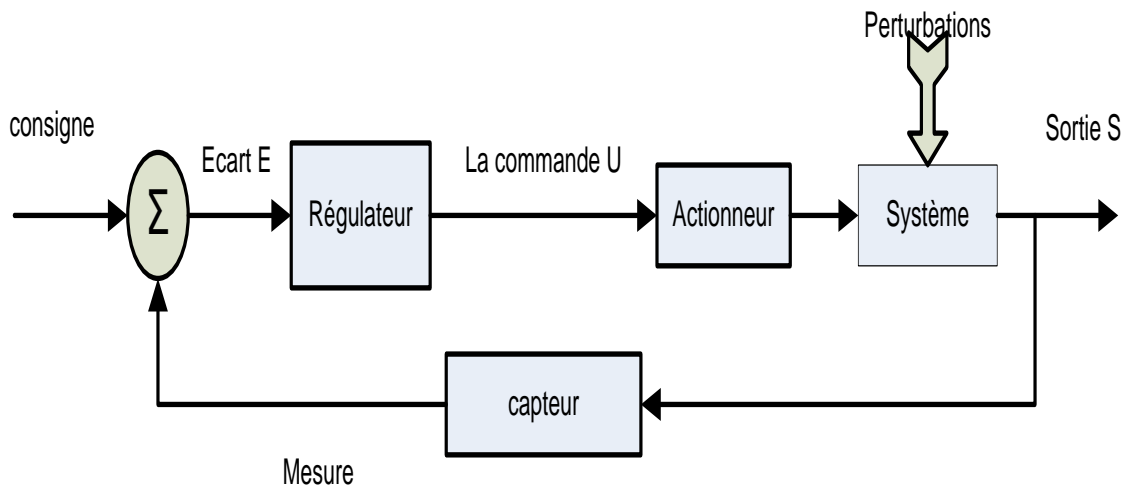


Figure IV.1: schéma général d'un system de régulation

D'après la valeur de l'écart de réglage, le régulateur détermine la séquence de commutation de l'actionneur (interrupteur). La grandeur à régler est donc ajustée de façon à réduire l'écart de réglage.

IV.2. 1. Les Systèmes non linéaires

Un système non linéaire est un système qui n'est pas linéaire, c'est-à-dire qui ne peut pas être décrit par des équations différentielles linéaires à coefficients constants. Cette définition explique la complexité et la diversité des systèmes non linéaires et des méthodes qui s'y appliquent. Il n'y a pas une théorie générale pour ces systèmes, mais plusieurs méthodes adaptées à certaines classes de systèmes non linéaires [93].

Chapitre -IV : Régulation de la température

IV.2.2. Type de régulateur

Un régulateur est un dispositif qui produit un signal de sortie selon un signal d'erreur (écart entre la mesure et la consigne) afin de réduire cette erreur [94]. Ces régulateurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne. La relation entre l'erreur et la sortie dépend du type de régulateur utilisé. Plusieurs types de régulateurs sont disponibles, mais si on élimine les modes rares, on retrouve principalement [94]:

- TOR deux positions (tout / rien, on-off),
- P proportionnel (proportionnel),
- I intégral (intégral, reset, automatique reset),
- D dérivé (rate, dérivative),

La régulation deux positions est habituellement employée seule ou avec le mode dérivé.

Si les processus commandés sont linéaires, (c'est-à-dire lorsque les grandeurs de sortie sont reliées aux grandeurs d'entrée par des équations différentielles linéaires) ils peuvent être alors modélisés par un modèle mathématique (fonction de transfert en « p » pour les systèmes à temps continu ou en « z » pour les systèmes à temps échantillonnés).

Certains processus sont par nature difficilement modélisables (thermique, chimique), variables dans le temps ou encore ne peuvent être correctement représentés par un modèle linéaire. Dans ce cas, les paramètres de réglage du régulateur ne seront pas optimaux et le système pourra ne pas être correctement contrôlé. Par analogie à la précédente description concernant la régulation, on peut y distinguer deux types de régulateur : les régulateurs linéaires et les régulateurs non linéaires.

IV.2.3. La chaîne de traitement de l'information

Principalement, une chaîne de régulation doit comprendre trois dispositifs indispensables: l'organe de mesure, l'organe de régulation et l'organe de contrôle. Le principe de fonctionnement d'une chaîne de régulation doit suivre les étapes suivantes :

- 1- L'observation de la grandeur à régler (mesure),
- 2- La comparaison entre la grandeur à régler à celle désirée (réglage)
- 3- La détermination l'action à entreprendre (régulateur)
- 4- agir sur une ou plusieurs grandeurs incidentes du procédé (action).

Chapitre -IV : Régulation de la température

La figure(IV.2) montre le schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information. Il est bien clair par cette figure que l'algorithme de la régulation doit démarrer par la mesure et l'observation de la grandeur à régler. Par la suite l'organe de régulation doit faire la comparaison entre la grandeur à régler à celle qui souhaitée. En cas de non-concordance des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, l'organe de régulation envoie un signal de commande à l'organe de contrôle (vanne, moteur, etc.), afin que celui-ci agisse sur le processus.

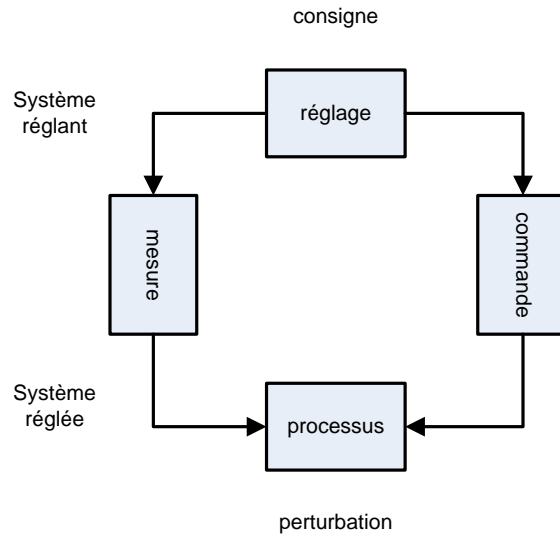


Figure IV.2: Schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information

Le but étant de maîtriser le procédé soit de le piloter, soit de l'empêcher d'évoluer en raison de perturbations.

IV.2.4. Boucle de régulation

Dans la physique la régulation est un système qui est défini par un ensemble des moyens matériels et techniques qui sont utilisées pour rendre automatiquement une grandeur physique d'un procédé (grandeur réglée), au voisinage d'une valeur dite consigne, quelles que soient les perturbations provoquées par l'environnement sur ce procédé. Elle est caractérisée par deux opérations qui sont liées l'une à l'autre : la comparaison et l'ajustage. L'application de ces techniques de régulation repose principalement sur deux types de boucles : "boucle de régulation ouverte" et "boucle de régulation fermée". Dans la section suivante nous présentons le principe.

IV.2.4.1. La régulation en boucle fermée

En régulation, Un système est dit bouclé (boucle fermée) lorsque la grandeur sortie est considérée comme paramètre de contrôle dans une chaîne de régulation. L'écart entre la valeur de la grandeur mesurée et la valeur de la consigne est envoyée au actionneur afin de contrôler la grandeur réglée (mesuré), de sorte à la maintenir dans des limites bien définies même en présence des perturbations de l'environnement. Par la suite l'état de l'actionneur doit être modifié en fonction de la sortie du contrôleur [95].

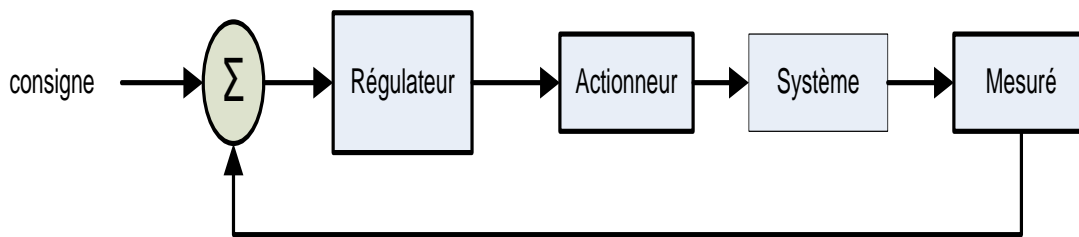


Figure IV.3: Schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information

L'avantage de ce type de régulation est que son fonctionnement ne nécessite pas de connaître aucun modèle mathématique précise qui nous a permis d'avoir de bons résultats de la régulation. Un autre avantage important est que la variation de la grandeur mesurée s'impose automatiquement à la variation de l'action ce qui conduit ; l'objectif fixé peut alors être atteint.

L'inconvénient majeur de ce type de régulation, est le comportement dynamique de la boucle qui dépend fortement du choix des composants constituant la boucle, un choix non étudié de ces derniers composants peut entrainer à des résultats avec des grandes oscillations ce qui rend le système à réguler dans un état instable.

IV.2.4.2. La régulation en boucle ouverte

Dans une régulation en boucle ouverte, le signal de commande est indépendant du signal de sortie. (Celle-ci n'est pas contrôlée). Ce type de régulation n'est pas applicable que si l'on connaît le modèle mathématique qui définit le fonctionnement du processus. Elle est couramment utilisée, lorsque la mesure de sortie du système est difficile à atteindre. L'avantage de cette technique de régulation est le temps de réponse qui est très court par rapport à la régulation en boucle fermée. Un autre avantage important c'est que cette technique ne produise pas le phénomène de dépassement des oscillations par rapport à la valeur de la consigne en raison de la stabilité de la dynamique de système [96].

Chapitre -IV : Régulation de la température

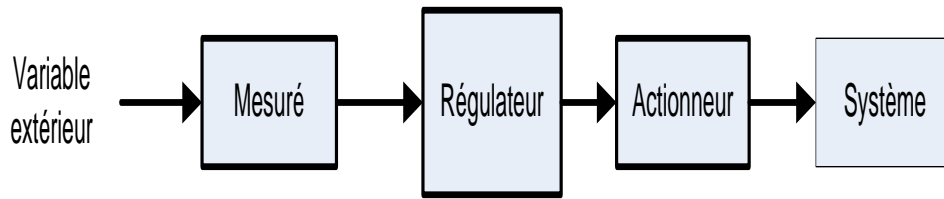


Figure IV.4 : Schéma de principe d'une chaîne de traitement de l'information

Parmi les inconvénients de ce type de processus, c'est qu'il est impossible de trouver une solution afin de compenser les erreurs, et d'éviter les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle [97]. Le principe de fonctionnement de la régulation en boucle ouverte consiste à établir une loi de commande qui relie la position de l'organe de commutation à la modification de la sortie de système pour rendre la valeur de la grandeur sortie (grandeur réglée) aussi proche que possible de la valeur de la consigne et se stabilise autour de celle-ci [95]. On peut dire alors que l'organe de commutation (actionneur) c'est l'élément le plus important dans une régulation en boucle ouverte, il conduit le processus à partir de la valeur de la consigne sans connaître les modifications s'imposées sur la sortie (soumise à des perturbations de tout ordre).

IV.3. Régulateur T.O.R

Le régulateur Tout ou Rien est le régulateur le plus simple et l'un des régulateurs les plus utilisés pour la régulation des paramètres de nombreux systèmes non linéaires [98]. Un bouilleur pour l'eau chaude domestique est une des applications les plus fréquentes de ce type de régulateur. Ce type de régulateur est fortement appliqué pour la commande des systèmes ayant une grande constante de temps ou la précision de la grandeur à régler n'est pas importante. Le régulateur Tout ou Rien est un régulateur discontinu car il fournit à l'organe de commutation (relais statique) un signal de commande qui varie instantanément dans des intervalles réguliers. La figure (IV.5) montre le principe de fonctionnement du régulateur à action à deux positions. Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement de ce type de régulateur la figure IV.5 montre que si la valeur de la grandeur mesure X est sous la consigne W , la commande Y est de 100% (TOUT). Tandis que si la grandeur mesure X dépasse la consigne W , la commande Y est de 0% (RIEN) [99].

Chapitre -IV : Régulation de la température

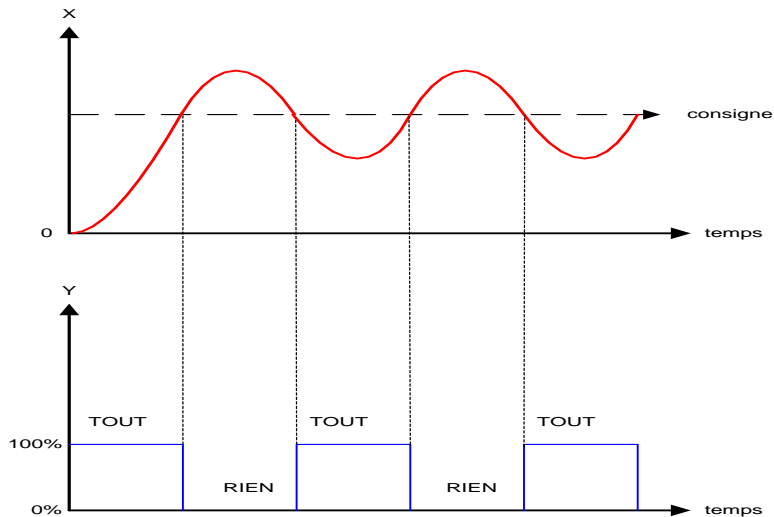


Figure IV.5: principe de fonctionnement de régulateur à action à deux positions

D'après cette dernière figure on peut dire que la grandeur de sortie (Y) ne connaît que deux positions, "Marche" ou "Arrêt". La valeur de sortie (Y) varie brusquement entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur à régler, autrement dit, elle varie d'une manière non progressive (tout ou rien) [100]. Généralement les actionneurs utilisés pour les régulateurs de type T.O.R sont des dispositifs électromécaniques qui sont dans la plus parts des applications des simples relais à contact. La figure (IV.6) Montre l'organigramme de fonctionnement de régulateur TOR [97].

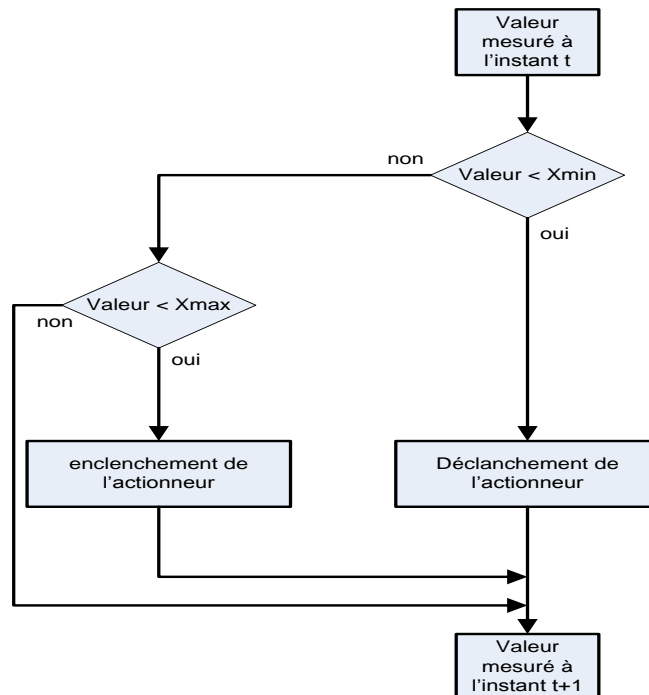


Figure IV.6: Organigramme de fonctionnement de régulateur TOR

Chapitre -IV : Régulation de la température

Ce type de régulateur présente plusieurs avantages telle que la robustesse, la simplicité de mise en œuvre, etc Mais son inconvénient majeur est que la variable contrôlée est caractérisée par des oscillations constamment autour de la consigne. Celle-ci due à la fréquence de commutation des actionneurs. Ce qui rend le système à contrôler moins précis. Pour limiter ces oscillations, on a recours à la propriété d'hystérésis afin de réduire l'amplitude des oscillations et d'atteindre une précision plus grande.

IV.4. Régulation de la température par hystérésis à bande fixe de la table de cuisson par induction

La régulation par hystérésis consiste à rendre la grandeur à régler à l'intérieur d'une bande engendrant sa référence [101, 102]. La figure(IV.7) montre le principe de fonctionnement du régulateur par hystérésis à bande fixe.

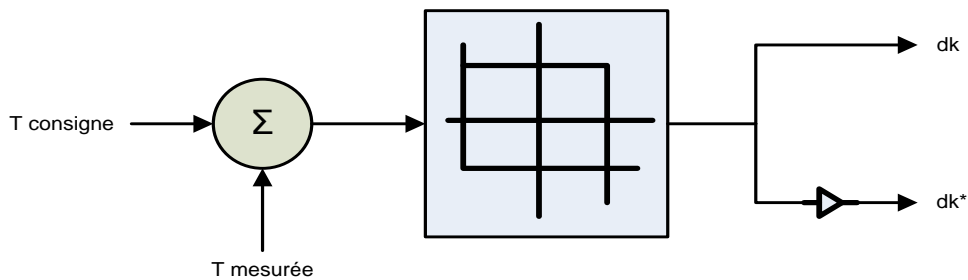


Figure IV.7: Principe de contrôle de la température par hystérésis [102].

Dans ce travail nous nous présentons une application du régulateur par hystérésis à bande fixe afin de contrôler l'évolution de la température dans le fond du récipient d'une table de cuisson par induction. Le schéma général de cette technique de régulation est illustré sur la figure (IV.8). Ce type de régulateur a pour objet le contrôle de l'organe de commutation (interrupteur DK). Typiquement, lorsque la température du récipient est inférieure à la température désirée (valeur de la température adaptable pour la cuisson) le régulateur doit assurer le déclenchement du processus d'échauffement. Tandis que lorsque la température est supérieure à la température désirée, le régulateur doit donner un ordre pour arrêter le processus d'échauffement du récipient. Le processus d'échauffement est réenclenché lorsque l'on repasse de quelques degrés en-dessous de la consigne.

La régulation par hystérésis se fait alors sur la température mesurée à chaque instant (t) par rapport à une valeur désirée. La différence entre la température mesurée et la température désirée doit être comparée à une bande fixe, celle-ci dit bande d'hystérésis (HB). Chaque

Chapitre -IV : Régulation de la température

sortie de la bande entraîne un changement de commutation de l'interrupteur DK [103].
comme elle est indiquée sur la figure (IV.8).

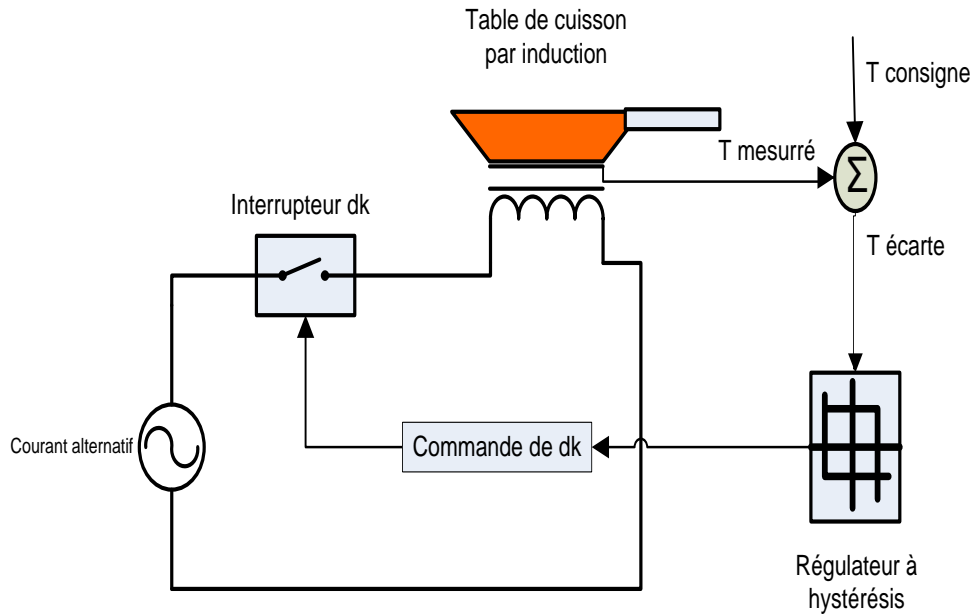


Figure IV.8: Schéma général d'un système de contrôle de la température d'hystérésis à bande fixe

La régulation par hystérésis est une technique qui appartient à des régulations des systèmes non linéaires car elle a la similarité de fonctionnement avec les régulateurs TOR [103]. Généralement elle s'applique aux systèmes dont les modélisations mathématiques présentent des difficultés. La régulation par hystérésis présente donc plusieurs avantages par rapport aux d'autres systèmes de régulation telles que le régulateur PID, PI...ect, elle est bien connue par sa rapidité, sa robustesse et aussi par sa simplicité à mettre en œuvre. Le seul paramètre inconnue dans ce type de régulation, est la largeur de la bande d'hystérésis qui peut être sélectionnée par l'utilisateur [104]. Son principe de fonctionnement est détaillé sur la figure(IV.9). Cette méthode de régulation est la plus adaptable pour la régulation de la température du chauffage par induction (exp : table de cuisson par induction) par rapport aux autres systèmes de régulations non linéaires car elle est facile à implémenter. Le principe de génération des ordres de commande est présenté sur la figure (IV.9).

Chapitre -IV : Régulation de la température

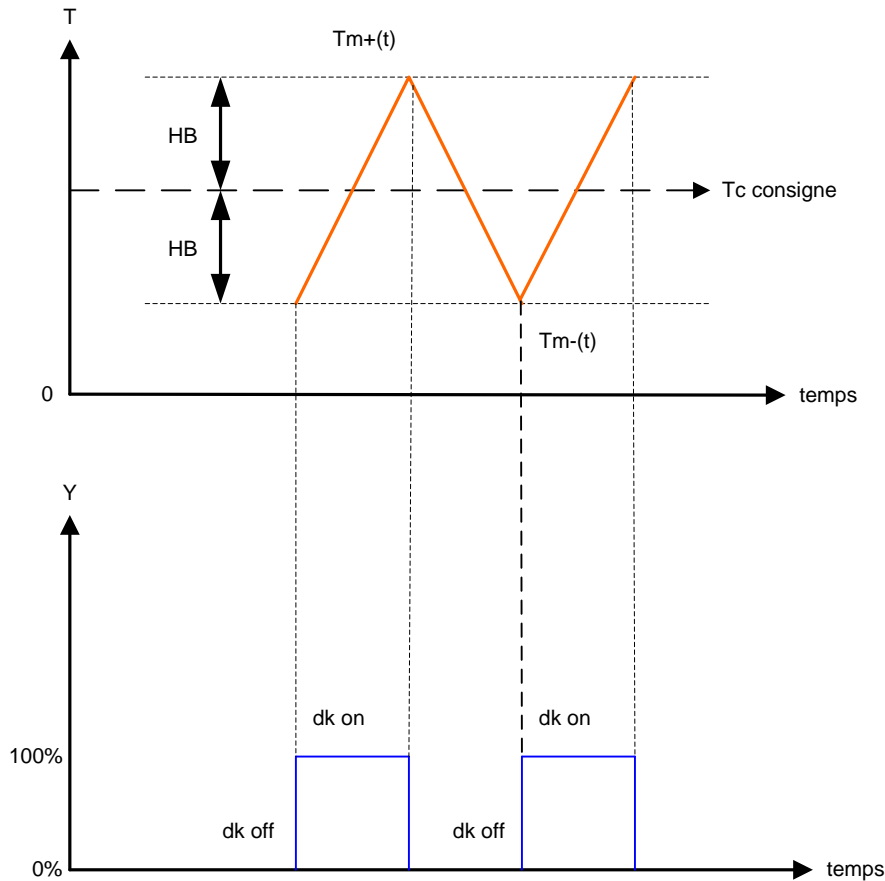


Figure IV.9: Ondes de courant et de température avec contrôle de la température à bande d'hystérésis

Par analogie à la description précédente, on peut conclure que cette technique de régulation est basée sur la génération des ordres de commutation à l'interrupteur DK. D'après les figures (IV.8) et (IV.9), La température désirée (T_c) (valeur de la température adaptable pour la cuisson) est comparée avec la température mesurée (T_m) dans le fond du récipient; le résultat de comparaison est injecté vers le régulateur par hystérésis à bande fixe pour générer le signal de commande de l'interrupteurs (DK) [105]. Suivant l'état de l'erreur de la température à l'intérieure de la bande d'hystérésis, la température de sortie de la table de cuisson prendre $:+T_m / 2$ ou $-T_m / 2$.

IV.5. Algorithme de fonctionnement du régulateur par hystérésis pour la régulation de la température dans la table de cuisson par induction

L'utilisation du régulateur par hystérésis permet de contrôler la température dans le fond de la casserole autour d'une valeur adaptable pour la cuisson (la consigne: 150°C à 250°C). Dans cette section, nous avons appliqué la régulation de la température sur la géométrie optimale obtenue précédemment avec la technique WIPSO.

Chapitre -IV : Régulation de la température

La figure(IV.10) : montre le schéma du contrôle de la température par hystérésis à bande fixe de la table de cuisson, il est bien claire que à chaque pas de temps, la température obtenue (T_m) au fond de la casserole est renvoyée pour être comparée à la température de consigne (T_c). La différence entre la température obtenue et la température de la consigne est appelée erreur de température (T_e). Cette dernière est comparée à la bande supérieure et à la bande inférieure du contrôleur d'hystérésis pour déterminer la séquence de commutation (dk).

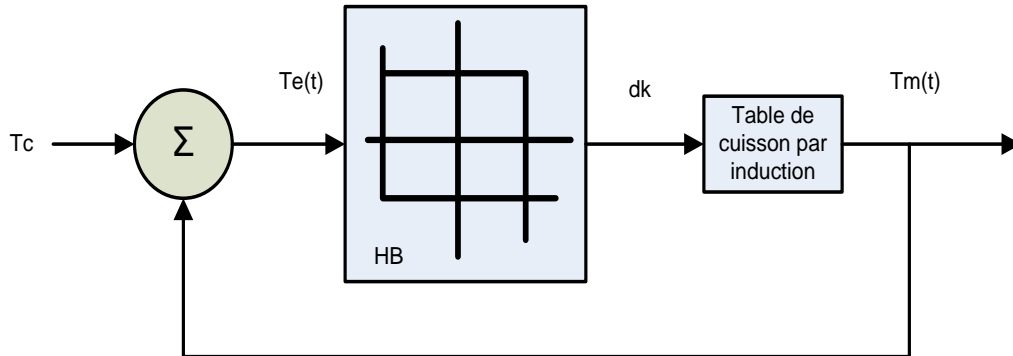


Figure IV.10: schéma du contrôle de la température par hystérésis à bande fixe de la table de cuisson

- dans le cas où la valeur de l'erreur de température atteint la valeur supérieure de la bande, le commutateur (dk) sera enclenché
- si la valeur de l'erreur de température atteint la valeur inférieure de la bande, le commutateur (dk) sera déclenché

Dans cet algorithme, la largeur de bande est maintenue constante pendant tout le processus de calcul de la température. L'algorithme pour cette technique est donné comme:

- Upper band $T_c(t) = T_m + HB$ if $T_c(t) - T_m(t) > HB$ then dk OFF
- Lower band $T_c(t) = T_m - HB$ if $T_c(t) - T_m(t) < -HB$ then dk ON

T_c : la température de référence

T_m : température obtenue

HB : est la largeur de bande

Chapitre -IV : Régulation de la température

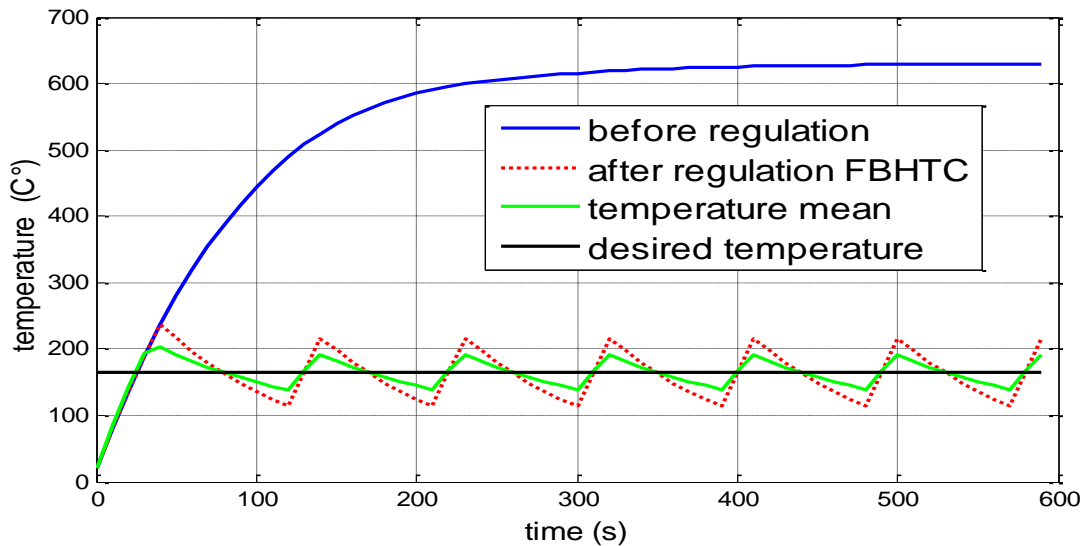


Figure IV.11 : Évolution de la température en fonction du temps après régulation

Les résultats de la régulation sont illustrés à la figure (IV.11), où nous voyons que l'utilisation du contrôle de l'hystérésis à bande fixe assure une bonne régulation et limite la variation de température dans la bande utilisée pour la cuisson, qui oscille entre 160 et 220 °C. .

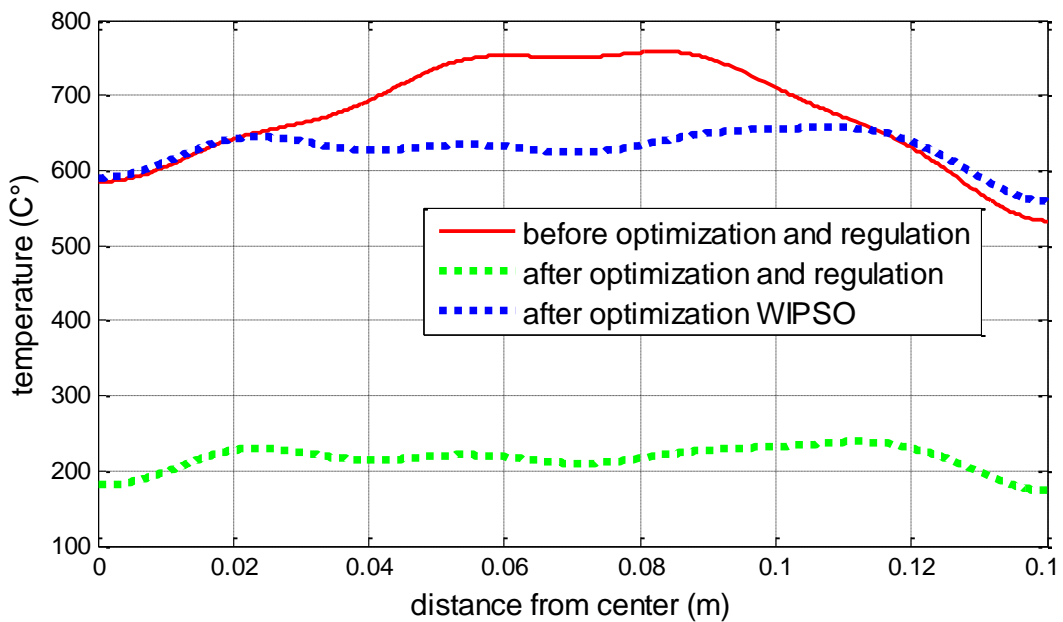


Figure IV.12 : Répartition de température après optimisation et régulation

La figure (IV.12) montre qu'après optimisation et régulation de la température, la température homogène souhaitée au fond de la casserole correspond à la plage de température de cuisson.

Chapitre -IV : Régulation de la température

IV.6. Conclusion

Une technique de régulation a été adoptée pour les travaux utilisant le contrôle de température d'hystérésis à bande fixe afin de déterminer la température adaptée au système de cuisson par induction. La principale caractéristique de cette méthode FBHC est la simplicité de mise en œuvre et sa robustesse. Cette étude montre que la technique proposée (FBHTC) donne une bonne régulation de la température qui se situe dans la plage de cuisson, c'est-à-dire entre 150 et 220 C.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal visé dans ce travail de thèse est de mettre en œuvre un système de cuisson par induction, donnant respectivement une répartition homogène de la température dans le fond de la charge (récipient) puis une température contrôlée convenable à la température cuisson recherchée (180-220°C). Pour cela nous avons appliqué un couplage magnétothermique pour la détermination de la répartition de la température le long de la charge puis une méthode d'optimisation par essaim de particule a été utilisée et enfin une régulation de la température par la méthode d'hystérésis a bande fixe a été appliquée.

Nous avons commencé par un aperçu général sur les tables de cuisson, un état de l'art, ainsi la modélisation numérique par la méthode des éléments finis de la table de cuisson par induction en 2D axisymétriques. Nous avons porté un intérêt pour l'étude de la détermination de la distribution de la température dans le fond de la charge, tout en tenant compte de la non-linéarité du matériau. Dans cette étude, nous avons appliqué le couplage de la formulation électromagnétique et thermique (magnétothermique). Les résultats obtenus montrent que la répartition de la température dans le fond du récipient n'est plus uniforme (**Figure. II.18**).

Par ailleurs et pour améliorer les performances du système étudié, nous avons appliqué la méthode d'optimisation par essaim de particule avec ses trois variantes à savoir (PSO, WIPSO, PSO-CFIWA) afin d'avoir un inducteur optimal donnant une meilleur répartition de la température. Les résultats de la simulation ont donné une bonne répartition de la température dans le fond du récipient par rapport à la température obtenue sans optimisation **Figure. III.17**. Dans la suite de cette étude, nous avons considéré la solution obtenue par la méthode PSO-CFIWA qui reste comme la plus fiable en terme minimisation de la fonction objectif. La nouvelle structure de l'inducteur obtenue empêche la concentration de la température au centre du récipient. Les nouvelles dimensions des distances sont données par **Tableau. III.3** :

Pour la régulation de la température, une méthode d'hystérésis a bande fixé a été appliquée. Dans un premier temps, Nous avons présenté la méthodologie et le principe de fonctionnement de ce type de régulateur. En second lieu, nous avons procédé à une application du régulateur à hystérésis à notre dispositif étudié. D'après la simulation nous avons constaté que cette

technique nous a permis de bien contrôler l'évolution de la température et de la maintenir dans une plage adaptable pour la cuisson **Figure. IV.11**

Comme perspective dans le futur, il serait intéressant :

- D'avoir un inducteur qui s'adapte automatiquement avec les dimensions de la charge ;
- De faire une réalisation d'un prototype de système de cuisson par induction tenant compte des résultats obtenus par la recherche.

Références

- [1] J. Essadaoui, "Commande d'un onduleur de puissance destiné au chauffage par induction par la modulation de densité d'impulsion avec amélioration du facteur de puissance," Université du Québec à Trois-Rivières, 2003.
- [2] P. HOURIEZ, "Les applications innovantes de l'induction dans l'industrie," *Les Cahiers de l'ingénierie*, pp. 14-18, 1992.
- [3] O. LONGEOT, "Analyse des phénomènes électriques magnétiques, thermiques et métallurgiques lors de la trempe superficielle en chauffage par induction. Mesure et contrôle de la puissance active injectée à la pièce en temps réel," 1985.
- [4] S. Wanser, "Simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle," 1995.
- [5] J.-P. GAUCHÉ, "Fours à induction à creuset pour la fusion des métaux ferreux et non ferreux," 2014.
- [6] A. M. Souley Madougou, "Contribution à l'étude et à la commande d'un système de chauffage par induction polyphasé," 2011.
- [7] B. Paya, "Optimisation des installations de chauffage de billettes par induction électromagnétique dans l'industrie de la forge afin d'améliorer son efficacité énergétique," Université Grenoble Alpes, 2017.
- [8] V. Labbé, "Modélisation numérique du chauffage par induction: approche éléments finis et calcul parallèle," 2002.
- [9] J. Callebaut, "Laborelec, «Chauffage par induction»,," *Leonardo ENERGY. Guide Power Quality*, 2007.
- [10] J. Egalon, "Commande d'une alimentation multi-bobines à caractère robuste pour chauffage par induction industriel," École Doctorale Génie Électrique, Électronique et Télécommunications: du ..., 2013.
- [11] G. Martín Segura, "Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating," 2012.
- [12] A. Senhaji, "Simulation numérique de la chauffe par induction électromagnétique d'un disque en AISI 4340," École de technologie supérieure, 2017.
- [13] D. Cardinaux, "Étude et modélisation numérique 3D par éléments finis d'un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction: Application à un renfort de pied central automobile," 2008.
- [14] M. Boudjemaâ, "SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT ES SCIENCES Spécialité: Électrotechnique-Calcul du Champ Option: ELECTROTHERMIE," University of sciences and technology in Oran, 2015.
- [15] G. Meunier, *The finite element method for electromagnetic modeling* vol. 33: John Wiley & Sons, 2010.
- [16] W. Han, K. Chau, C. Jiang, and T. Ching, "Comparison of Induction Heating for Pans and Woks Using Planar Cooktops," in *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2018, pp. 358-365.
- [17] J. Acero, J. Burdio, L. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J. Garcia, F. Monterde, P. Hernandez, S. Llorente, and I. Garde, "The domestic induction heating appliance: An overview of recent research," in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 651-657.
- [18] E. Laloya, O. Lucia, J. Concha, and J. M. Burdio, "Experimental evaluation of dynamic load changes in flexible induction heating appliances," in *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014, pp. 3227-3232.
- [19] F. Sanz, C. Franco, C. Sagues, D. Paesa, and S. Llorente, "Flexible cooking zone with 2D mobile inductors in induction hobs," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 3262-3267.
- [20] H. Tomita, A. Nomoto, A. Ando, D. Miyamura, and R. Takasaka, "Practical applications of small induction heater," in *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 2016, pp. 044-049.
- [21] T. Waeckerle, "Etude magnétothermique d'un alliage à bas point de Curie en cuisson par induction," 2016.
- [22] I. Cooking, "AND9166/D," 2014.
- [23] C. Cyr, "Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques," 2007.
- [24] G. Couderchon, *Alliages magnétiques doux*: Ed. Techniques Ingénieur, 1998.
- [25] A. MANSRI, "Processus d'aimantation dans les matériaux doux à base de fer- Représentation des Pertes en régime dynamique," BADJI MOKHTAR UNIVERSITY, 1945.
- [26] S. Marc, "Étude expérimentale et numérique d'un procédé de cuisson par contact direct," 2017.

- [27] B. Delhomme, "Innovation dans l'électroménager: la table à induction," *REVUE GENERALE DE L'ELECTRICITE*, pp. 28-28, 1994.
- [28] A. Kanssab, F. Allaoui, Tahar Abbès, A. Slimane and A. Cherid "Modelling and Optimization By Tabu Search Method of an Inductor dimensions for Domestic Induction Heating Devices" The Ninth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED&'9). July, 5-8, 2015-Sofia, Bulgaria.
- [29] S. Clain, "Analyse mathématique et numérique d'un modèle de chauffage par induction," Verlag nicht ermittelbar, 1994.
- [30] Y. Liu, C. Li, Y. Shi, P. Yi, J. Xie, G. Sun, X. Zhan, X. Ma, and L. Cui, "Simulation on the High Frequency Induction Cladding and Experimental Validation," *JOURNAL OF INFORMATION & COMPUTATIONAL SCIENCE*, vol. 12, pp. 641-656.
- [31] V. Rudnev, D. Loveless, and R. L. Cook, *Handbook of induction heating*: CRC press, 2017.
- [32] Q. Hu, W. Chen, T. Huang, and Q. Chen, "The analysis of near-field magnetic leakage on the domestic induction cooker," in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, 2014, pp. 605-608.
- [33] M. Christophe, "LES EFFETS D'EXTREMITÉ EN CHAUFFAGE PAR INDUCTION," ECOLE CENTRALE DE LYON, 1984.
- [34] M. Kranjc, A. Zupanic, D. Miklavcic, and T. Jarm, "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 3585-3591, 2010.
- [35] G. Chagnon, "Cours de Génie Electrique," *Licence Professionnelle de Génie Industriel. Université Paris VI-Jussieu, CFA Mecaveni*, vol. 2002, 2001.
- [36] F. Allaoui, A. Abdelkader-Mekki, A. Kanssab, "Optimization by Differential Algorithm of an Inductor dimensions for Induction cooking and comparison with Network Method". 5^{ème} Colloque National sur l'inductique (CNI'5) 13-14 Décembre 2017-U.S.T.Oran.
- [37] B. Helifa, "Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes," Nantes, 2012.
- [38] G. Wasselynck, "Etude des interactions entre les ondes électromagnétiques de fréquences moyennes et les matériaux composites: application à l'assemblage par induction de ces matériaux," Nantes, 2011.
- [39] A. KANSSAB, M. FELIACHI, and A. ZAOUI, "MODELLING AND TEMPERATURE REGULATION, USING A NEW MATERIAL FeNiCr ALLOY, IN INDUCTION COOKING DEVICE."
- [40] A. Cheriet, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques," 2007.
- [41] Z. Oudni, H. Mohellebi, and M. Féliachi, "Effect of Aluminum Layer on Induction Heating Control Case Study Using Finite Elements Method."
- [42] M. Chari, A. Konrad, M. Palmo, and J. D'angelo, "Three-dimensional vector potential analysis for machine field problems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 18, pp. 436-446, 1982.
- [43] S. Salon and M. Chari, *Numerical methods in electromagnetism*: Elsevier, 1999.
- [44] F. L. S. Garcia, "MODELISATION DES COMPOSANTS ELECTROMAGNETIQUES HAUTE FREQUENCE PAR LA METHODE DE SELEMENTS FINIS," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1999.
- [45] R. Pascal, "Modélisation du traitement thermique superficiel par induction," Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2003.
- [46] F. Sanz-Serrano, C. Sagues, A. H. Feyissa, J. Adler-Nissen, and S. Llorente, "Modeling of pancake frying with non-uniform heating source applied to domestic cookers," *Journal of Food Engineering*, vol. 195, pp. 114-127, 2017.
- [47] S. Bensaid, "Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes," 2006.
- [48] F. Sanz-Serrano, C. Sagues, and S. Llorente, "Heating Uniformity Evaluation in Domestic Cooking Using Inverse Modelling," in *International Conference on Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management*, 2016, pp. 195-204.
- [49] M. Ocilka and D. KOVÁČ, "Simulation model of induction heating in Comsol multiphysics," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 15, pp. 29-33, 2015.
- [50] A. Kanssab, "Modélisation et Optimisation par algorithmes génétiques de nouveau système de cuisson par induction," Thèse de doctora, Université d'Oran, 2009.
- [51] M. SOUKIEH, "Mathematical Modeling of a Steel Sample Heated by Electromagnetic Induction Method," *Acta Electrotechnica*, vol. 54, 2013.
- [52] B. Patidar, M. Hussain, S. Das, D. Mukherjee, and A. Tiwari, "Simulation and Experimental Validation of Induction Heating of MS Tube for Elevated Temperature NDT Application," in *Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference*, 2015, pp. 1-6.

- [53] J. Castillo, J. Martínez-Gómez, S. Villacis, and A. Riofrio, "Thermal Natural Convection Analysis of Olive Oil in Different Cookware Materials for Induction Stoves," *International Journal of Food Engineering*, vol. 13, 2017.
- [54] J.-k. Byun, K. Choi, H.-S. Roh, and S.-y. Hahn, "Optimal design procedure for a practical induction heating cooker," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 1390-1393, 2000.
- [55] N. Burais, S. Pertoldi, and J. Gaspard, "'Couplage de modèles pour la conception d'inducteur de cuisson par induction'", NUMELEC'97, Ecole Centrale de Lyon," *Mars*, 1997.
- [56] A. Kanssab, A. Zaoui, and M. Feliachi, "Modeling and optimization of induction cooking by the use of magneto-thermal finite element analysis and genetic algorithms," *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 7, pp. 312-317, 2012.
- [57] F. Allaoui, A. Kanssab, M. Matallah, A. Zoui, and M. Feliachi, "Modelling and Optimization of Induction Cooking by the use of Magneto-thermal Finite Element Analysis and Neural Network," in *Materials Science Forum*, 2014, pp. 251-259.
- [58] w. e.-p. c. Electrolux Food service équipement, Certified management ISO 9001. (,2001).www.electrolux-professional.com.
- [59] G. DEVELEY, "Chauffage par induction électromagnétique: principes," *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. 12, pp. D5935. 1-D5935. 22, 2000.
- [60] N. Haiqing, Y. Jia, and Y. Kaifa, "Calculation of transient cable conductor temperature based on support vector machine optimized by particle swarm optimization algorithm," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, pp. 1-5.
- [61] A. Tandon and D. Saxena, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using selective particle swarm optimization algorithm," in *2014 International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPES)*, 2014, pp. 1-6.
- [62] H. S. Al-Olimat, I. Green, C. Robert, M. Alam, V. Devabhaktuni, and W. Cheng, "Particle swarm optimized power consumption of trilateration," *arXiv preprint arXiv:1602.02473*, 2016.
- [63] J. Vis, "Particle Swarm Optimizer for Finding Robust Optima," *LIACS, Holland*, 2009.
- [64] A. Alfi, "Particle swarm optimization algorithm with dynamic inertia weight for online parameter identification applied to Lorenz chaotic system," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 8, pp. 1191-1203, 2012.
- [65] K. MERINI, "Contribution à l'amélioration des méthodes évolutionnaires pour la répartition optimale des puissances: application dans un réseau d'énergie électrique avec et sans FACTS," 2017.
- [66] X. Chen, H.-l. Hu, F. Liu, and X. X. Gao, "Image reconstruction for an electrical capacitance tomography system based on a least-squares support vector machine and a self-adaptive particle swarm optimization algorithm," *Measurement Science and Technology*, vol. 22, p. 104008, 2011.
- [67] A. Ghoumari, "Métaheuristiques adaptatives d'optimisation continue basées sur des méthodes d'apprentissage," Université Paris-Est, 2018.
- [68] I. Boussaid, "Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue," Paris Est, 2013.
- [69] M. M. Rafik, "Conception de métaheuristique d'optimisation pour la compression d'image."
- [70] R. Serra and J. Olivier, "Apport de l'optimisation par essais particuliers pour la détection de modifications structurelles à partir des propriétés dynamiques," in *Congrès français de mécanique*, 2017.
- [71] N. Smairi, "Optimisation par essaim particulier: adaptation de tribes à l'optimisation multiobjectif," Paris Est, 2013.
- [72] R. BELLOUMI, "Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe," Université de Batna 2, 2015.
- [73] A. N. Benaichouche, "Conception de métaheuristiques d'optimisation pour la segmentation d'images: application aux images IRM du cerveau et aux images de tomographie par émission de positons," 2014.
- [74] M. Zemzami, N. Elhami, A. Makhloufi, M. Itmi, and N. Hmina, "Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité," 2016.
- [75] S. Linda, "'contribution a l'application de l'optimisation par des méthodes metaheuristiques a l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé.'", thèse de magister l'université de Batna Alger, 2009.
- [76] A. Toumi, A. Taleb-Ahmed, K. Benmahammed, and N. Rechid, "Optimisation par Essaim de Particules: application à la restauration supervisée d'image," ed: LIRISCNRS, 2005.
- [77] K. Belkadi, S. Hernane, and M. Benyettou, "Application d'un modèle parallèle distribué de la PSO à un problème d'ordonnancement de type FSH."
- [78] C. Song, H. Zhao, W. Jing, and H. Zhu, "PSO based motion deblurring for single image," in *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2011, pp. 85-92.
- [79] S. Chettih, M. Khiat, and A. Chaker, "Var/voltage control by particle swarm optimization method: application in the western Algerian transmission system," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 3, pp. 333-345, 2008.

- [80] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 12, pp. 171-195, 2008.
- [81] A. A. MEKKI, A. KANSAB, M. MATALLAH, and M. FELIACHI, "Fixed-band hysteresistemperature control of induction cooking system." *Przegląd Elektrotechniczny journal*, vol. 9, p. 83, 2019.
- [82] A. F. Ali and M. A. Tawhid, "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm with population partitioning for large scale optimization problems," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, pp. 191-206, 2017.
- [83] G. Calas, "Optimisation par essaim de particules," *Une*, vol. 3, p. 3, 2008.
- [84] Y. Cooren, "Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire: application en génie médical et en électronique," 2008.
- [85] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, 1998, pp. 69-73.
- [86] L. Gacôgne, "Comparaison entre PSO et autre heuristiques d'optimisation avec opérateurs implicites," *Séminaire Optimisation par Essaim Particulaire*, pp. 1-12, 2003.
- [87] K. Kavitha and R. Neela, "Comparison of BBO, WIPSO & PSO techniques for the optimal placement of FACTS devices to enhance system security," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 824-837, 2016.
- [88] S. Mandal, S. Ghshal, R. Kar, D. Mandal, and A. Shivare, "Swarm intelligence based optimal linear fir high pass filter design using particle swarm optimization with constriction factor and inertia weight approach," in *2011 IEEE Student Conference on Research and Development*, 2011, pp. 352-357.
- [89] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- [90] A. El Dor, "Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire: applications en segmentation d'images et en électronique," 2012.
- [91] T. Waeckerlé, H. Fraissé, B. Boulogne, and S. L. Spire, "New alloys and multilayer configuration of them to get self-regulated temperature cookware (SRTC) in induction heating," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, pp. e844-e846, 2006.
- [92] Z. Dong, Y. Li, S. Zhang, and F. Shang, "Fuzzy temperature control of induction cooker," in *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 3051-3056.
- [93] E. Nechadi, "Commande et stabilité d'un système électro-énergétique," 2018.
- [94] C. Fillion, *Développement d'un système de contrôle pour un four virtuel par automate programmable*: Université du Québec à Chicoutimi, 2002.
- [95] F. Richieri, *Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères*: PhDThesis, ENTPE/DGCB/LASH, 2008.
- [96] S. GOURARI, "LA REGULATION INDUSTRIELLE DES ECHANGEURS DE CHALEUR CALCUL ET DIMENSIONNEMENT."
- [97] Y. El Afou, "Contribution au contrôle des paramètres climatiques sous serre," Lille 1, 2014.
- [98] B. Hicheam and B. Dalila, "Automatisation et supervision d'une station de préparation de la matière par l'automate S7-1500," Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [99] A. Rachid and B. Said, "Etude et Développement d'une Plate Forme de Commande (TOR, PID et Floue) de la Station de Pression Sous Environnement LabVIEW," Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [100] Y. Granjon, *Automatique: systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps*, 2001.
- [101] M. A. S. Nejad, "Architectures d'alimentation et de commande d'actionneurs tolérants aux défauts: régulateur de courant non linéaire à large bande passante," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
- [102] F. Mekri, J.-F. Charpentier, X. Kestelyn, and E. Semail, "Étude comparative de différents correcteurs pour la commande optimale avec défauts d'une machine pentaphasée," 2012.
- [103] A. Kessal, "Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC," 2018.
- [104] A. Benzaioua, "Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée," Université du Québec à Chicoutimi, 2014.
- [105] N. BELHAOUCHET, "Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application: Amélioration de la qualité de l'Energie," 2014.
- [106] Y. BENGUEDOUAR, "Algorithme d'optimisation par essaim de particules (OEP) Application à l'amélioration des moteurs El-Azazga, Algérie," Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2012

- [107] S. Arif, J. Dubeau, A. Hellal, and A. Choucha, "Optimisation par essaim de particules appliquée à l'écoulement optimal de puissance réactive," *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 10, pp. 6-2007, 2007.
- [108] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite elements for electrical engineers*: Cambridge university press, 1996.
- [109] N. Ida and J. P. Bastos, *Electromagnetics and calculation of fields*: Springer Science & Business Media, 2013.
- [110] M. Sweeney, J. Dols, B. Fortenbery, and F. Sharp, "Induction cooking technology design and assessment," *Small*, vol. 5, p. 800, 2014.