

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études

De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

Amar Mellal

Nabil Sahnoune

Thème :

Dimensionnement d'un four à induction destiné au soudage des couronnes du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Mémoire soutenu publiquement le 29/06/ 2024 devant le jury composé de :

Mr.Chafik BIROUCHE

MAA

UMMTO

Président

Mr. Arezki DICHE

MAA

UMMTO

Examineur

Mme.MOHELLEBI Epse OUDNI Zehor

MCA

UMMTO

Encadreur

Remerciements

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Madame OUDNI-MOHELLEBI Zehor, Maitre de conférences Classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa confiance en nous sur ce sujet de recherche. Nous sommes profondément reconnaissants qu'elle ait acceptée de superviser notre travail, nous soutenant tout au long de la rédaction de ce mémoire et mettant à notre disposition une précieuse documentation. Son expertise scientifique, ses qualités humaines exceptionnelles, ainsi que sa capacité à guider nos recherches de manière très professionnelle ont été d'une grande aide pour nous. Sa disponibilité pour répondre à nos questions et ses conseils éclairés ont été une source constante d'orientation et d'apprentissage. Nous la remercions sincèrement pour tout.

Nous souhaitons témoigner notre reconnaissance envers tous les membres du jury qui ont généreusement accepté d'évaluer notre travail. Leurs contributions au jury est une marque d'honneur qui nous touche profondément.

Nous n'oublions pas de remercier bien évidemment nos parents pour leurs encouragements tout au long de notre travail qui ont été une source d'inspiration et de motivation très important pour nous.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de notre travail. Leur soutien a été précieux et a grandement contribué à notre réussite.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère Mère et mon cher père pour tout leur soutien et leurs encouragements précieux
durant toutes mes années d'études.

A mon frère et mes sœurs : Idir, Tidya, Thinhinane.

A mes amis en particulier : Nabil, Saadi, Massi, Achour, Karim, Moumouh.

A celle qui est chère pour moi : thinhinane.

A toute la promo 2023/2024.

AMAR

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère Mère et mon cher père pour tout leur soutien et leurs encouragements précieux
durant toutes mes années d'études.

A mes amis en particulier : Amar, Saadi, 3emi Mohand, Zohir, Rayane.

A toute la promo 2023/2024.

NABIL

Sommaire :

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I.....	1
Etat de l'art sur le chauffage à induction et soudage des couronnes des moteurs asynchrones .	1
I Introduction.....	4
II Chauffage à induction	4
1) Définition [2].....	4
2) Fonctionnement du chauffage à induction [6].....	4
3) Principes physique du chauffage par induction.....	5
a) La résistance électrique.....	6
b) La perméabilité magnétique	6
4) Comment fonctionne une bobine d'induction [6]	6
5) Principes et spécificités [1].....	7
a) Fréquence.....	8
b) Puissance	8
6) Les types de chauffage par induction [1]	8
a) Chauffage pénétrant.....	8
b) Chauffage superficiel.....	8
c) Chauffage pelliculaire.....	8
7) Méthode de chauffage par induction [6]	9
8) Paramètres à prendre en compte [5].....	10
9) Application du chauffage à induction	11
a) Industrie :.....	11
b) Cuisine :.....	11
c) Chauffage domestique :	11
10) Application industrielles [6]	11
a) Réchauffage avant formage et forgeage :	11
b) Traitement thermique superficiel :.....	12
c) Industrie chimique :	12
d) Brasage de Taillants:.....	12
e) Fixations:	Erreur ! Signet non défini.
f) Nanoparticules:.....	Erreur ! Signet non défini.

g)	Semi-conducteurs:	12
h)	Disques:	Erreur ! Signet non défini.
11)	Choix d'un système de chauffage à induction	12
a)	Application spécifique	12
b)	Puissance et Taille :	13
c)	Budget :	13
d)	Caractéristiques Supplémentaires :	13
12)	Avantages du chauffage à induction [3]	13
a)	Confort.....	13
a)	Sécurité et propreté.....	13
b)	Rentabilité.....	13
13)	Inconvénients du chauffage à induction	13
a)	Coûts élevés :	13
b)	Risques de mauvaises manipulations :	13
c)	Champs électromagnétiques :	13
d)	Limitation et considération :	14
14)	Les différents types de fours à induction [4]	14
a)	Fours à induction sans noyau :	14
b)	Fours à induction à canal :	14
c)	Fours à creuset :	14
d)	Fours à arc électrique :	15
III	Le soudage des couronnes des moteurs asynchrones	16
1)	Le processus du soudage des couronnes [10].....	16
a)	Objectif :	16
b)	Technique de soudage :	16
c)	Modélisation et simulation :	16
d)	Composants impliqués :	16
e)	Applications :	16
2)	Les différents types de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [10]	16
a)	Le soudage à l'arc :	16
b)	Le soudage plasma :	16
c)	Le soudage au chalumeau :	17
3)	Le choix de la méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [10]	17
a)	Nature du soudage :	17
b)	Isolation thermique :	17

c) Matériaux et construction :.....	17
4) Risques liés à une mauvaise méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [11].....	17
Une mauvaise méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones peut entraîner plusieurs risques, notamment :	17
a) Défaillance mécanique :	17
b) Perte d'efficacité :.....	17
c) Risque de sécurité :.....	17
5) Avantages du soudage des couronnes des moteurs asynchrones [12].....	18
IV Conclusion :.....	18
CHAPITRE II.....	4
Présentation du four à induction d'électro-Industries	4
I Description de l'installation à moyenne fréquence.....	20
1) Unité de soudage	20
2) Table pour montage des barres.....	20
3) Cuve d'étain	21
4) Convertisseur moyenne fréquence	22
5) Armoires électriques.....	22
6) Installation d'aspiration.....	24
7) Pyroscope	25
8) Ventilateur	26
9) Distribution d'eau de refroidissement	27
10) Inducteur à moyenne fréquence.....	27
11) Vérin pneumatique	28
II Instruction de montage [9].....	28
III Instruction de mise en service [9].....	28
IV Besoin en eau fraîche et de refroidissement [9].....	29
V Indications relatives à l'alimentation en énergie (courant électrique, air comprimé) [9].	29
VI Carte de machine [9].....	30
VII Carte d'entretien pour la machine [9].....	30
VIII Dispositif de Protection Thermique[9].....	31
1) Protection directe.....	31
2) Protection indirecte	31
3) Fonctionnement du dispositif de protection	31
IX Le fonctionnement du four à induction	32
1) Etat des rotors à livraison	32

2) Préparation pour le soudage de la première couronne de court-circuitage	32
3) Brasage	32
4) Fin des opérations.....	33
X Indication des appareils de mesures au moment de brasage	34
CHAPITRE III	36
Modélisation numérique pour la résolution des équations aux dérivées partielles	36
I Introduction [14]	36
II Méthodes numériques : [14]	36
2) Méthode d'intégrale de frontières	37
3) Méthodes des éléments finis	37
III Les méthodes mixtes [14]	37
1) Eléments finis / éléments frontières	37
2) Eléments finis / Equations intégrales	38
IV Présentation du logiciel pdetool [14].....	38
V Les étapes de la simulation sous pdetool [14].....	39
1) Dimensionnement de l'espace de travail.....	39
2) Dessin du domaine	40
3) Dessin de la structure	41
4) Spécification des dimensions	41
5) Génération du maillage	42
6) Spécification des paramètres des équations	42
7) La résolution de PDE	43
VI Conclusion [14].....	44
CHAPITRE IV	36
Détermination des températures et du temps de soudures des couronnes du moteur asynchrone	36
I Introduction [14]	46
II Description de la géométrie à étudier [14].....	46
III Les caractéristiques électromagnétique et thermique [14]	47
1) Equations de l'inducteur.....	47
2) Equations de l'induit	47
3) Equations de l'air	47
IV Introduction de la géométrie.....	48
V Spécification des paramètres des équations	48
VI Affectations des paramètres dans les différents milieux [14]	49

VII	Le maillage du domaine d'étude	50
VIII	Conclusion.....	65
	Conclusion Générale	66

Liste des figures

Chapitre I

Figure I 1 : schéma de principe du procédé de chauffage par induction [6]	5
Figure I 2 : Fonctionnement d'une bobine d'induction [6]	7
Figure I 3 Système type de chauffage par induction [5]	7
Figure I 4: Schéma d'un four a creuset [6].....	15
Figure I 5: schéma d'un four a arc électrique [7]	15

Chapitre II

Figure II 1 : Poste de brasage I et II	20
figure II 2: Table pour montage des barres.....	21
figure II 3: Cuve d'étain	21
figure II 4: convertisseur monobloc	22
figure II 5: Tableau de signalisation avec lampes	24
figure II 6: Les appareils installés sur le panneau frontal de l'armoire électrique	24
figure II 7: La hotte d'aspiration	25
figure II 8: Le pyroscope	26
figure II 9: Le ventilateur radial	26
figure II 10: Inducteur en cuivre	27
figure II 11: Carte de machine / Installation de brasage moyenne fréquence	30
figure II 12: Carte d'entretien de la machine	30

Chapitre III

Figure III 1: Interface d'accueil pdetool.....	39
Figure III 2: Les valeurs d'axes.....	40
Figure III 3: :Exemple d'affichage (Boundary mode).....	40
Figure III 4: : Boite de dialogue (SpecifyBoundary conditions).....	41
Figure III 5: Exemple d'une structure	41
Figure III 6: Boite de dialogue pour les dimensions et de la position d'un bloc.	42
Figure III 7: Génération d'un maillage	42
Figure III 8: Boite de dialogue PDE mode.....	43
Figure III 9: Boite de dialogue plot sélection.....	44

Chapitre IV

Figure IV 1: Représentation du modèle (inducteur – couronne).....	46
Figure IV 2: Modèle d'étude	48
Figure IV 3: spécification des paramètres des équations PDE.....	49
Figure IV 4: Maillage du domaine d'étude	51

Figure IV 5: Répartition du potentiel vecteur magnétique A	52
Figure IV 6: Température pour $\mu_r=1$	52
Figure IV 7: Température pour $\mu_r= 200$	53
Figure IV 8: Température pour $\mu_r= 1000$	53
Figure IV 9: Température pour $\mu_r= 1$	54
Figure IV 10: Température pour $\mu_r= 200$	55
Figure IV 11: Température pour $\mu_r= 1000$	55
Figure IV 12: Température pour $\mu_r= 1$	56
Figure IV 13: Température pour $\mu_r= 200$	57
Figure IV 14: Température pour $\mu_r= 1000$	57
Figure IV 15: Température à 200Hz pour $\mu_r=1$	58
Figure IV 16: Température à 200 Hz pour $\mu_r=1500$	58
Figure IV 17: Répartition du potentiel vecteur magnétique A	59
Figure IV 18: Température du cuivre à 500 Hz	59
Figure IV 19: Température du cuivre à 850 Hz	60
Figure IV 20: Température du cuivre à 1000 Hz	61
Figure IV 21: Répartition du potentiel vecteur magnétique A	61
Figure IV 22: Température de l'aluminium à 850 Hz	62
Figure IV 23: Température de l'aluminium à 1000 Hz	62
Figure IV 24: Température de l'aluminium à 1100 Hz	63
Figure IV 25: Variation de la température en fonction du temps.	64

Liste des tableaux

Tableau IV 1: Les caractéristiques électromagnétique et thermique47
Tableau IV 2: Affectations des paramètres dans les différents milieux50
Tableau IV 3: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μ_r51
Tableau IV 4: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μ_r53
Tableau IV 5: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μ_r55
Tableau IV 6: Valeurs de température du cuivre et de l'aluminium en fonction du temps ...	62

Introduction Générale

Le phénomène d'induction magnétique fut découvert par le physicien anglais Michael Faraday en 1831. C'est dans les années 1900 que l'on commence à utiliser l'induction comme procédé de chauffage de pièces en métal, mais il est très limité à cause des faibles puissances disponibles. En 1922, l'événement des générateurs dynamiques le rend plus efficace et des études sur le chauffage par induction montrent que l'on peut chauffer différentes parties d'une pièce 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 relative. C'est grâce à ces découvertes que le traitement superficiel par induction a commencé plus tard dans les années 1960.

Avec l'arrivée de la crise pétrolière en 1973, les pays occidentaux ont voulu diminuer les énergies fossiles classiques pour développer l'énergie nucléaire qui a donné un nouvel envol pour le chauffage par induction.

La conversion d'énergie est souvent accompagnée par des pertes, donc d'un transfert d'énergie mais sous une autre forme, il est donc nécessaire d'explorer toute sorte de sources d'énergie afin de l'exploiter.

La recherche scientifique a fait des progrès dans la conception de dispositifs capable de produire de l'énergie destinée à la consommation, autrement dit satisfaire les exigences industrielles pour améliorer la qualité de vie.

La conversion d'énergie électrique en énergie thermique sous forme de chaleur est à l'origine d'une judicieuse idée de conception d'un dispositif type, le principe du concept se base sur le fait que si on soumet une masse conductrice à un champ d'induction magnétique variable qui est souvent crée par un inducteur alimenté en alternatif, il y a apparition de courants induit dans cette masse appelée courants de Foucault, il en résulte une dissipation d'énergie par effet Joule sous forme de chaleur, d'où le nom du procédé : « chauffage par induction électromagnétique ».

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, il nous a été confié le dimensionnement d'un four à induction destiné au soudage des couronnes du moteur asynchrone à cage d'écureuil dans l'entreprise Electro-Industries.

Pour cela, nous avons répartie notre travail en quatre chapitres :

- Le premier est consacré à l'état de l'art sur le chauffage à induction et le soudage des couronnes des moteurs asynchrones.
- Le deuxième c'est la présentation du four à induction d'Electro-Industries : constitution, fonctionnement et performances.
- Le troisième est réservé à la modélisation numérique pour la résolution des équations aux dérivées partielles et à la résolution du problème magnétothermique (couplage magnétique et thermique).
- Quant au dernier chapitre, c'est la détermination des températures et du temps de soudures des couronnes du moteur asynchrone.

CHAPITRE I

**Etat de l'art sur le chauffage à induction et soudage des couronnes des
moteurs asynchrones**

I Introduction

Dans l'industrie, les fours à induction sont des équipements utilisés pour chauffer les matériaux conducteurs électriques en exploitant le phénomène d'induction électromagnétique. Ils offrent des avantages tels qu'une chauffe rapide, un contrôle précis de la température, une efficacité énergétique élevée et une production uniforme de chaleur. Ces fours sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, notamment la métallurgie, la fonderie, le traitement thermique et la fabrication de semi-conducteurs pour leur capacité à fournir des processus de chauffage rapides et efficaces.

II Chauffage à induction

1) Définition [2]

Le chauffage à induction est un procédé qui consiste à plonger un matériau conducteur d'électricité dans un champ magnétique variable, ayant ainsi pour effet la création de FEM donc de courants de Foucault dont la circulation élève la température du matériau par effet Joule.

2) Fonctionnement du chauffage à induction [6]

Le procédé de chauffage par induction résulte de la combinaison de différents phénomènes physiques (voir figure 1) :

- création d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'un bobinage appelé inducteur et parcouru par un courant à la fréquence souhaitée. L'inducteur peut prendre différentes formes adaptées à la géométrie de la pièce à chauffer ;
- Création d'un courant au sein de la pièce par induction électromagnétique. Ce phénomène se produit lorsqu'un élément conducteur est plongé dans un champ magnétique variable ;
- Échauffement de la pièce dû au passage de ce courant induit.

Un équipement de chauffage par induction comprend généralement un ou plusieurs inducteurs avec parfois un concentrateur de champ, une alimentation électrique, un système de contrôle-commande et un système de refroidissement de l'inducteur et de l'alimentation électrique. Les configurations d'inducteurs, les

fréquences et les puissances électriques mises en œuvre sont très variées et dépendent de l'application du matériau (cuisson, fusion...), et de sa forme (billettes, lopins, cuves...).

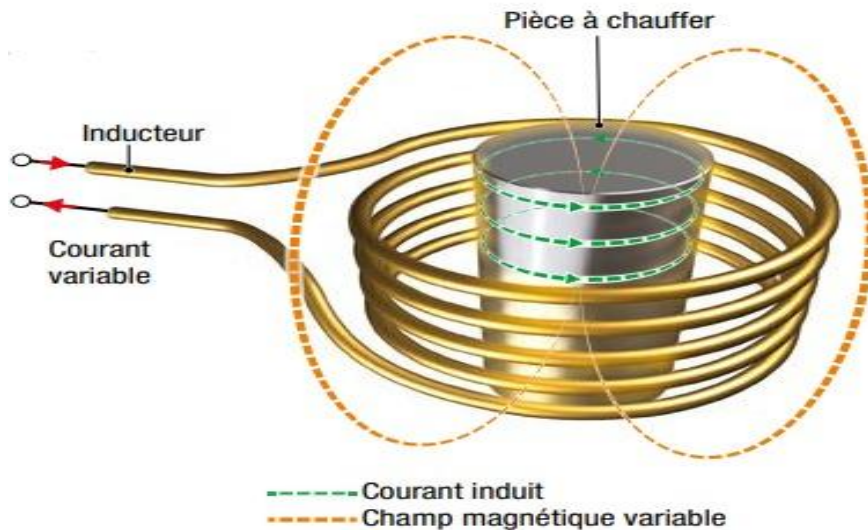


Figure I 1 : schéma de principe du procédé de chauffage par induction [6]

3) Principes physiques du chauffage par induction

La technique de chauffage par induction est une application très directe à la fois de la loi de l'induction – loi de Lenz – et de l'effet Joule : via un inducteur qui donne naissance à un champ magnétique variable. Ces variations créent (le flux d'induction magnétique instantané ϕ), une force électromotrice d'induction, donc des courants induits :

$$e = \frac{-d\phi}{dt} \quad (I.1)$$

A leur tour, ces courants induits appelés courants de Foucault, dissipent la chaleur par effet Joule dans la substance même où ils ont pris naissance. La puissance développée est de la forme :

$$P = RI^2 = \frac{E^2}{R} \quad (I.2)$$

Où la résistance R dépend de la résistivité du matériau et de la concentration des courants près de la surface sur une épaisseur δ (en mm) du fond du récipient.

Le champ magnétique crée pénètre plus ou moins profondément dans le matériau placé à proximité de l'inducteur selon la fréquence et les propriétés magnétique du matériau. D'après la loi de Lenz, les courants de Foucault dus aux variations du champ magnétique à l'intérieur de la pièce ont une direction et un sens qui s'opposent au courant dans l'inducteur. La zone du matériau parcouru par les courants de Foucault chauffe par effet Joule. La chauffe est dépend des propriétés électriques et les propriétés magnétiques du matériau, ainsi l'intensité du champ magnétique en jeu. Les zones adjacentes à celles chauffées par les courants sont chauffées par la conduction thermique selon les propriétés thermiques du matériau.

a) La résistance électrique

La résistance électrique (R) est la propriété liée à la fois à la résistivité électrique caractéristique et à la géométrie du matériau. Elle est directement proportionnelle à la résistivité électrique (ρ) et à la longueur du matériau (l), cependant elle est inversement proportionnelle à la section transversale (S).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (I.3)$$

b) La perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique d'un matériau caractérise sa faculté à se laisser traverser par un champ magnétique et à le modifier. Elle est définie comme :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (I.4)$$

4) Comment fonctionne une bobine d'induction [6]

La bobine d'induction sert à transférer l'énergie à la pièce par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique alternatif. Le courant alternatif circulant dans la bobine crée le champ électromagnétique, qui induit à son tour dans la pièce un courant symétrique en miroir de celui qui passe dans la bobine. La bobine, ou inducteur, est le composant du système de chauffage par induction qui détermine l'efficacité et le rendement du chauffage de la pièce. La complexité des bobines est très variable, d'un simple enroulement hélicoïdal qui veut dire qu'il a la forme d'une hélice, formé d'un certain nombre de spires de tube de cuivre enroulées sur un mandrin, aux bobines de précision usinées en cuivre massif et brasées.

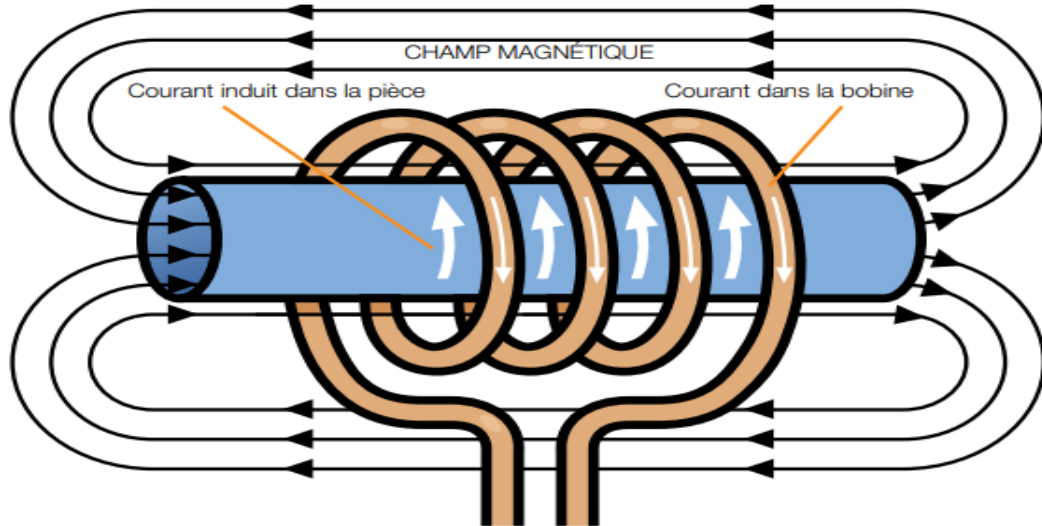


Figure I 2 : Fonctionnement d'une bobine d'induction [6]

5) Principes et spécificités [1]

Un système de chauffage par induction comprend une alimentation électrique, un circuit oscillant et une bobine d'induction. Dans les applications industrielles, le courant circulant dans la bobine est en général suffisamment intense pour nécessiter un refroidissement par eau. L'installation comprend donc habituellement un système de refroidissement par eau. L'alimentation convertit le courant alternatif du secteur en courant alternatif en résonance avec la combinaison de la capacitance de la tête, de l'inductance de la bobine et de la résistance de la pièce.

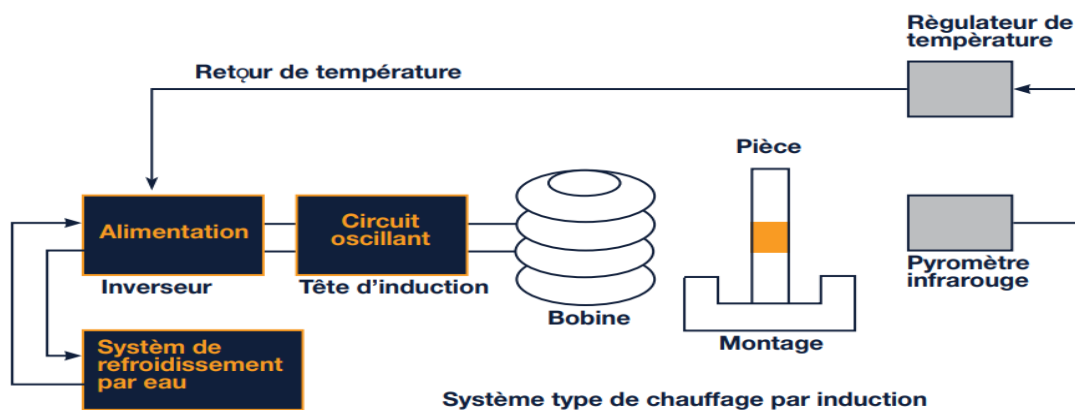


Figure I 3 Système type de chauffage par induction [5]

Quelques ordres de grandeur sur le chauffage par induction permettent de mieux cerner ses spécificités :

CHAPITRE I Etat de l'art sur le chauffage à induction et soudage des couronnes des moteurs asynchrones

a) Fréquence

Il est habituel de distinguer les plages de fréquences suivantes :

- Basse fréquence : de 50 Hz à 1 000 Hz
- Moyenne fréquence : de 1 000 Hz à 35 kHz ;
- Haute fréquence : de 35 kHz à 5 MHz.

b) Puissance

On les caractérise par la puissance surfacique P_s , puissance injectée dans la pièce rapportée à la surface du matériau.

6) Les types de chauffage par induction [1]

a) Chauffage pénétrant

L'autre appellation pour le chauffage pénétrant est "chauffage d'appoint". Ce type de chauffage est utilisé pour réchauffer des petites pièces annexes, des chambres d'amis, des salles de bains ou pour faire face au froid de l'intersaison avant d'allumer le chauffage central.

- Fréquence : de 1 à 50 kHz pour les métaux et de 0,1 à 4 MHz pour les semi-conducteurs ;
- Puissance : $10^2 \text{ kW/m}^2 < P_s < 10^3 \text{ kW/m}^2$;
- Exemples d'applications : forge, fusion.

b) Chauffage superficiel

Le chauffage superficiel est une technique utilisée dans des applications comme le brasage et la trempe superficielle pour chauffer uniquement la surface ou une couche peu profonde d'un matériau, sans affecter son noyau ou sa structure interne.

- Fréquence : de 10 à 500 kHz pour les métaux ;
- Puissance : $5 \cdot 10^3 \text{ kW/m}^2 < P_s < 5 \cdot 10^4 \text{ kW/m}^2$;
- Exemples d'applications : trempe superficielle, brasage.

c) Chauffage pelliculaire

L'autre appellation du chauffage pelliculaire est "calorifuge ".Le calorifugeage consiste à isoler les tuyaux du réseau de chauffage, généralement avec un matériau tel que de la mousse

CHAPITRE I Etat de l'art sur le chauffage à induction et soudage des couronnes des moteurs asynchrones

ou de la laine de verre, pour réduire les pertes de chaleur pendant que le fluide caloporteur circule dans ces tuyaux.

- Fréquence : de 10 à 1000 kHz pour les métaux ;
- Puissance : $P_s < 10^5 \text{ kW/m}^2$;
- Exemples d'applications : soudages de tubes, thermo scellage.

L'utilisation d'une fréquence autre que 50 Hz impose de disposer de générateurs dont le fonctionnement et l'adaptation à la charge doivent être maîtrisés pour fournir la puissance demandée.

Les performances du chauffage par induction se définissent ainsi par l'association des grandeurs électriques fréquence et puissance :

- Pour la grossemétallurgie (fusion, réchauffage de brames, etc.), l'introduction des GTO (thyristor blocage par la gâchette), des IGBT (transistor bipolaire à grille isolée) et la constitution de modules en parallèle permettent d'obtenir des convertisseurs statiques délivrant quelques mégawatts pour des fréquences allant jusqu'à quelques dizaines de kilohertz.
- Pour les applications de plus faible puissance et nécessitant des fréquences plus élevées, l'usage de transistors MOS (transistor à effet de champs à grille isolée) conduit à quelques centaines de kilowatts à quelques centaines de kilohertz.
- Pour les applications sur des matériaux peu conducteurs (plasma, oxydes métalliques, etc.), le générateur à triode reste irremplaçable. Les fréquences peuvent être très élevées, et les puissances sont limitées à quelques centaines de kilowatts. Les rendements de ces générateurs sont faibles (< 70 %), ce qui pénalise le rendement global de l'installation.

-

7) Méthode de chauffage par induction [6]

Il existe deux méthodes de chauffage par induction :

- a. le chauffage par courants de Foucault, lié aux pertes Joule RI^2 dues à la résistance du matériau de la pièce ;

- b. le chauffage par hystérésis, dans lequel l'énergie est produite à l'intérieur même de la pièce par le champ magnétique alternatif produit par la bobine, qui fait varier la polarité magnétique de la pièce. Le chauffage par hystérésis est possible jusqu'à la température de Curie, où la perméabilité magnétique du matériau diminue jusqu'à 1, réduisant ainsi au minimum l'effet de l'hystérésis. Au-delà de cette température, le chauffage par induction est assuré par les courants de Foucault.

8) Paramètres à prendre en compte[5]

- Le matériau qui compose la pièce à chauffer détermine la vitesse de chauffage et la puissance nécessaire. L'acier et le fer sont faciles à chauffer car ils ont une résistance élevée, à la différence du cuivre et de l'aluminium qui nécessitent davantage de puissance en raison de leur plus faible résistance.
- Certains aciers sont magnétiques ; on peut alors profiter à la fois de leur résistance électrique et de leurs propriétés d'hystérésis pour les chauffer par induction. Au-dessus de la température de Curie, l'acier perd ses propriétés magnétiques mais il peut encore être chauffé à une température plus élevée par les courants de Foucault.
- La puissance nécessaire est déterminée par :
 - Le type de matériau ;
 - Les dimensions de la pièce ;
 - L'élévation de température souhaitée ;
 - Le temps de montée en température.

La fréquence de fonctionnement du système de chauffage par induction doit être prise en considération en fonction des dimensions de la pièce à traiter. Pour être efficace, le chauffage des petites pièces doit se faire à haute fréquence (50 kHz à 27 MHz) et celui des grosses pièces à basse fréquence (50 Hz à 500 Hz) afin d'obtenir un échauffement plus profond. L'élévation de la température de la pièce s'accompagne d'une dissipation de chaleur accrue. Plus la température de chauffage est élevée, plus les pertes par rayonnement et par convection sont un facteur important à prendre en compte. On utilise souvent des techniques d'isolation pour les pièces portées à haute température, afin de réduire les déperditions de chaleur et la puissance que le système d'induction doit fournir

9) Application du chauffage à induction

Le chauffage à induction a trouvé des applications dans divers domaines, notamment :

- a) **Industrie** : Dans le traitement des métaux, pour des opérations telles que la fusion, le forgeage, et le traitement thermique.
- b) **Cuisine** : Les plaques de cuisson à induction offrent une méthode de cuisson rapide et contrôlable.
- c) **Chauffage domestique** : Des systèmes de chauffage à induction sont utilisés pour le chauffage des espaces résidentiels, offrant une alternative efficace aux systèmes conventionnels.

10) Applications industrielles [6]

Le chauffage par induction est un procédé utilisé dans plusieurs industries spécialisées pour réduire les coûts et augmenter l'efficacité.

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : fusion, chauffage avant formage, traitement thermique (trempe)... Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications sont apparues dans d'autres domaines tels que la chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...) et l'industrie agroalimentaire. Ces installations génèrent des champs magnétiques prépondérants à proximité de l'inducteur et des câbles d'alimentation électrique. Ces champs sont d'autant plus importants que l'intensité du courant parcourant l'inducteur est élevée.

Voici quelques-unes de ses applications industrielles :

- a) **Réchauffage avant formage et forgeage** : Le réchauffage par induction est de plus en plus utilisé dans le milieu industriel. Il présente en effet des atouts majeurs :
 - Possibilité d'une productivité élevée ;
 - Faible consommation énergétique ;
 - Rapidité de chauffage ;
 - Réduction des pertes par oxydation ;
 - Bonne précision de température ;
 - Possibilité de chauffer une zone bien délimitée au niveau des pièces.

- b) **Traitement thermique superficiel** : La fabrication mécanique de grandes séries – en particulier dans l'industrie automobile – a vu ces dernières années le développement d'un traitement thermique de qualité des aciers et des fontes. Celui-ci est constitué d'un chauffage superficiel par induction à basses (50 ou 60 Hz), moyennes (entre 100 et 20 000 Hz) ou à hautes fréquences (supérieures à 20 kHz) en fonction des caractéristiques du matériau, suivi d'une trempe.

L'induction permet de chauffer la surface de la pièce sans affecter notablement le cœur, puis de la durcir par refroidissement de manière à obtenir une structure hétérogène constituée par exemple :

- D'une couche superficielle dure (entre 0,3 et 6 mm d'épaisseur) afin d'assurer à la pièce une bonne résistance à la fatigue et à l'usure ;
- D'un cœur résilient assurant la sécurité de fonctionnement de la pièce.

On peut ainsi accroître les performances des pièces sollicitées.

- c) **Industrie chimique** : L'induction est utilisée comme moyen de chauffage des parois de réacteurs chimiques. On trouve ce type de réacteurs dans la fabrication des résines, des cosmétiques et dans l'industrie pharmaceutique.
- d) **Brasage de Taillants** : Le chauffage par induction est utilisé pour le brasage d'outils de coupe tels que les taillants de forets, les fraises, etc.
- e) **Fixations** : Il est également employé pour le brasage de fixations, comme les écrous et les boulons.
- f) **Nanoparticules** : Dans le domaine des nanotechnologies, le chauffage par induction peut être utilisé pour la synthèse de nanoparticules.
- g) **Semi-conducteurs** : Le chauffage par induction est appliqué dans la fabrication de semi-conducteurs.
- h) **Disques** : Pour le brasage d'aluminium sur des disques.

11) Choix d'un système de chauffage à induction

Pour choisir un système de chauffage à induction adapté à vos besoins, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- a) **Application spécifique** : Identifiez l'utilisation principale, qu'il s'agisse d'application industrielle, de cuisine ou de chauffage domestique.

- b) Puissance et Taille :** La capacité du système doit correspondre aux exigences de la tâche.
- c) Budget :** Les coûts initiaux peuvent être plus élevés que ceux des systèmes traditionnels, mais les économies d'énergie à long terme sont un facteur important à considérer.
- d) Caractéristiques Supplémentaires :** Recherchez des fonctionnalités comme le contrôle de la température, la sécurité et la facilité d'utilisation.

12) Avantages du chauffage à induction[3]

a) Confort

- Chauffe rapide, localisée, constante et reproductible.
- Régulation précise de la température selon les besoins.
- Chauffe des zones normalement inaccessibles par d'autres systèmes.

a) Sécurité et propreté

Comme la surface de la bobine reste relativement froide, le risque de brûlures et d'accidents est réduit. C'est une méthode de chauffage sécurisée (sans flamme) et propre. Il n'émet pas de fumées ni de saletés, offrant un confort supérieur et contribuant à la protection de l'environnement.

b) Rentabilité

Bien que le coût d'acquisition soit élevé, il est économique à long terme grâce à une moindre perte de chaleur, grande flexibilité de fonctionnement, et consommation d'énergie jusqu'à 40% inférieure aux appareils électriques. Il a également une longue durée de vie et peut réduire les coûts d'assurance.

13) Inconvénients du chauffage à induction

- a) Coûts élevés :** Les solutions de chauffage par induction restent relativement coûteuses.
- b) Risques de mauvaises manipulations :** Lors de mauvaises manipulations, d'autres objets peuvent être involontairement chauffés.
- c) Champs électromagnétiques :** Des champs électromagnétiques peuvent perturber l'environnement si les isolations sont mauvaises ou en présence d'une protection HF (haute fréquence).

- d) Limitation et considération :** Bien que le chauffage à induction offre de nombreux avantages, il présente certaines limitations. Par exemple, il nécessite des matériaux conducteurs pour fonctionner efficacement, ce qui limite son utilisation à certains types de matériaux. De plus, l'investissement initial peut être plus élevé, bien que cela soit souvent compensé par les économies d'énergie et la longévité du système.

14) Les différents types de fours à induction [4]

- a) Fours à induction sans noyau :** Les fours à induction sans noyau sont couramment utilisés dans les fonderies pour fondre les métaux. Ils sont constitués d'une bobine de fil qui génère un champ magnétique lorsqu'elle est traversée par un courant alternatif. Le champ magnétique induit des courants de Foucault dans le métal à fondre, qui génèrent à leur tour de la chaleur et font fondre le métal. Ces fours sont réputés pour leurs performances de haute qualité et leur simplicité d'utilisation.
- b) Fours à induction à canal :** Les fours à induction à canal sont également utilisés dans les fonderies pour faire fondre les métaux. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des fours à induction sans noyau, mais ils sont dotés d'un canal ou d'une cuvette dans laquelle s'écoule le métal en fusion. Cette conception permet de verser et de manipuler facilement le métal en fusion.
- c) Fours à creuset :** Les fours à creuset sont des fours simples souvent utilisés par les bijoutiers et les amateurs. Ils sont fabriqués à partir de matériaux réfractaires, tels que la céramique, pour résister à des températures élevées. Le creuset, qui contient le métal et les additifs, est placé dans la source de chaleur. La taille des fours à creuset peut varier d'une petite tasse à un four plus grand.

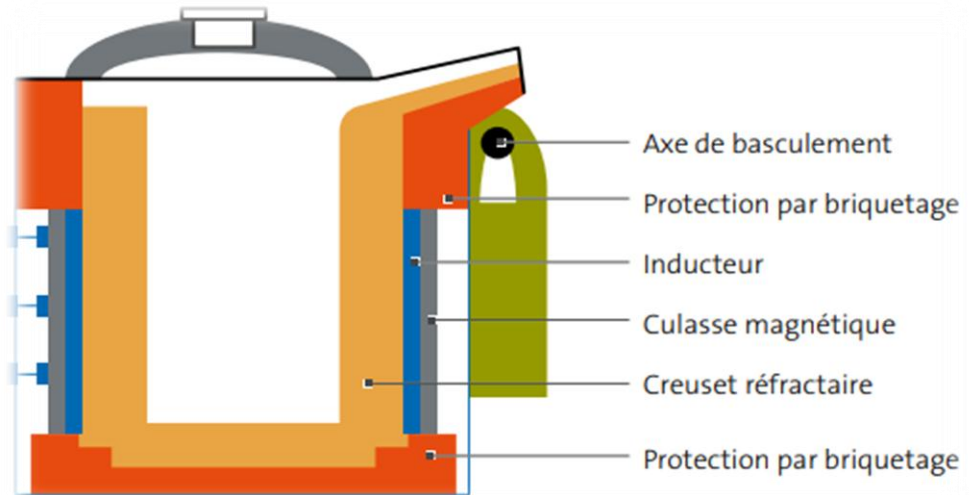


Figure I 4: Schéma d'un four à creuset [6]

d) Fours à arc électrique : Les fours à arc électrique utilisent des électrodes pour faire passer un courant électrique à travers le métal à l'intérieur du four. Ces fours sont généralement utilisés pour faire fondre de grandes plaques, des poutres et de la ferraille déchetée. Les électrodes créent un arc électrique qui fait fondre le métal. De l'oxygène peut être ajouté au processus à des fins d'affinage.

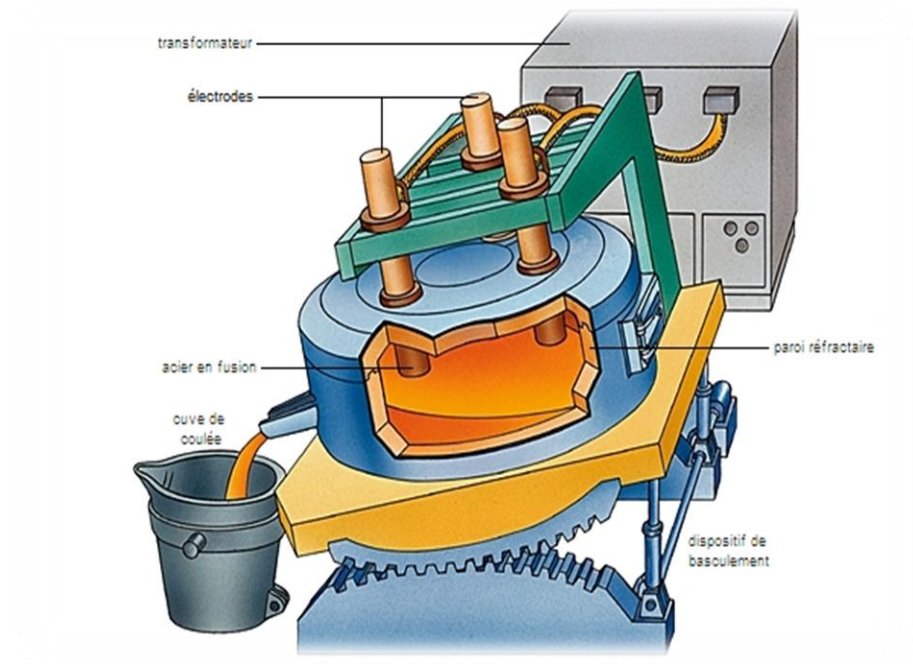


Figure I 5: schéma d'un four à arc électrique [7]

III Le soudage des couronnes des moteurs asynchrones

Le soudage des couronnes des cages d'écureuil dans les moteurs asynchrones est un processus crucial pour l'assemblage de ces moteurs.

1) Le processus du soudage des couronnes [10]

- a) **Objectif** : Le soudage des couronnes (ou cages) est nécessaire pour créer un circuit fermé dans le rotor du moteur asynchrone. Cela permet au moteur de générer un champ magnétique rotatif et de fonctionner correctement.
- b) **Technique de soudage** : Le procédé de chauffage par induction électromagnétique est souvent utilisé pour souder les couronnes des cages d'écureuil. Il consiste à assembler des tôles magnétiques empilées et des barres en cuivre ou en aluminium court-circuitées avec un anneau. Ce processus garantit une connexion solide et efficace.
- c) **Modélisation et simulation** : Pour déterminer la température de soudage des couronnes, des études de modélisation et de simulation sont effectuées. On utilise la méthode des éléments finis avec un logiciel de résolution des équations aux dérivées partielles (PDETOOL) sous environnement MATLAB. L'objectif est de modéliser le couplage magnétothermique pour prédire la température atteinte lors du soudage des couronnes.
- d) **Composants impliqués** : Les tôles magnétiques, les barres en cuivre ou en aluminium et l'anneau de court-circuit sont les principaux composants impliqués dans ce processus.
- e) **Applications** : Le soudage des couronnes est essentiel pour la fabrication de moteurs asynchrones utilisés dans diverses applications industrielles, telles que les pompes, les ventilateurs, les convoyeurs et les machines-outils.

2) Les différents types de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [10]

- a) **Le soudage à l'arc** : Le soudage à l'arc est l'un des nombreux procédés de fusion pour assembler des métaux. En appliquant une chaleur intense, le métal au niveau du joint entre deux pièces est fondu et amené à se mélanger - directement, ou plus couramment, avec un métal d'apport fondu intermédiaire.
- b) **Le soudage plasma** : Le soudage plasma est une technique de soudage qui repose sur la création d'un arc électrique très puissant entre une électrode et la pièce à

CHAPITRE I Etat de l'art sur le chauffage à induction et soudage des couronnes des moteurs asynchrones

souder. Cet arc électrique génère un plasma, un gaz extrêmement chaud et ionisé, qui permet de fondre les métaux à souder.

- c) **Le soudage au chalumeau** : le soudage au chalumeau est un procédé d'assemblage thermique qui s'applique aux tôles et aux tubes de même matière dont l'épaisseur reste inférieure ou égale à 2 mm.

3) Le choix de la méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [10]

Pour choisir la méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones, plusieurs facteurs doivent être pris en compte. Ces facteurs incluent :

- a) **Nature du soudage** : Il est essentiel de considérer le type de soudage approprié pour les couronnes des moteurs asynchrones, en tenant compte de la technique de chauffage par induction pour calculer la température de soudage.
- b) **Isolation thermique** : Assurer une isolation thermique adéquate lors du processus de soudage peut influencer le choix de la méthode pour maintenir la qualité des soudures.
- c) **Matériaux et construction** : Les matériaux utilisés dans les couronnes des moteurs asynchrones ainsi que leur construction peuvent impacter la méthode de soudage à sélectionner pour garantir des liaisons métalliques solides.

4) Risques liés à une mauvaise méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones [11]

Une mauvaise méthode de soudage des couronnes des moteurs asynchrones peut entraîner plusieurs risques, notamment :

- a) **Défaillance mécanique** : Des soudures de mauvaise qualité peuvent conduire à des défaillances mécaniques dans les moteurs asynchrones, compromettant ainsi leur performance et leur durabilité.
- b) **Perte d'efficacité** : Des soudures inadéquates peuvent entraîner une perte d'efficacité énergétique du moteur asynchrone, affectant sa consommation d'énergie et sa capacité à fonctionner de manière optimale.
- c) **Risque de sécurité** : Des soudures défectueuses peuvent présenter des risques pour la sécurité, en particulier dans des environnements industriels où la fiabilité des moteurs asynchrones est essentielle pour éviter les accidents.

5) Avantages du soudage des couronnes des moteurs asynchrones [12]

Les avantages du soudage des couronnes des moteurs asynchrones incluent une amélioration de l'intégrité structurelle du moteur, une augmentation de la durabilité et de la fiabilité du système, ainsi qu'une optimisation des performances globales du moteur. Ce processus de soudage contribue à renforcer le moteur, le rendant plus résistant aux contraintes mécaniques et thermiques, ce qui peut réduire les risques de défaillance prématurée et d'usure, prolongeant ainsi la durée de vie du moteur.

IV Conclusion :

Le chauffage à induction et le soudage des couronnes des moteurs asynchrones met en lumière l'importance de ces processus dans l'industrie. Le chauffage à induction offre des avantages en termes de rendement énergétique, de contrôle précis de la température et de rapidité, tandis que le soudage des couronnes des moteurs asynchrones contribue à renforcer l'intégrité structurelle, améliorer la durabilité et optimiser les performances globales des moteurs. En combinant ces deux techniques, il est possible d'assurer la qualité, la fiabilité et la durée de vie des moteurs asynchrones, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications industrielles.

CHAPITRE II

Présentation du four à induction d'électro-Industries

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

I Description de l'installation à moyenne fréquence

L'installation de brasage à moyenne fréquence est composée de :

1) Unité de soudage

L'unité de brasage est constituée de deux postes de brasage, sont construits d'une manière symétrique, et chaque poste est composé d'une table sur laquelle un inducteur échangeable est monté avec des différents diamètres.



Figure II 1 : Poste de brasage I et II

2) Table pour montage des barres

Le paquet de tôles, perforé et correctement positionné est installé sur la table au moyen d'une grue pivotante, les barres de court-circuitage y sont enfoncées manuellement à l'aide d'un marteau jusqu'à ce qu'elles sortent du paquet de tôles.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

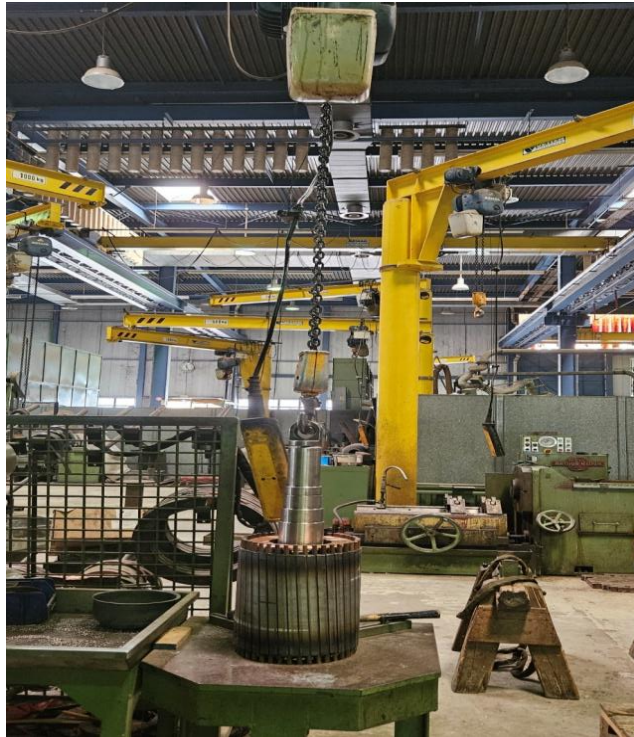


figure II 2: Table pour montage des barres

3) Cuve d'étain

Contient des granulés d'étain pulvérisés, les granulés sont répartis sur l'anneau du court-circuitage à l'aide d'un gobelet.



figure II 3: Cuve d'étain

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

4) Convertisseur moyenne fréquence

Le convertisseur est de type monobloc vertical à deux roulements, c'est-à-dire le rotor du moteur et l'alternateur ont un arbre commun, et l'ensemble est refroidi par l'eau et l'air.

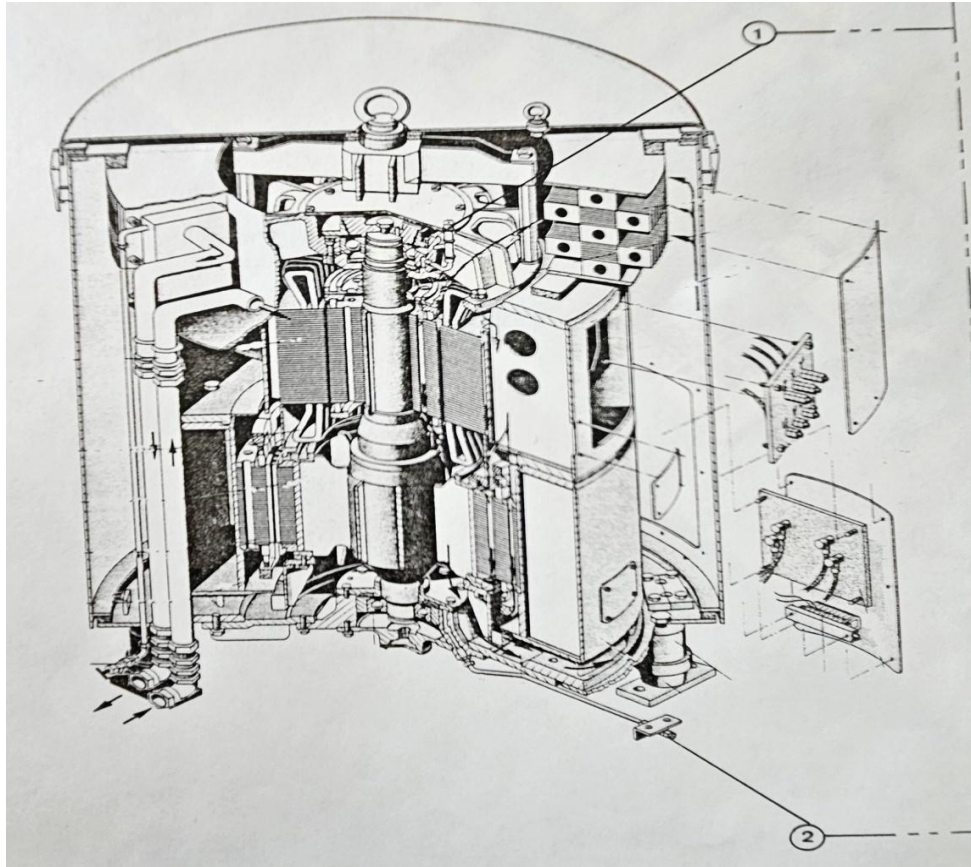


figure II 4: convertisseur monobloc

5) Armoires électriques

L'appareillage électrique nécessaire à la mise en service, au contact et à la commande est monté dans deux armoires électriques.

Les appareils suivants sont installés de manière visuelle sur le panneau frontal :

- a) un appareil de mesure pour :
 - courant de moteur
 - le courant de l'alternateur ;
 - la tension de l'alternateur ;
 - la puissance de l'alternateur ;
 - le courant d'excitation de l'alternateur ;
 - le $\cos \varphi$ de l'alternateur.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

- b) Un appareil pour mesure et régulation de la température.
- c) Un interrupteur à clés pour la tension de commande.
- d) Deux minuteries limitant le temps de brasage des deux postes.
- e) Une paire de boutons poussoirs avec lampes de signalisation pour la mise en service ou hors service du convertisseur à moyenne fréquence.
- f) Une lampe de signalisation qui indique la présence de tension sur l'ensemble de moyenne fréquence.
- g) Une paire de boutons poussoirs avec lampe de signalisation pour l'excitation ou désexcitation de l'alternateur.
- h) Deux boutons de réglage de $\cos \varphi$ du premier poste de brasage.
- i) Deux boutons de réglage de $\cos \varphi$ du deuxième poste de brasage.
- j) Un tableau de signalisation avec lampe pour signaler d'une manière optique les alarmes suivantes :
 - Manque d'eau de refroidissement des jeux de barres moyenne fréquence du condensateur du poste I ;
 - Manque d'eau de refroidissement des jeux de barres moyenne fréquence du condensateur du poste II ;
 - Manque d'eau de refroidissement dans les inducteurs des postes I et II ;
 - Manque d'eau de refroidissement dans les transformateurs TK à moyenne fréquence des postes I et II ;
 - Manque d'eau de refroidissement dans les transformateurs SK à moyenne fréquence ;
 - Surintensité et surtension de l'alternateur ;
 - Température de l'enroulement de l'alternateur ;
 - Température de l'enroulement du moteur et des roulements du convertisseur. ;
 - Surveillance de l'eau de refroidissement du convertisseur.
- k) Un bouton poussoir « essai des lampes » « extinction des lampes ».

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

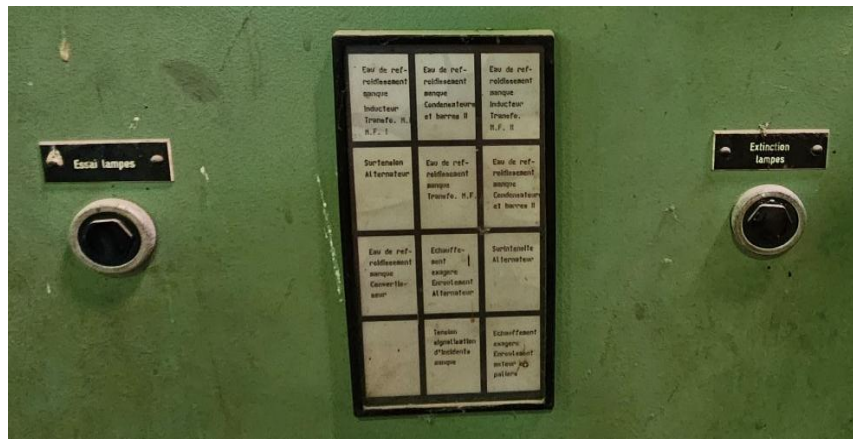


Figure II 5: Tableau de signalisation avec lampes

- l) Commutateur a 7 pas pour le réglage précis de $\cos\phi$ du poste I.
- m) Commutateur a 7 pas pour le réglage précis de $\cos\phi$ du poste II.



figure II 6: Les appareils installés sur le panneau frontal de l'armoire électrique

- n) Commutateur à 2 pas pour le réglage approximatif de $\cos\phi$ du poste I.
- o) Commutateur à 2 pas pour le réglage approximatif de $\cos\phi$ du poste II.

6) Installation d'aspiration

L'installation d'aspiration est composée de deux hottes amovibles, montées chacune au-dessus d'un poste de brasage, de gaines et d'un ventilateur. La hotte amovible est commandée par un vérin pneumatique à double effet. Grâce à l'amovibilité de la hotte, l'accès à la table de brasage est facilité. La pose d'un rotor avec une grue n'est pas gênée. Le ventilateur radial est monté sur support placé à environ 4 mètres au dessus du sol, il sert à aspirer la fumée de brasage.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie



Figure II 7: La hotte d'aspiration

7) Pyroscope

La tête des mesures sert à capter la radiation infrarouge et à la convertir en un signal électrique. A cette fin, elle est dotée d'un système optique, d'un dispositif de pointage, d'un convertisseur de radiation infrarouge et un amplificateur de mesure. Le pointage sur l'objet de mesure est effectué à l'aide d'une tâche lumineuse introduite dans le canal de mesure. Un anneau lumineux identique au point de mesure en dimension et en position apparaît sur l'objet, la focalisation se réalise en déplaçant le système optique. En combinaison avec une tête de mesure (capteur de mesure), le régulateur permet de réaliser une unité complète de mesurage optique, et de réglage de température. Le boîtier compact de régulateur comporte un instrument de mesure avec une échelle de température.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

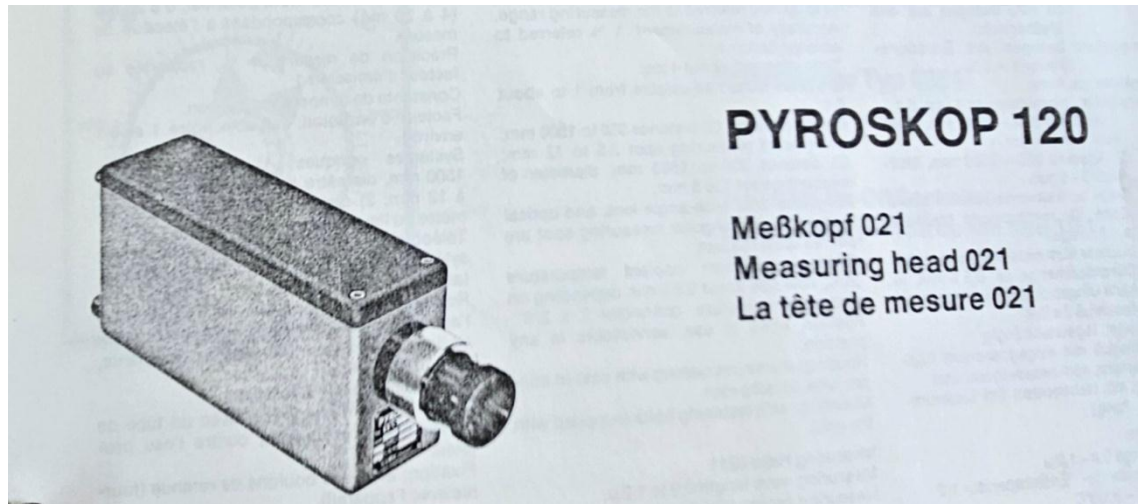


Figure II 8: Le pyroscope

8) Ventilateur

Un ventilateur radial situé entre le paquet de tôles du moteur et le paquet de tôles de l'alternateur, le ventilateur sert à refroidir les paquets de tôles par le passage de l'air à travers les perçages à l'intérieur du paquet de tôles.



Figure II 9: Le ventilateur radial

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

9) Distribution d'eau de refroidissement

La distribution d'eau se trouve sous la sortie des jeux de barres moyenne fréquence, ainsi que les départs suivants :

- 1 vers le transformateur moyenne fréquence SK
- 1 vers les condensateurs moyenne fréquence, refroidi par eau, ainsi que vers les jeux de barres moyenne fréquence.
- 1 vers l'inducteur du poste I.
- 1 vers l'inducteur du poste II.
- 3 vers transformateur TK poste I.
- 3 vers transformateur TK poste II.

Le besoin en eau fraîche même au niveau du convertisseur à moyenne fréquence pour refroidir les enroulements et les paquets de tôles du moteur et de l'alternateur. Le débit de l'eau de refroidissement est à régler de façon à ce que la température de l'eau à la sortie ne soit pas supérieure à 35°C.

10) Inducteur à moyenne fréquence

L'inducteur est en cuivre échangeable selon le diamètre de l'anneau, entouré par des feuilles magnétiques.



Figure II 10: Inducteur en cuivre

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

11) Vérin pneumatique

Sert à maintenir les petits rotors, lorsque cela est possible, pour éviter qu'ils ne remontent sous l'effet du métal d'apport en fusion.

II Instruction de montage [9]

- 1) Mettre en place l'unité de brasage. Fixer chaque poste de brasage sur le sol par moyen de vis de scellement.
- 2) Monter de convertisseur à moyenne fréquence sur 4 amortisseurs de vibrations.
- 3) Fixer les armoires électriques sur le sol par moyen de vis de scellement.
- 4) Fixer la table pour le montage des barres par moyen de vis de scellement.
- 5) Mettre en place la cuve d'étain.
- 6) Monter l'installation d'aspiration.
- 7) Monter le ventilateur.
- 8) Raccorder les conduites d'air comprimé.
- 9) Raccorder les conduites d'eau de refroidissement.

III Instruction de mise en service [9]

- 1) -Le raccordement électriques doivent être effectués par une personne qualifiée
-Les bornes marquées par \equiv doivent être mise à la terre
-Raccordement du convertisseur
-Mesurer la résistance d'isolation des enroulements. Au besoin, sécher les enroulements.
-Connexion des bornes de l'alternateur : 600V (enroulements connectés en série)
-Démonter le système de blocage pour le transport.
- 2) Contrôler l'étanchéité des conduites d'eau de refroidissement et désaérer le réfrigérant si nécessaire.
- 3) Lors de la mise en service de l'installation il convient de Contrôler les valeurs de consigne des dispositifs de protection et si nécessaire de régler à nouveau :
 - Relais de surintensité 130A
 - Relais de surtension 620V
 - Limiteur de tension de l'alternateur 600V

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

- Limiteur de courant de l'alternateur 150V
 - Limiteur de courant d'excitation 2,5A
- 4) Monter les inducteurs.
 - 5) Remplir le lubrificateur du groupe de conditionnement avec le l'huile.
 - 6) Graisser les paliers et les surfaces de friction et particulièrement les serrures et les pièces d'entraînement, les colonnes de guidage et les pièces de fixation des vérins.
 - 7) Serrer les raccords et connexions.

IV Besoin en eau fraîche et de refroidissement [9]

Les systèmes de refroidissement sont très sollicités ou attaqués dans le cas d'utilisation d'eau de refroidissement non appropriée. Cela peut provoquer des fuites dans les conduites et des obstructions par entartrage. Les causes et les effets peuvent alors être très divers. On veillera également à la température sur le lieu de mise en place. Une qualité minimale de l'eau brute est exigée.

Les sels sous forme de carbonates sont responsables de la dureté de l'eau et sont donc importants. La solubilité de ces sels n'est augmentée que si l'eau contient une certaine quantité carbonique.

On élimine l'acide carbonique de l'eau dure, contenant beaucoup de carbonates, celles-ci se restant pas en solution, du tartre est formé et se dépose sur les tuyaux.

V Indications relatives à l'alimentation en énergie (courant électrique, air comprimé)[9]

- 1) Indications relatives à l'alimentation en énergie électrique :
 - Puissance de raccordement : 120 KVA
 - Tension : 380 V
 - Fréquence : 50 Hz
- 2) Indications relatives à l'alimentation d'air comprimé :
 - Pression d'alimentation : 6 bars
 - Consommation : 0,6 m³/h

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

VIII Dispositif de Protection Thermique[9]

Le dispositif de protection totale protège la machine contre les surcharges thermiques. Par surcharge thermique, on désigne un échauffement d'une intensité ou d'une durée telle qu'il entraîne soit la destruction immédiate de l'isolant de l'enroulement ou l'endommagement des paliers, soit une diminution sensible de la durée de vie de la machine.

Le dispositif de protection totale comporte :

- des sondes thermométriques à résistance, incorporées dans la machine.
- des appareils de déclenchement faisant partie du poste de distribution.

1) Protection directe

Elle s'applique à l'enroulement statorique, aux paliers ou aux deux à la fois. Elle est assurée par des sondes thermométriques montées dans l'enroulement ou les paliers.

2) Protection indirecte

Elle s'étend à l'ensemble de la machine par contrôle de la température de l'enroulement statorique ou des paliers ainsi que, le cas échéant de la température de l'air chaud.

3) Fonctionnement du dispositif de protection

Lorsque la température d'une sonde dépasse sa valeur de réponse, la résistance de la sonde augmente sensiblement ce qui diminue considérablement le courant d'excitation de la bobine du relais incorporé dans l'appareil de déclenchement. Le relais déclenche et coupe le circuit de commande du contacteur de la machine lorsque la machine se refroidit.

La résistance de celle-ci baisse et l'excitation du relais se rétablit. La marche se remet en marche. L'appareil de déclenchement fonctionne également en cas de rupture du conducteur reliant la sonde thermométrique à l'appareil de déclenchement. Les sondes thermométriques peuvent être placées dans le fond d'une encoche, dans l'isolant entre deux couches de bobine ou dans une encoche particulière semi-fermée de l'enroulement statorique. La sonde est enrobée dans une bande en résine coulée, réalisée de façon à assurer une bonne transmission de chaleur.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

IX Le fonctionnement du four à induction

1) Etat des rotors à livraison

Paquet de tôles rotoriques sur arbre et enroulement intérieur à barres en cuivre mise en place, c'est-à-dire emmanchés par force.

2) Préparation pour le soudage de la première couronne de court-circuitage

- Poser la couronne de court-circuitage dans un bac et y verser les granulés en cuivre.
- Visser l'œillet sur l'arbre du rotor et poser verticalement le rotor sur la table d'alignement au moyen d'un dispositif de levage. A l'aide d'un marteau, aligner les barres en cuivre jusqu'à ce qu'elles sortent du paquet de tôles dans un plan parallèle à celui de la table. L'arbre du rotor se trouve alors en position verticale.
- Poser 3 à 5 couches de papier micacé sur la face supérieure de l'inducteur. Ce papier sert d'isolation et fournit l'écart de couplage entre l'inducteur et la couronne de court-circuitage. Poser la couronne et le métal d'apport sur l'inducteur préparé.
- Placer le rotor sur la couronne de court-circuitage au moyen d'un dispositif de levage et le positionner à vue d'œil de manière centrée sur l'anneau de court-circuitage.
- Maintenir les petits rotors, lorsque cela est possible, par des vérins pneumatiques, pour éviter qu'ils ne remontent sous l'effet du métal d'apport en fusion.
- Amener la hotte d'aspiration au dessus du poste de travail.
- Passer en position brasage.
- Pendant la durée de brasage du premier poste, le deuxième poste est préparé.

3) Brasage

La température de mise en œuvre du métal d'apport se situe à 710°C, la plage de fusion 650-810°C.

- En actionnant l'interrupteur de la table de brasage, le chauffage est mis en service. L'appareil de mesure et de réglage de la température

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

(pyromètre) assure ensuite la mise en circuit ou l'arrêt des puissances faibles ou élevées.

- Régler par focalisation la tête de meure du pyromètre sur le diamètre de la couronne.
- Après avoir actionné l'interrupteur de la table, le brasage s'effectue automatiquement. La couronne de court-circuitage et les barres en cuivre s'échauffent jusqu'à fusion complète du métal d'apport.
- Le métal d'apport doit remonter le long des barres de cuivre. si la quantité du métal d'apport dans la couronne est insuffisante en rajouter avec des tiges qui sont un métal d'apport cuivre-phosphore-argent en les collants entre les barres et la couronne en plein fusion.
- Après le brasage, les extrémités des barres de cuivre doivent présenter une couleur identique à celle de la couronne de court-circuitage et du métal d'apport. Une barre dont l'extrémité reste claire n'est pas brasée, on peut renouveler le brasage et ajouter le métal d'apport.
- La durée moyenne du brasage a été fixée à 2,5 min.
- Après l'opération de brasage, laisser refroidir la couronne pendant 1 min environ.

4) Fin des opérations

Après avoir terminé le brasage, la hotte d'aspiration est retirée, le rotor est desserré et on doit contrôler le brasage avant de le déposer pour l'opération suivante.

- **Précision**

- Dans le cas d'un moteur double cage :

On place l'arbre du moteur puis on met les barres de la première cage qui sont plate et en cuivre pour les souder sur les couronnes. On rajoute d'autres barres qui sont ronde et en bronze pour souder les deuxièmes couronnes constituant la deuxième cage après le soudage des premières couronnes de la première cage.

Les barres de la première cage prennent une longue durée pour chauffer durant le soudage et garde la chaleur longtemps, c'est pour ça qu'il faut attendre 24h le temps du refroidissement de la couronne pour souder la deuxième couronne de l'autre côté.

CHAPITRE II Présentation du four à induction d'électro-Industrie

Les barres de la deuxième cage prennent une durée moins longue pour chauffer durant le soudage et garde pas la chaleur longtemps, c'est pour ça qu'il faut seulement une demi journée afin que la couronne se refroidisse pour ensuite souder la deuxième couronne de l'autre côté.

X Indication des appareils de mesures au moment de brasage

Au moment du brasage, les valeurs indiquées sur les appareils de mesures sont les suivantes :

- Courant moteur : $I = 105 \text{ A}$
- Tension alternateur : $U = 523 \text{ V}$
- Courant alternateur : $I = 78,5 \text{ A}$
- Courant d'excitation : $I = 1,2 \text{ A}$
- Puissance alternateur : $P = 41 \text{ KW}$.

CHAPITRE III

Modélisation numérique pour la résolution des équations aux dérivées partielles

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

I Introduction[14]

L'objectif de la modélisation numérique est de simuler le comportement des systèmes physiques avec un outil informatique.

Les méthodes numériques nous permettent de ramener la résolution d'une équation aux dérivées partielles avec des conditions limites à un système d'équations algébriques. Avec la méthode suivante :

- La discrétisation du système physique à étudier et son modèle.
- La conversion du problème étudié à un modèle mathématique.
- L'utilisation d'un logiciel qui simule le comportement du système physique (modèle informatique).
- La construction d'un modèle algébrique qui peut être résolu sur ordinateur en utilisant les méthodes de discrétisation tel que la méthode des volumes finis, la méthode des différences finis ou la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre nous allons expliquer les différentes méthodes de résolutions et l'outil informatique avec lequel on va procéder à la résolution du notre modèle à étudier.

II Méthodes numériques [14]

1) Méthode de différences finis :

La méthode des différences finis a été rendue très populaire par l'événement de l'ordinateur et consiste à discrétiser le problème posé et à le résoudre au calculateur numérique. La discrétisation d'une fonction $U(x,y)$ défini en tout points (x,y) du domaine (Ω) , avec les conditions aux limites données sur le contour r délimitant ce domaine, cette méthode consiste à:

- Remplacer le domaine Ω des variables (x,y) par un ensemble fini S de N éléments.
- Remplacer une fonction $U(x,y)$ par une fonction $U(P)$ définie sur S , l'équation aux dérivées partielles déterminant $U(x,y)$ donc remplacer par un système fini d'équations simultanées déterminant $U(P)$.

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

2) Méthode d'intégrale de frontières

La méthode d'intégrale de frontières permet la représentation du domaine tout en limitant la discrétisation à la frontière, elle est souvent utilisée dans l'étude des structures de grandes dimensions, et elle s'adapte aux problèmes à frontières ouvertes. En revanche elle a comme inconvénients la difficulté de prendre en considération la structure, et elle nécessite un espace mémoire considérable et un temps de calcul long, car le système algébrique issue de cette méthode est à matrice pleine. Cette méthode est mise en œuvre par la méthode directe qui est basé sur la lois de Biot et Savart, ou bien sur la méthode d'identité du Green.

3) Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites. Cette méthode a été utilisé initialement pour la résolution des problèmes dans le domaine de la mécanique de la rupture et calcul de structures.

Son principe consiste à remplacer le problème continue par un problème discret équivalent on utilisant une approximation simple de l'inconnue sur des sous domaines pour transformer les systèmes d'équations aux dérivées partielles ou un système d'équation algébrique dont la résolution fournit une solution approchée du problème.

III Les méthodes mixtes [14]

1) Eléments finis / éléments frontières

Cette formulation regroupe une formulation variationnelle sur les domaines fermés, représentant les matériaux métalliques, alliée à une formulation intégrale du champ électromagnétique dans l'air. La méthode des éléments de frontière permet de coupler les inducteurs et la pièce étudiée par le calcul des valeurs imposées du potentiel magnétique sur le contour des inducteurs et pièces. La répartition des champs électromagnétiques à l'intérieur d'un domaine est ensuite calculée par une formulation variationnelle. Ce couplage dépend :

- Des conditions de continuité aux interfaces qui doivent être respectées par le champ interne issu d'un calcul éléments finis et par le champ externe issu de la méthode des équations intégrales de frontière ;
- De l'ordre de discrétisation de chaque méthode.

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

2) Éléments finis / Equations intégrales

La méthode des éléments finis est employée dans les milieux conducteurs et nécessite la connaissance du potentiel magnétique sur les contours des pièces et inducteurs. La loi de Biot et Savart peut être utilisée à cette fin.

Néanmoins, étant donné que la répartition de densité de courant dans les conducteurs dépend du champ électromagnétique environnant et donc de ses valeurs sur les contours, une résolution itérative est nécessaire pour réactualiser les conditions aux limites sur les contours après qu'une nouvelle répartition de densité de courant ait été obtenue. Cette méthode est peu performante en termes de rapidité de calcul car elle nécessite de nombreuses itérations pour converger.

IV Présentation du logiciel pdetool [14]

Pdetool sous MATLAB est un logiciel permettant le traitement des équations aux dérivées partielles en deux dimensions (2D) en utilisant la méthode des éléments finis. Nous présentons quelques éléments simples permettant l'utilisation efficace de cette interface graphique.

Pdetool contient plusieurs modes différents :

- **En draw mode (mode dessin) :** Nous pouvons dessiner des objets solides. Ils existent quatre formes : Cercle, Polygone, Rectangle, Ellipse.
A chaque objet est attribué automatiquement un nom unique qui s'affiche dans l'interface graphique sur l'objet lui-même.
- **En boundary mode (mode frontière) :** Dans ce mode, l'origine des formes de la construction des objets solides constitue les frontières entre les sous domaines du modèle. Ces frontières ne peuvent pas être éliminées dans ce mode. Les limites extérieures sont codées par couleur pour indiquer le type de conditions aux limites. Le rouge correspond à la limite extérieure de Dirichlet, le bleu généralise les conditions de Newman et le vert aux limites mixtes.
- **En PDE mode :** Nous pouvons spécifier le type de problème EDP et les coefficients a , c , f , et d . Nous pouvons également spécifier les coefficients pour chaque sous domaine de façon indépendante.
- **En solve mode (mode de résolution) :** Nous pouvons spécifier les paramètres de résolution et résoudre les problèmes EDP. Pour les EDP hyperboliques et

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

paraboliques, nous pouvons également spécifier les conditions initiales et le moment où la production doit être générée.

- **En mesh mode (mode maillage) :** Nous pouvons contrôler la génération de maillage automatiquement et tracer le maillage.
- **En plot mode :** Nous pouvons choisir une grande variété de méthodes telles que la résolution de la surface, maillage, contour des parcelles.

V Les étapes de la simulation sous pdetool [14]

Pour pouvoir réaliser l'étude d'un modèle sous pdetool on procède comme suit :

Après avoir ouvert l'environnement MATLAB on tape le mot « pdetool » dans Matlab commande, une interface graphique s'affiche sur laquelle on trouve toutes les fonctionnalités disponibles et les différents onglets correspondant aux modes cités précédemment. (Figure III.1).

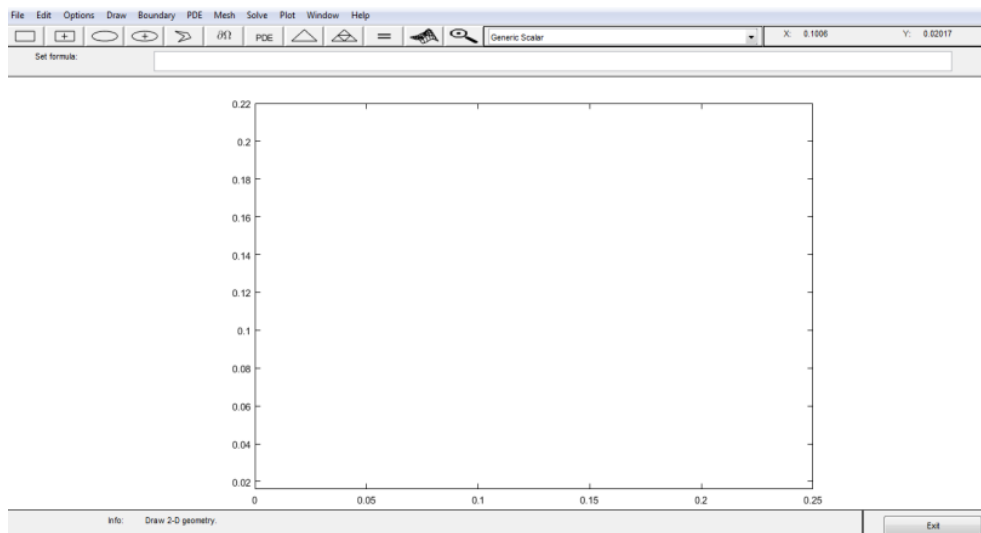


Figure III 1: Interface d'accueil pdetool.

1) Dimensionnement de l'espace de travail

Pour définir la dimension de notre espace de travail nous allons dans «options» puis «axis limits», et on va introduire les valeurs sur les axes (X) et (Y). (Figure III.2).

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

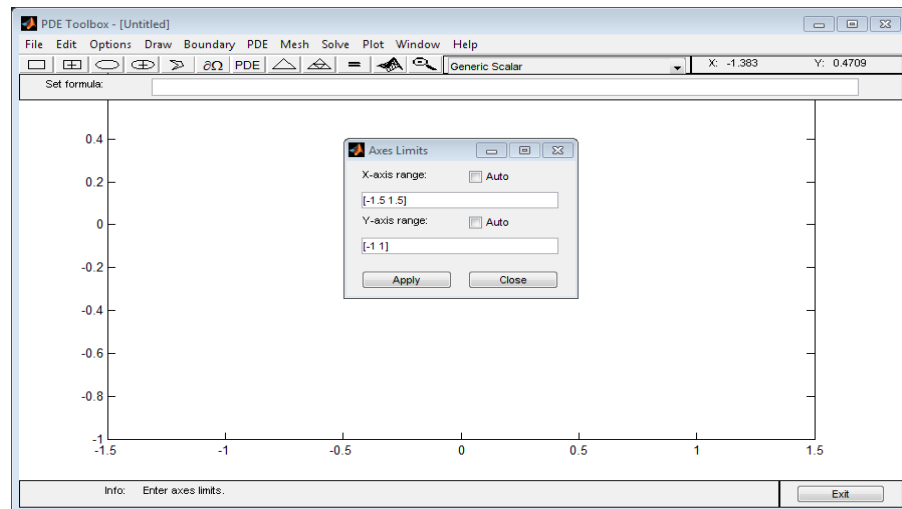


Figure III 2: Les valeurs d'axes.

2) Dessin du domaine

Par la suite on détermine un domaine dans lequel nous générons notre modèle à simuler. Dans l'onglet « Boundary mode ». (Figure II.3). Puis «specify Boundary conditions», on va choisir les conditions aux limites de type Dirichlet ou bien Newman. (Figure III.3).

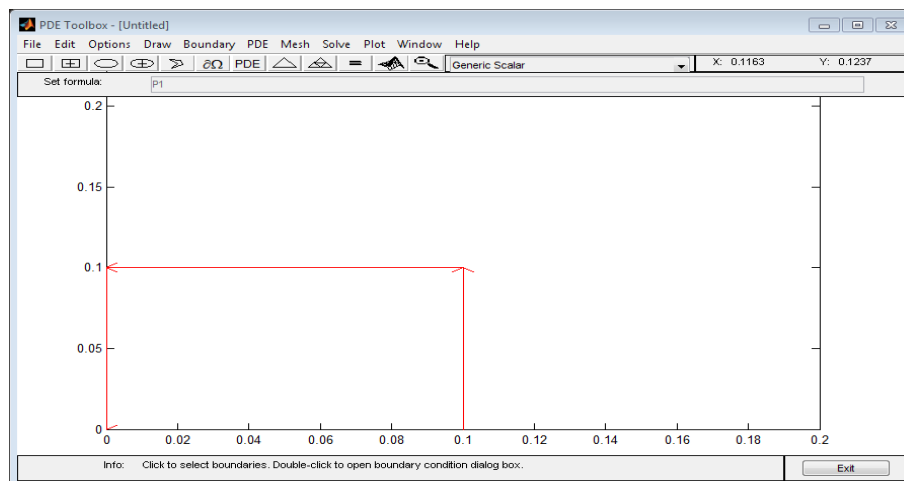


Figure III 3: : Exemple d'affichage (Boundary mode).

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

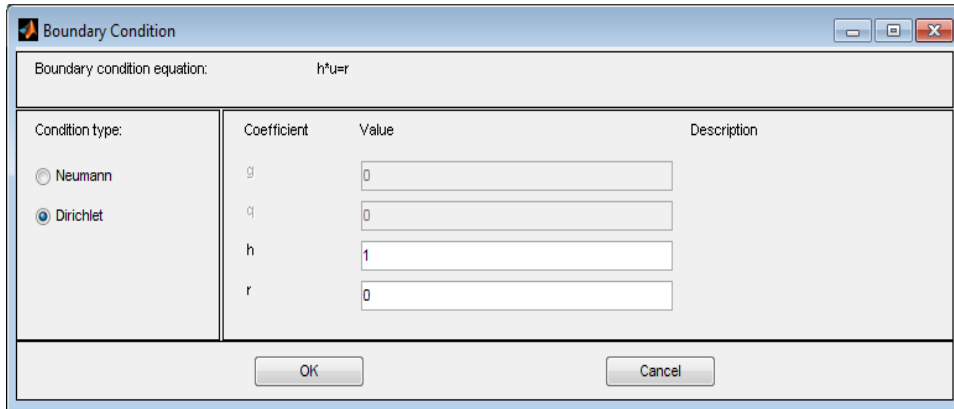


Figure III 4: Boite de dialogue (SpecifyBoundary conditions).

3) Dessin de la structure

Ensuite, pour réaliser la structure de notre modèle nous allons dans l'onglet «draw» puis «draw mode» de là nous traçons les blocs qui formeront notre modèle. On prend l'exemple de deux rectangles.

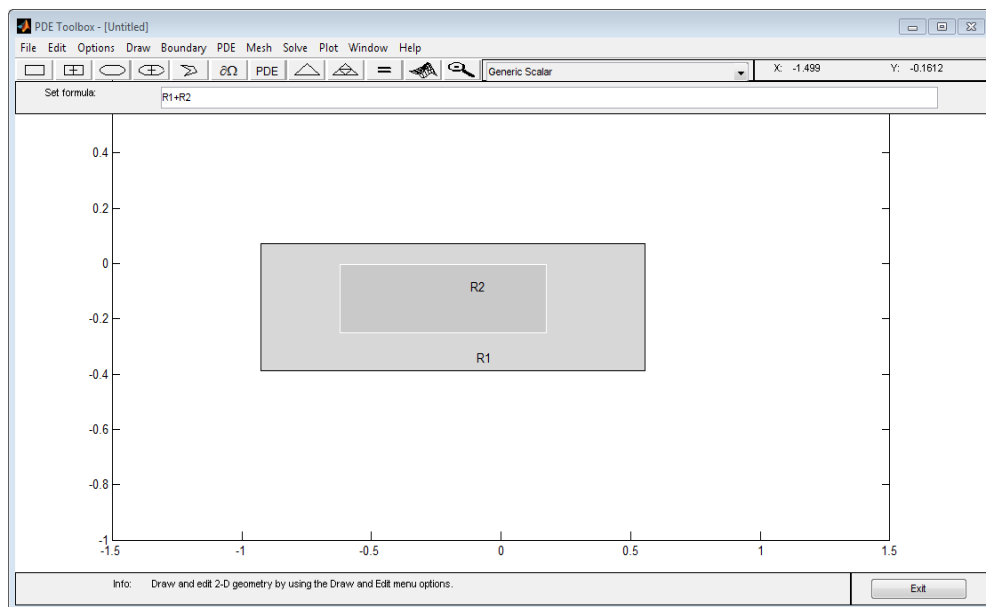


Figure III 5: Exemple d'une structure

4) Spécification des dimensions

Nous déterminons les dimensions et la position d'un bloc en cliquant dessus. La boîte de dialogue (figure III.6) nous demande d'introduire les quatre valeurs suivantes ; «left», «bottom», «width» et «high» qui représentent respectivement, la limite à gauche, la limite inférieure, la largeur et hauteur de chaque bloc.

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

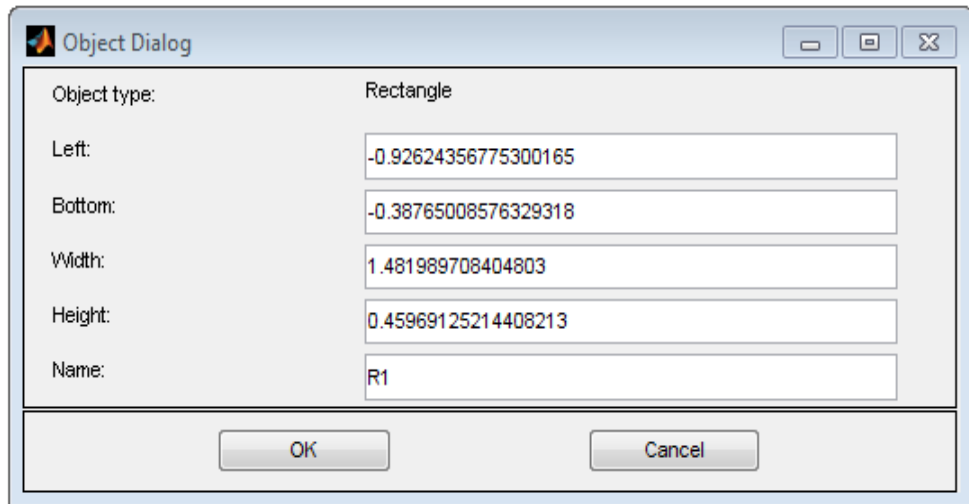


Figure III 6: Boîte de dialogue pour les dimensions et de la position d'un bloc.

5) Génération du maillage

Le maillage consiste à subdiviser notre domaine en petites parcelles, et pour la génération automatique de notre maillage On clique sur l'onglet « mesh » puis, « initialize mesh».

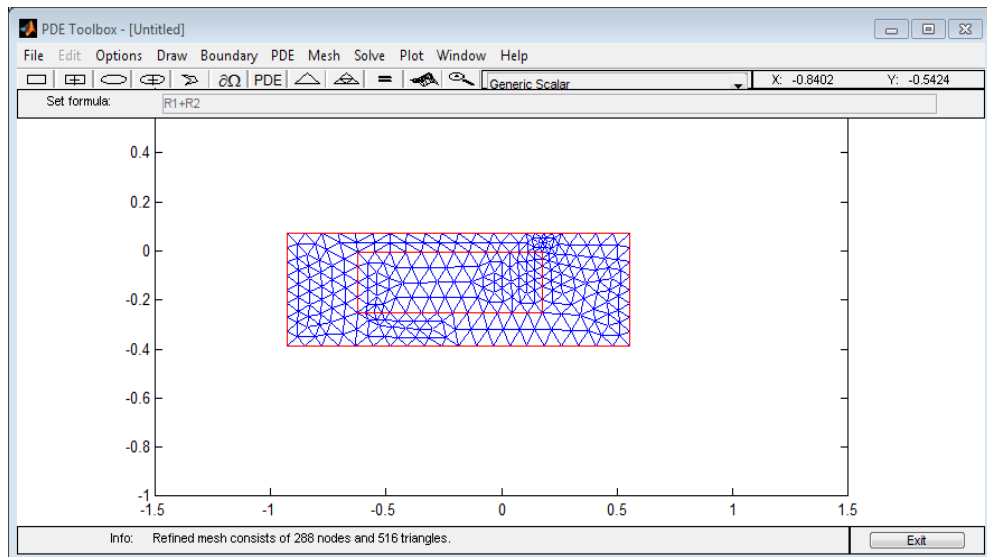


Figure III 7: Génération d'un maillage

6) Spécification des paramètres des équations

L'étape suivante est la spécification des paramètres des équations PDE, pour cela, on choisit dans le menu «PDE» la fonction «PDE MODE....» une boîte de dialogue s'affiche nous permettant :

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

- Choisir le type d'équation compatible a notre modele étudié (Eleptic, parabolic, Hyperbolic ou bien Eingen modes).
- Introduire les valeurs des coefficients identifiés ; **c**, **a**, **f** et **d**.

➤ **Remarque** : Cette manipulation sera effectuée pour chaque bloc de la géométrie.

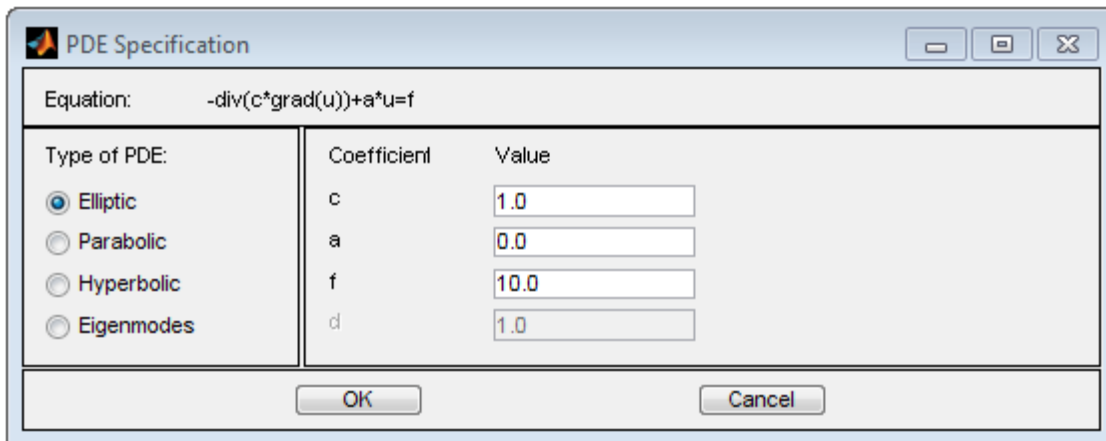


Figure III 8: Boite de dialogue PDE mode.

7) La résolution de PDE

Pour la résolution de l'équation aux dérivées partielles de notre modele, il faut aller dans l'onglet « Solve PDE», on peut donc lire chaque solution correspondante aux cordonnées (x, y) du domaine.

On peut choisir la méthode de la résolution en cliquant sur « plot » puis « paramètres... » et choisir, une boite de dialogue s'affichera « Figure III.8». Le maillage peut être caché dans tous les types de parcelles. Pour les équations hyperboliques on peut animer la solution qui change avec le temps. Cette solution peut s'afficher en 2D, en 3D.

CHAPITRE III Modélisation numérique pour la résolution des équations dérivées partielles

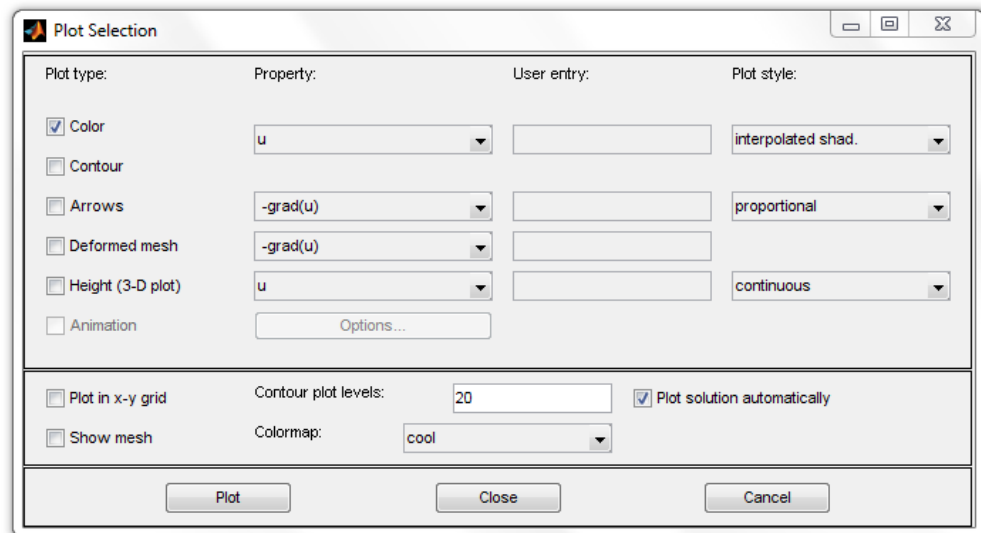


Figure III 9: Boite de dialogue plot sélection.

VI Conclusion [14]

Dans ce chapitre nous avons expliqué les différentes méthodes de résolutions et présenter l'outil informatique pdeTool et nous avons expliqué la démarche à suivre pour la simulation d'un modèle donné.

Le prochain chapitre sera consacré pour l'application et la validation des résultats.

CHAPITRE IV

**Détermination des températures et du temps de soudures des couronnes du
moteur asynchrone**

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

I Introduction [14]

Ce chapitre sera consacré à l'introduction de la géométrie et la résolution des équations aux dérivées partielles du modèle, par la méthode des éléments finis mis en œuvre sous le logiciel pdetool dans le but de calculer la température de soudage des couronnes des cages d'écureuil du moteur asynchrone.

La modélisation de ce modèle nécessite la résolution des équations magnétiques et thermique, avec des conditions de type Dirichlet imposé sur le vecteur magnétique \vec{A} ($A=0$), et sur la température T ($T=20^{\circ}\text{C}$).

II Description de la géométrie à étudier[14]

Notre dispositif se compose d'un :

- Inducteur
- Induit (couronne de cages d'écureuil)

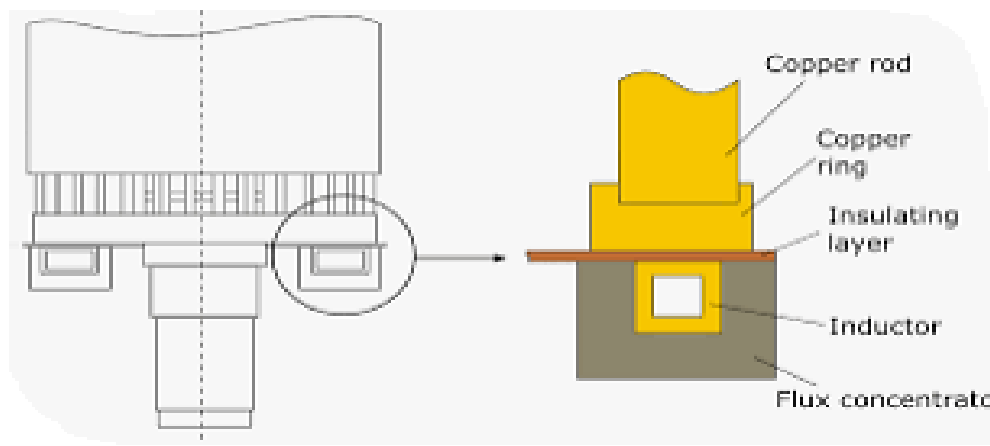


Figure IV 1: Représentation du modèle (inducteur – couronne)

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

III Les caractéristiques électromagnétique et thermique[14]

	Air	Inducteur	Induit	Unité
μ_r	1	1	1	-----
λ	0.023	389	398	[w/m°C]
ρ	1.28	8900	8900	[Kg/m ³]
C_p	1000	385	385	[J/Kg°C]
μ_0	-----	$4.\pi.10^{-7}$	-----	[H/m].
J	-----	$2..35*10^{+6}$	-----	[A/mm ²]
σ	-----	-----	$5.9*10^{+7}$	[$\Omega. m$] ⁻¹

Tableau IV 7: Les caractéristiques électromagnétique et thermique

- Perméabilité relative du cuivre : μ_r
- Perméabilité à vide du cuivre : μ_0
- Conductivité thermique du cuivre : λ
- Densité de masse volumique du cuivre : ρ
- Chaleur spécifique du cuivre : C_p
- Densité de courant d'excitation : J
- Conductivité électrique du cuivre : σ

1) Equations de l'inducteur

$$\vec{\nabla}_\Lambda(\vec{\nabla}_\Lambda \vec{A}) = \mu \vec{J}_s \quad (\text{IV.1})$$

$$\vec{\nabla}(-\lambda \vec{\nabla} T) = 0 \quad (\text{IV.2})$$

2) Equations de l'induit

$$\vec{\nabla}_\Lambda(\partial \vec{\nabla}_\Lambda \vec{A}) + j\sigma \omega \vec{A} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

$$\vec{\nabla}(-\lambda \vec{\nabla} T) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q \quad (\text{IV.4})$$

3) Equations de l'air

$$\vec{\nabla}_\Lambda(\partial \vec{\nabla}_\Lambda \vec{A}) = 0 \quad (\text{IV.5})$$

$$\vec{\nabla}(-\lambda \vec{\nabla} T) = 0 \quad (\text{IV.6})$$

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

IV Introduction de la géométrie

La structure de notre modèle se compose de deux inducteurs R5 et R6, deux induits R2 et R4, et de l'air.

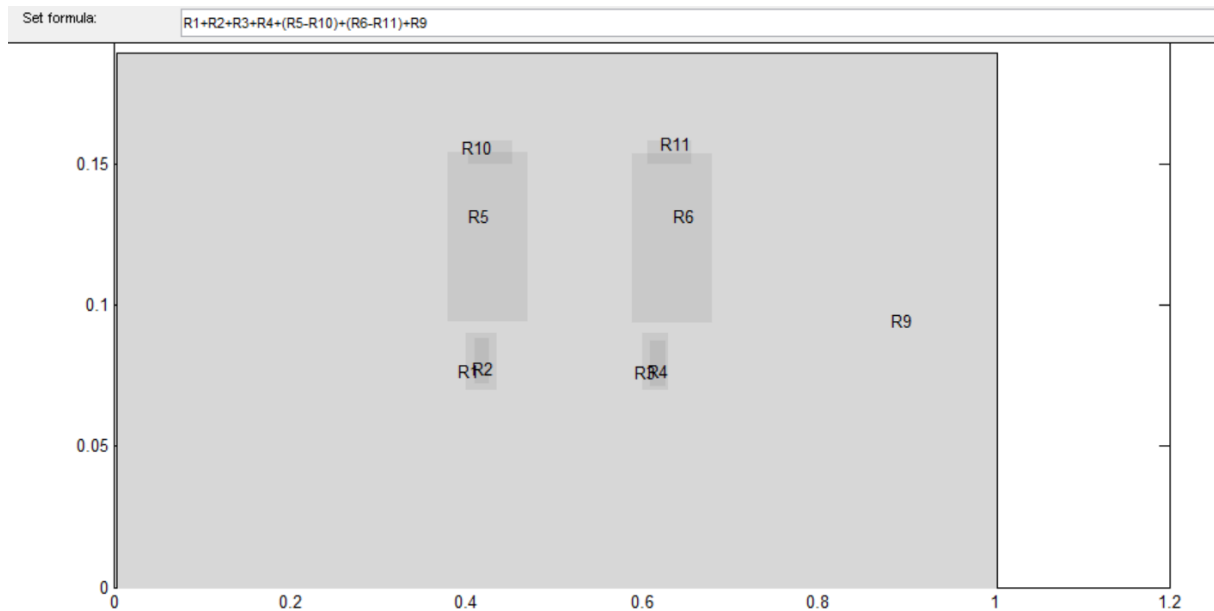


Figure IV 2: Modèle d'étude

V Spécification des paramètres des équations

Pour la spécification des paramètres des équations, on choisit le type d'équation compatible à notre modèle étudié qui est « Eleptic » et on introduit les valeurs des coefficients identifiés c,a,f.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

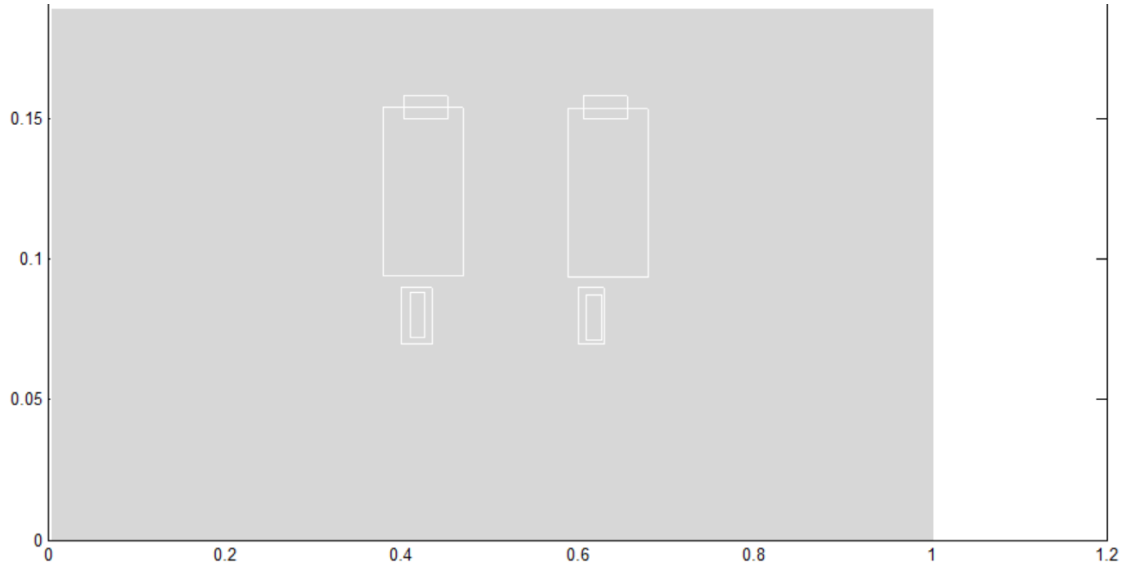


Figure IV 3: spécification des paramètres des équations PDE

VI Affectations des paramètres dans les différents milieux [14]

- Equation magnéto dynamique 2D

$$-div(cgrad\vec{u}) + a\vec{u} = f$$

- L'équation de diffusion du potentiel vecteur magnétique en magnétodynamique

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) + J\sigma\omega A = Js$$

- Par identification entre les deux équations :

$$c = \frac{1}{\mu}; \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad ; \quad \mu_0 = 4\pi * 10^{-7}; \quad \mu_r = 1$$

$$a = j\sigma\omega$$

$$f = J_s$$

- Les paramètres dans les différents milieux :

- Inducteur :

$$c = \frac{1}{\mu} \quad ; \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad ; \quad \mu_0 = 4\pi * 10^{-7}; \quad \mu_r = 1$$

$$a = 0$$

$$f = J_s$$

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) = Js$$

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

- Induit :

$$c = \frac{1}{\mu}$$

$$a = J\sigma\omega$$

$$f = 0$$

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) + J\sigma\omega A = 0$$

- Air :

$$c = \frac{1}{\mu}; \mu = \mu_0 \mu_r \quad ; \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \quad ; \mu_r = 1$$

$$a = 0$$

$$f = 0$$

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) = 0$$

	Air	Inducteur	Induit
c	1/4*pi*1e-7	1/4*pi*1e-7	1/4*pi*1e-7
a	0	0	J*5.9*1e+7*2*pi*500
f	0	2.35*1e+6	0

Tableau IV 8: Affectations des paramètres dans les différents milieux

VII Le maillage du domaine d'étude

C'est une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et éventuellement, son environnement dans l'optique de calculs de simulation ou de représentations graphiques.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

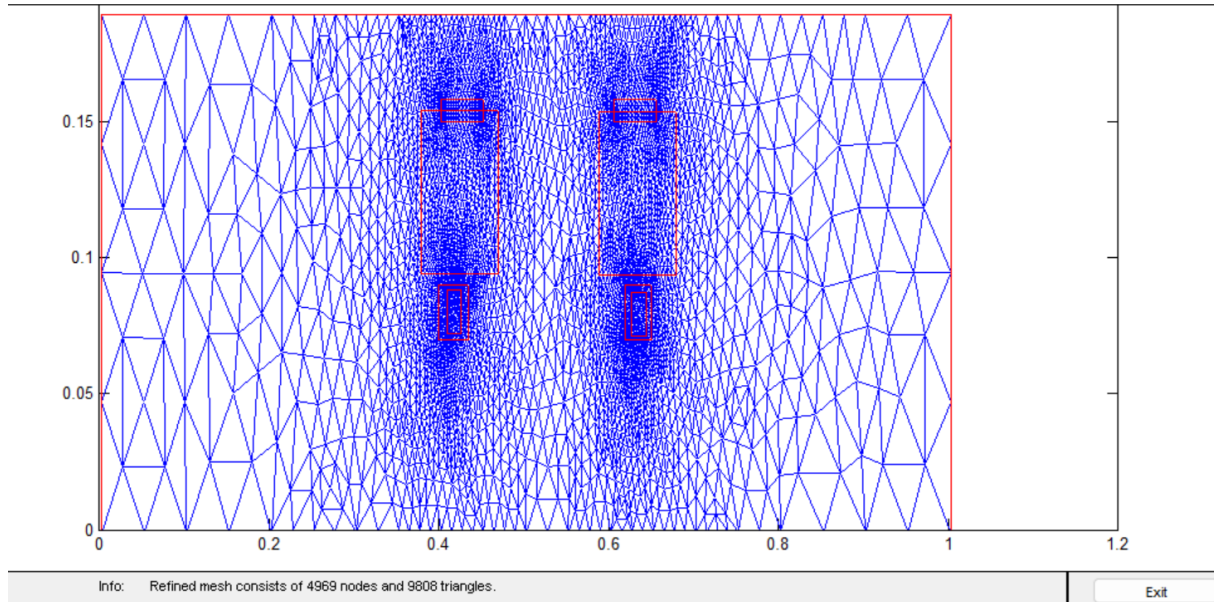


Figure IV 4: Maillage du domaine d'étude

- Nombres de nœuds : 4969
- Nombres de triangles : 9808

$J_{s1}=2.35*1e+6 [A/mm^2]$; $\sigma=5.9*1e+7 [\Omega \cdot m]^{-1}$; $f = 500 \text{ Hz}$

μr	A(T/m)	B(T/m)	H(T/m)	T (°C)	Q(J)
1	$2.5*1e-3$	0.14	$11*1e+4$	$3*1e+4$	$1.8*1e+9$
200	0.4	35	$14*1e+4$	$6*1e+8$	$4.6*1e+13$
1000	2	180	$14*1e+4$	$1.5*1e+10$	$1.16*1e+15$

Tableau IV 9: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μr

Avec : $Q=0.5*\sigma*\omega^2*A^2$

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

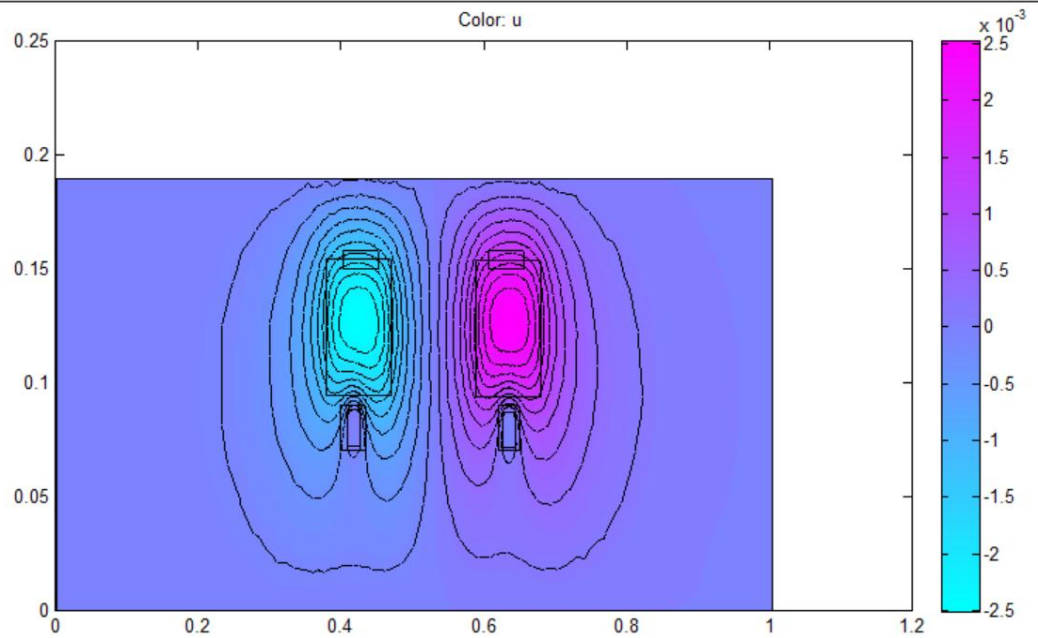


Figure IV 5: Répartition du potentiel vecteur magnétique A

$A=2.5 \cdot 10^{-3}$ [T]. NE CHANGE PAS

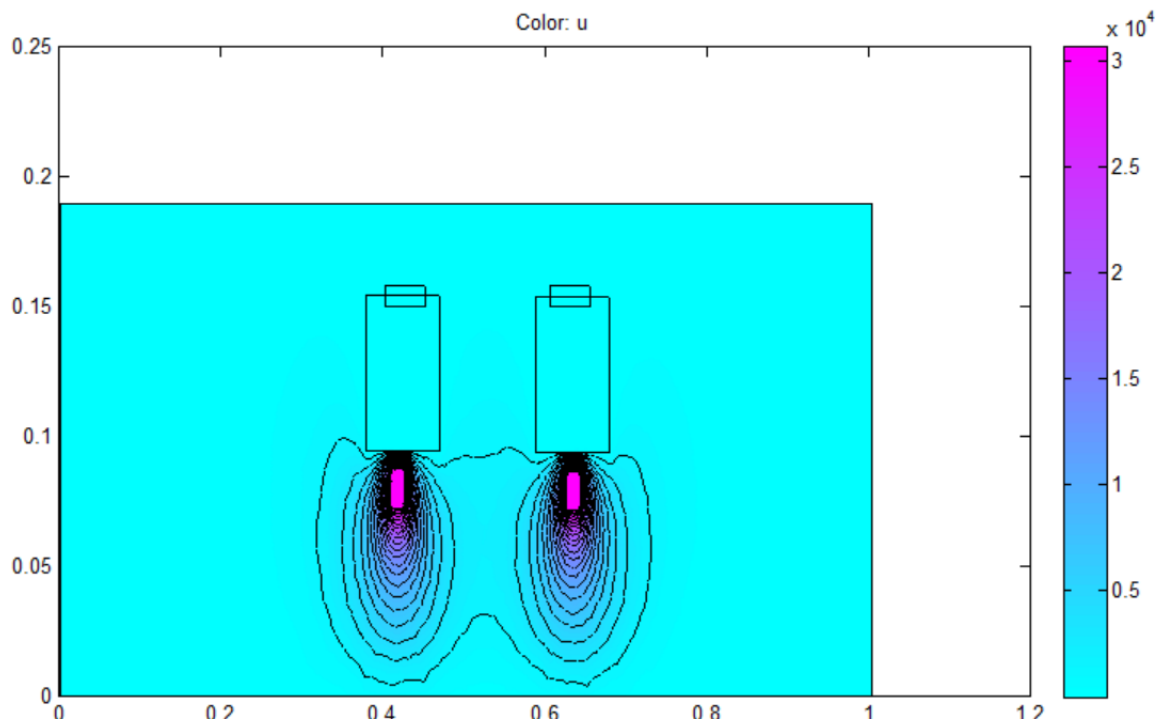


Figure IV 6: Température pour $\mu_r=1$

On remarque que la température est beaucoup trop importante, elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

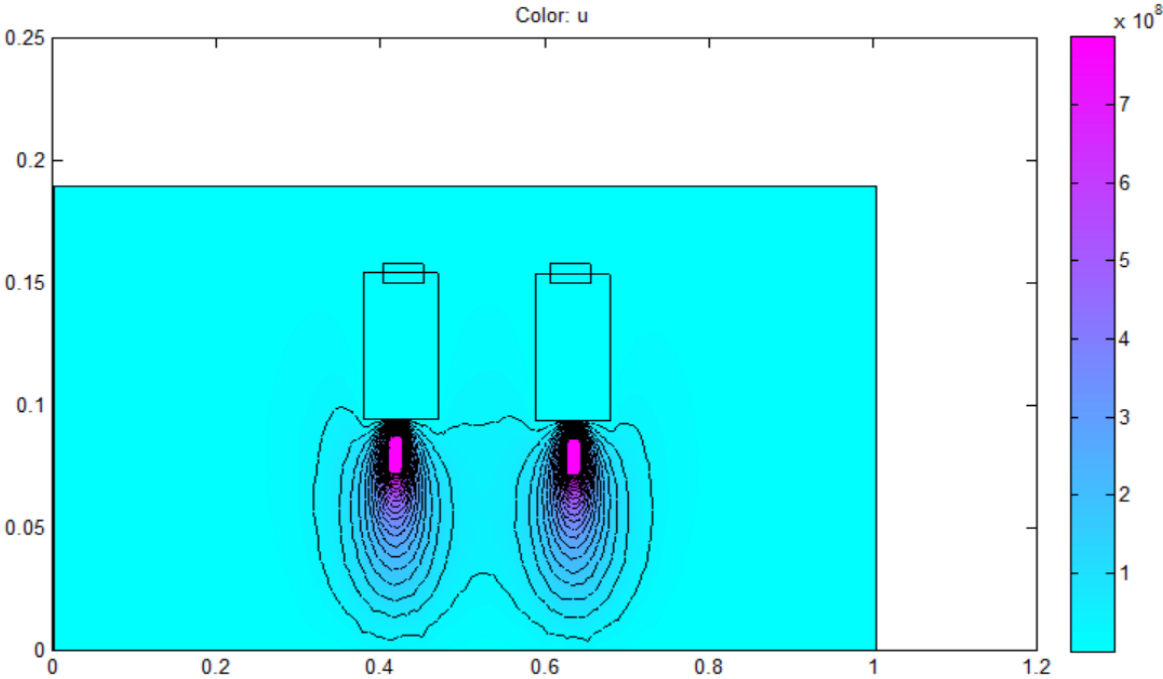


Figure IV 7: Température pour $\mu_r= 200$

La température est beaucoup trop importante. Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

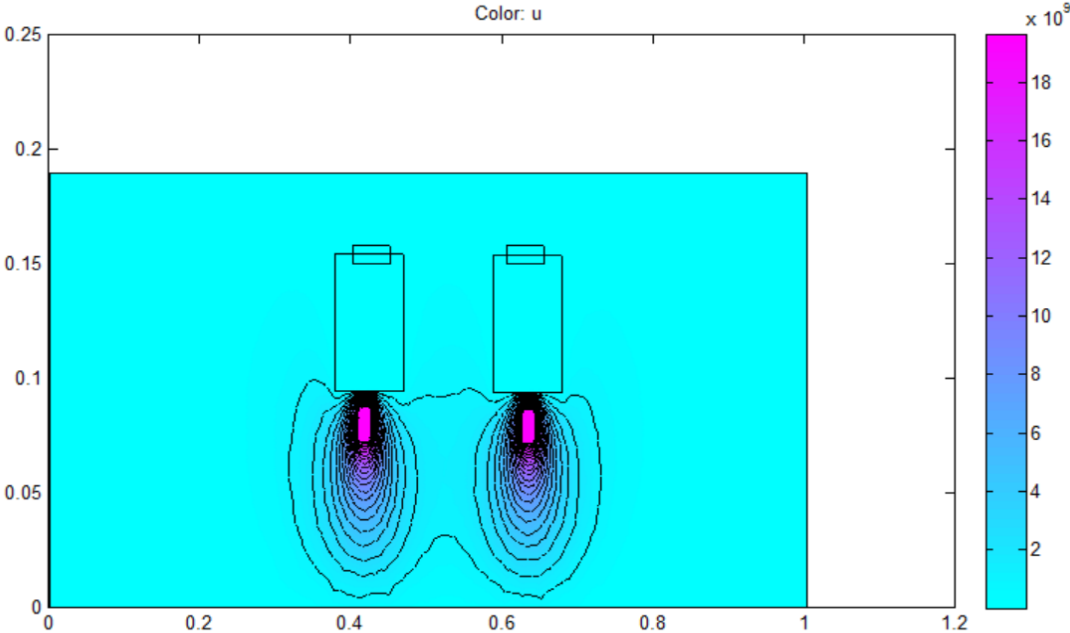


Figure IV 8: Température pour $\mu_r= 1000$

La température est toujours beaucoup trop importante Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

$J_{s1} = 2.35 \cdot 10^6 [\text{A}/\text{mm}^2]$; $\sigma = 5.9 \cdot 10^7 [\Omega \cdot \text{m}]^{-1}$; $f = 1000 \text{ Hz}$

μr	A(T/m)	B(T/m)	H(T/m)	T (°C)	Q(J)
1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.14	$12 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$7.27 \cdot 10^9$
200	0.4	35	$14 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^9$	$1.86 \cdot 10^{14}$
1000	2	180	$14 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{10}$	$4.65 \cdot 10^{15}$

Tableau IV 10: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μr

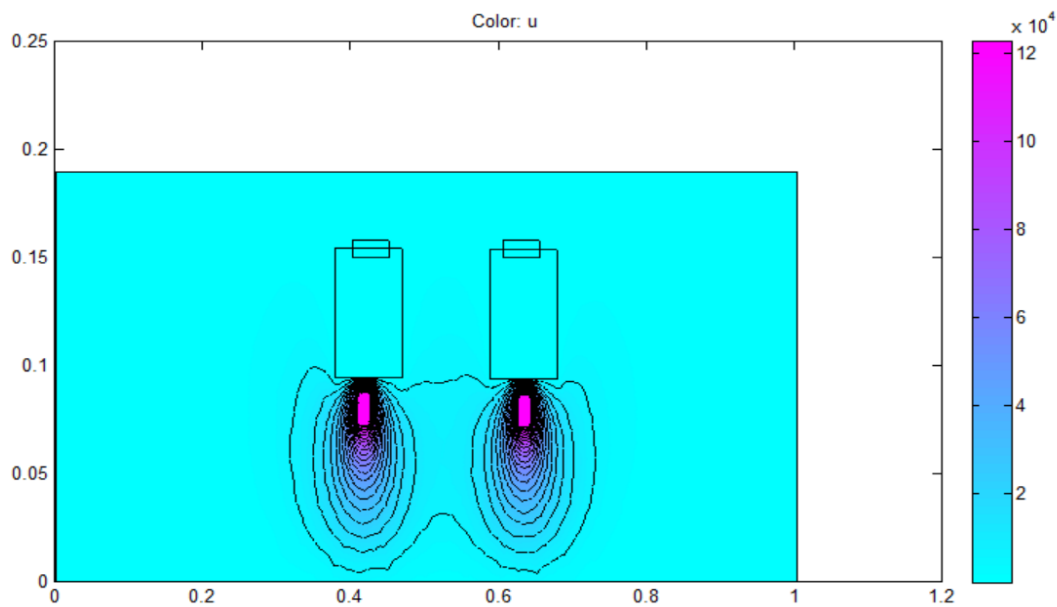
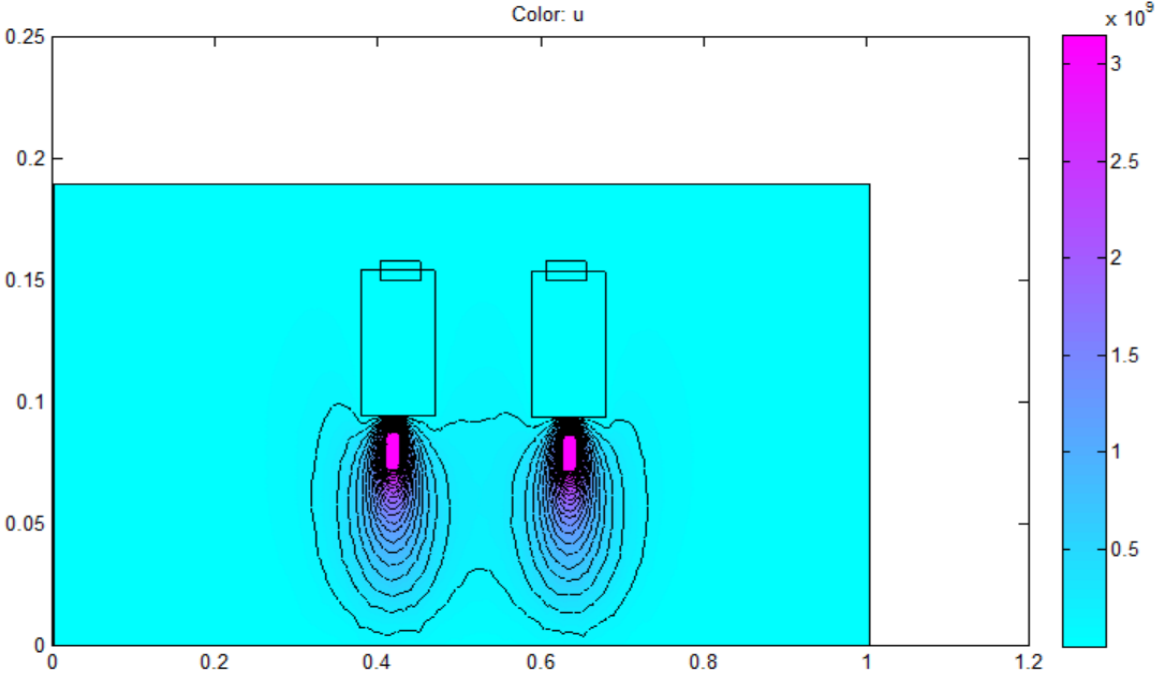


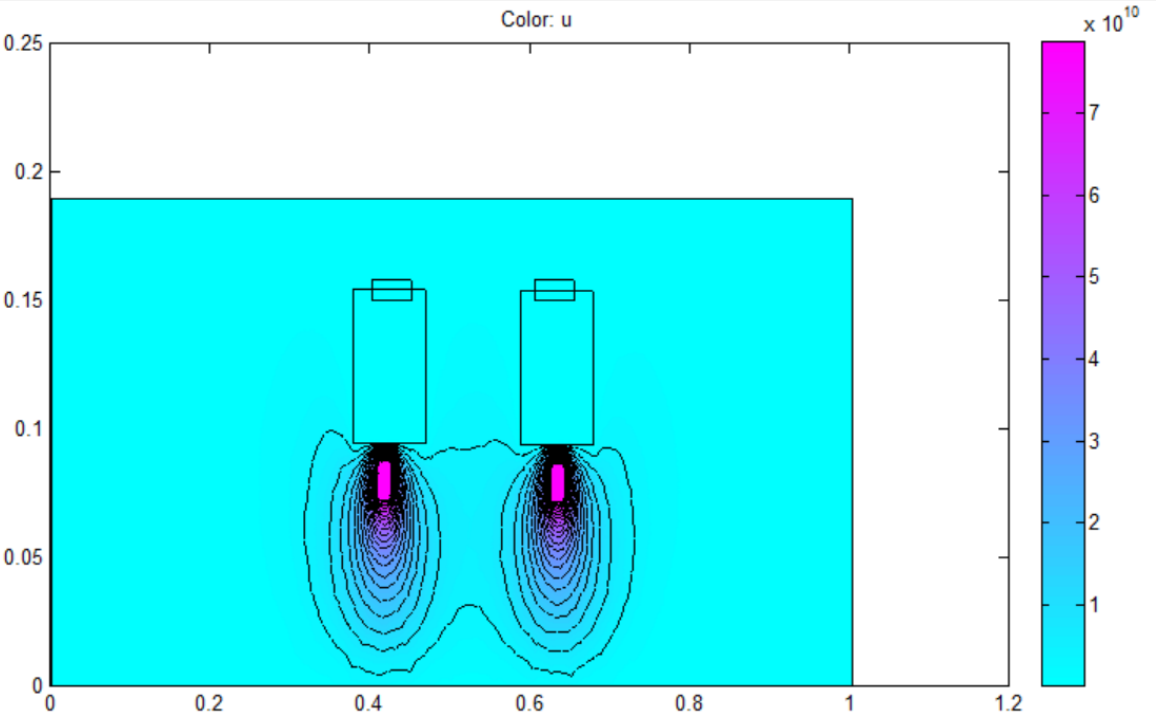
Figure IV 9: Température pour $\mu r = 1$

Même en changeant la fréquence, la température reste beaucoup trop importante. Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone



La température est beaucoup trop importante. Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.



Le résultat de la température reste toujours trop élevé. Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

$J_{s1} = 2.35 \cdot 10^6 \text{ [A/mm}^2\text{]}$; $\sigma = 5.9 \cdot 10^7 \text{ [\Omega.m]}^{-1}$; $f = 1500 \text{ Hz}$

μ_r	A(T/m)	B(T/m)	H(T/m)	T (°C)	Q(J)
1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.14	$12 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^5$	$1.63 \cdot 10^{10}$
200	0.4	35	$14 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^9$	$4.18 \cdot 10^{14}$
1000	2	180	$14 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.04 \cdot 10^{16}$

Tableau IV 11: Potentiel vecteur magnétique A, B, H et paramètres thermiques Q et T en fonction de μ_r

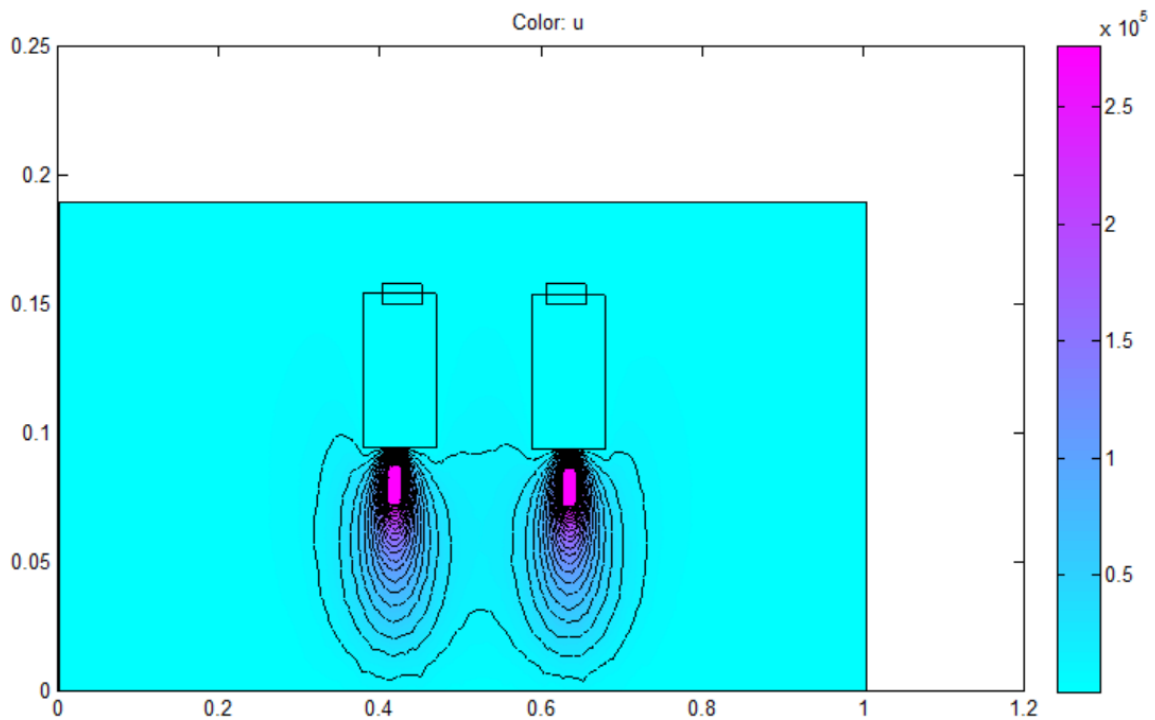


Figure IV 12: Température pour $\mu_r = 1$

Avec l'augmentation de la fréquence à 1500hz, la température est toujours trop importante. Elle dépasse la température de fusion du cuivre, donc nous devons changer la densité de courant.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

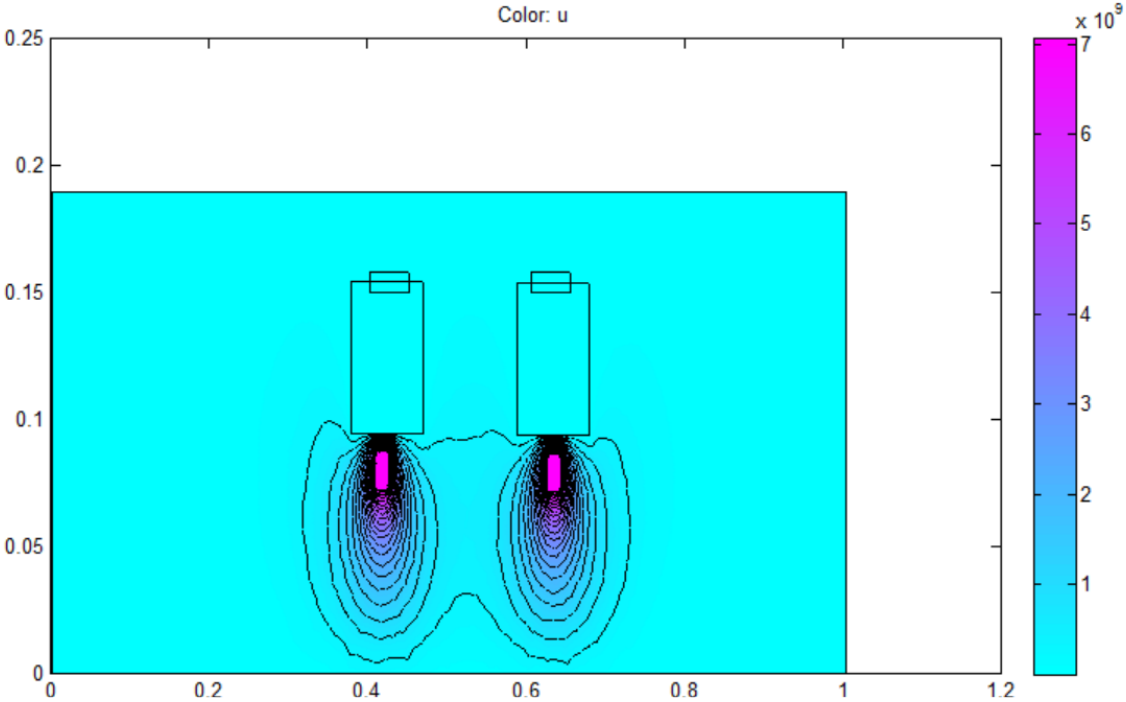


Figure IV 13: Température pour $\mu_r= 200$

Le résultat est faux car la température est trop élevée.

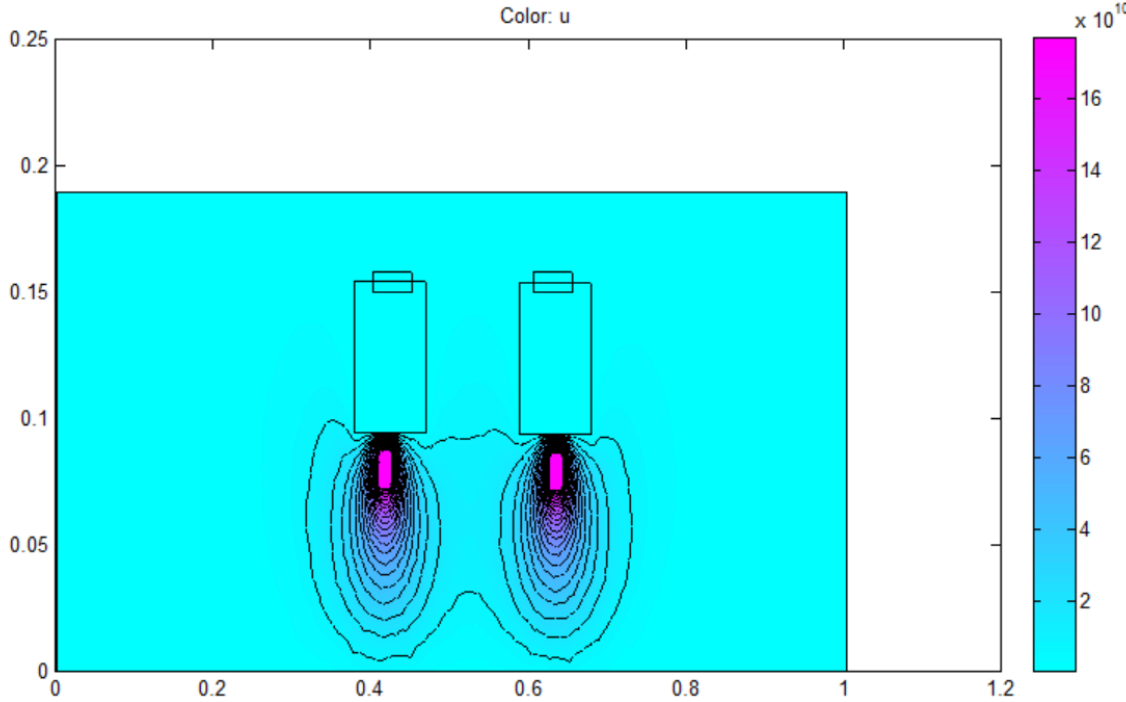


Figure IV 14: Température pour $\mu_r= 1000$

La même chose ici, le résultat est faux parce que la température est beaucoup trop élevée.

Pour Js1, la température est trop importante elle dépasse celle de la soudure à 500 Hz

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

A $f = 200$ Hz, $\mu r = 1$, toujours trop importante donc résultat faux.

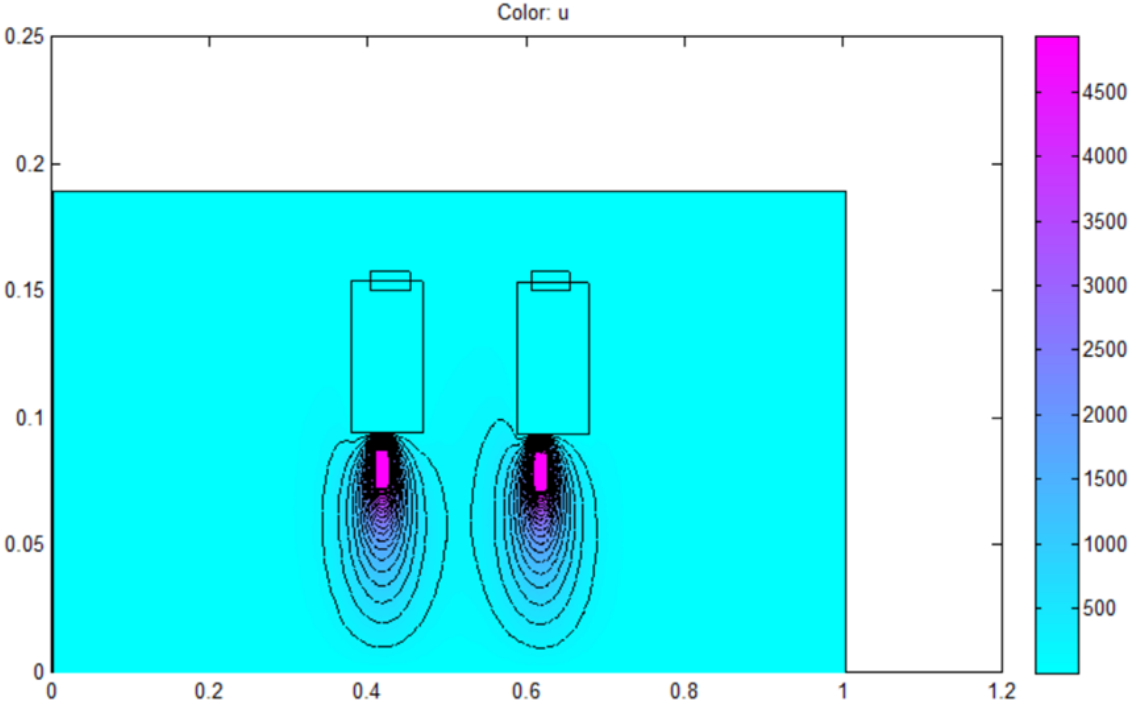


Figure IV 15: Température à 200Hz pour $\mu r=1$

A $f = 200$ Hz, $\mu r = 1500$, toujours trop importante donc le résultat de la température est faux.

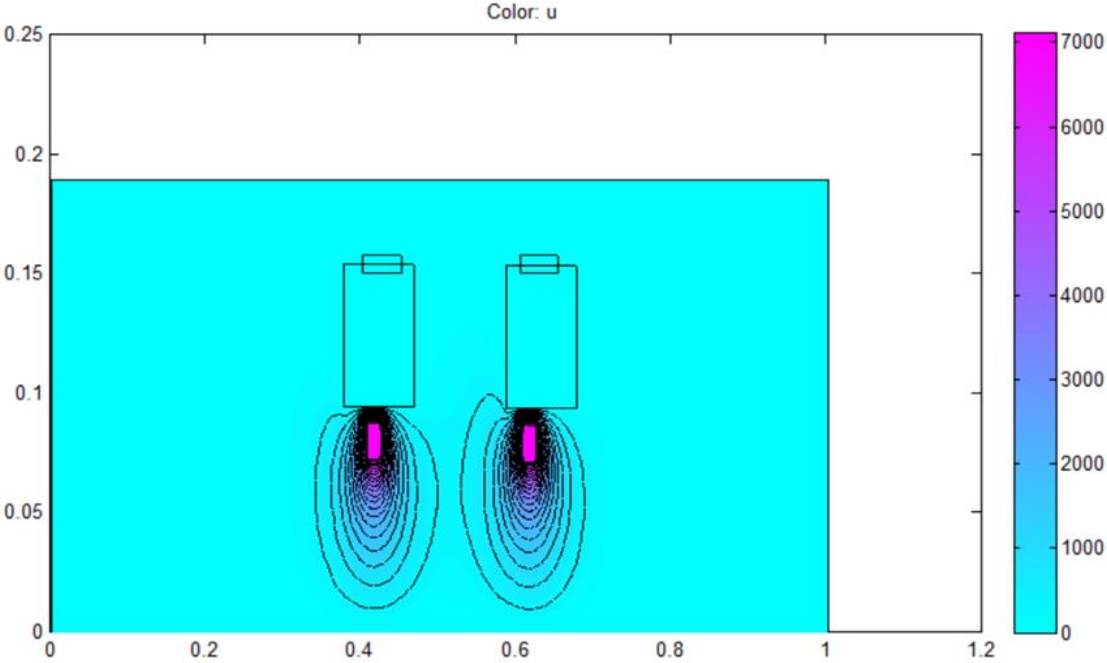


Figure IV 16: Température à 200 Hz pour $\mu r=1500$

Conclusion, Js1 n'est pas adapté.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

➤ On prend un nouveau Js :

$J_{s2} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ [A/mm}^2\text{]}$; $f=500\text{HZ}$; $\sigma = 5.9 \cdot 10^7 \text{ [\Omega.m]}^{-1}$ (Cuivre) ; $A=2.5 \cdot 10^{-4} \text{ [T]}$.

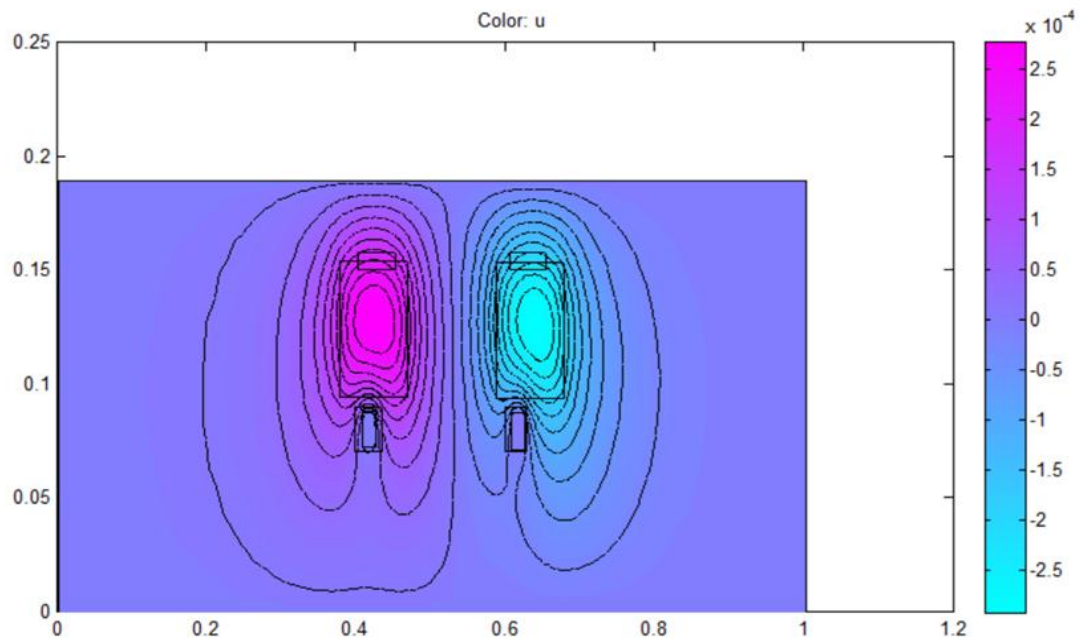


Figure IV 17: Répartition du potentiel vecteur magnétique A

Température durant 150 secondes

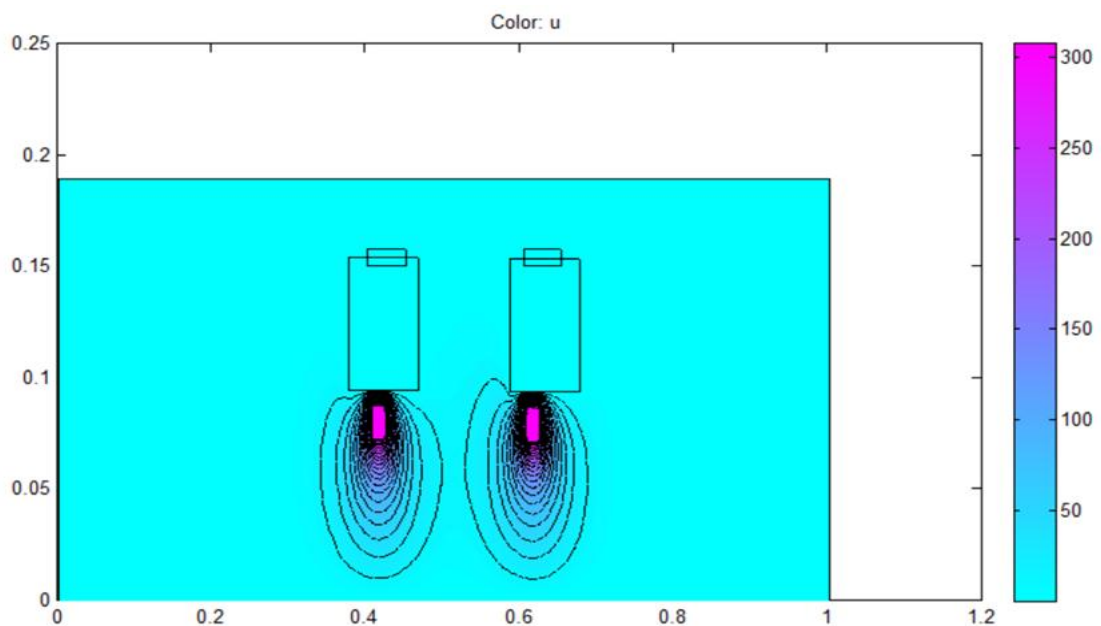


Figure IV 18: Température du cuivre à 500 Hz

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

F = 850HZ ; Température durant 150 secondes

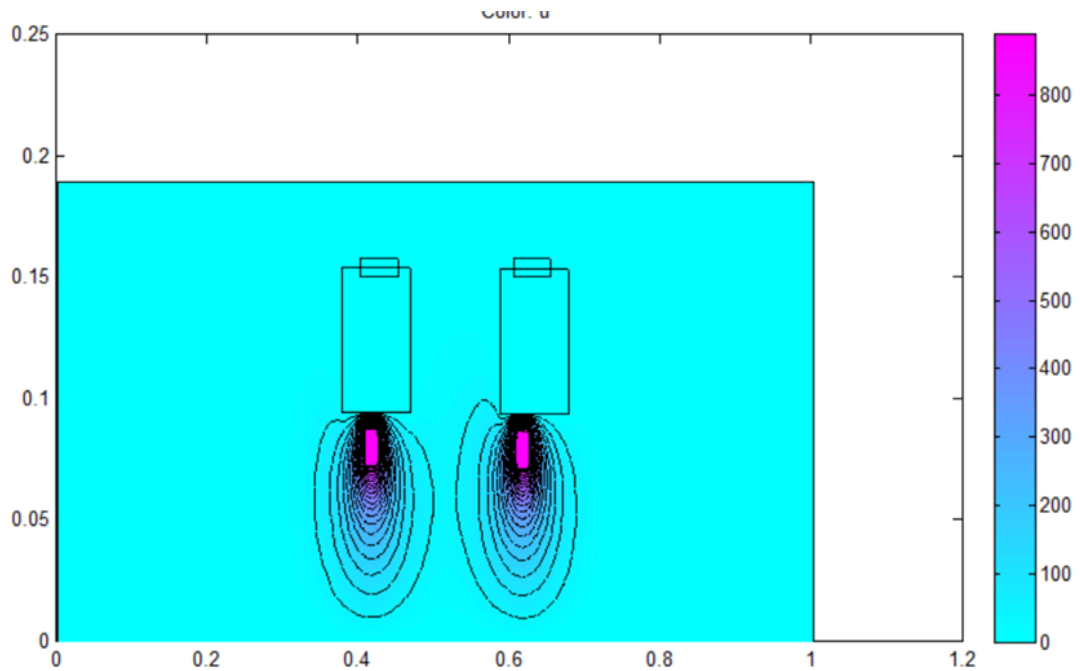


Figure IV 19: Température du cuivre à 850 Hz

La soudure du cuivre se fait à une température de 800°C

Les paramètres à exploiter sont : $J_{s2} = 2.5 \cdot 10^5$ [A/mm²] ; $f=850$ Hz ;

$\sigma = 5.9 \cdot 10^7$ [$\Omega \cdot m$]⁻¹ ; $A=2.5 \cdot 10^{-4}$ [T].

F = 1000 Hz ; Température durant 150 secondes

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

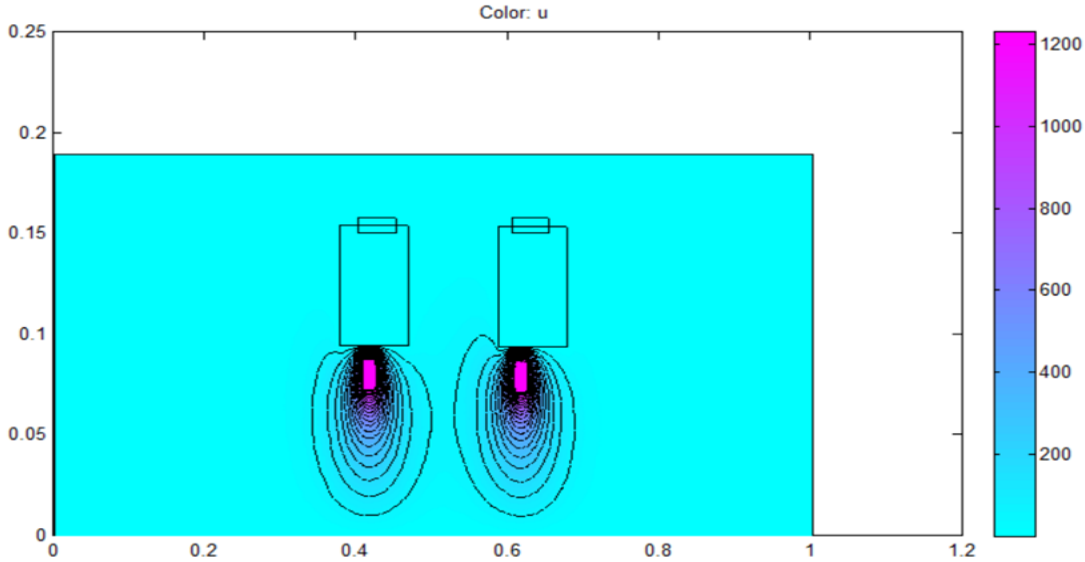


Figure IV 20: Température du cuivre à 1000 Hz

Pour $\sigma = 3.4 \cdot 10^7 \text{ } [\Omega \cdot m]^{-1}$ (ALUMINIUM). $J_{s2} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ } [A/mm^2]$
Fréquence = 850Hz ; $C_p = 897 \text{ } (J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1})$

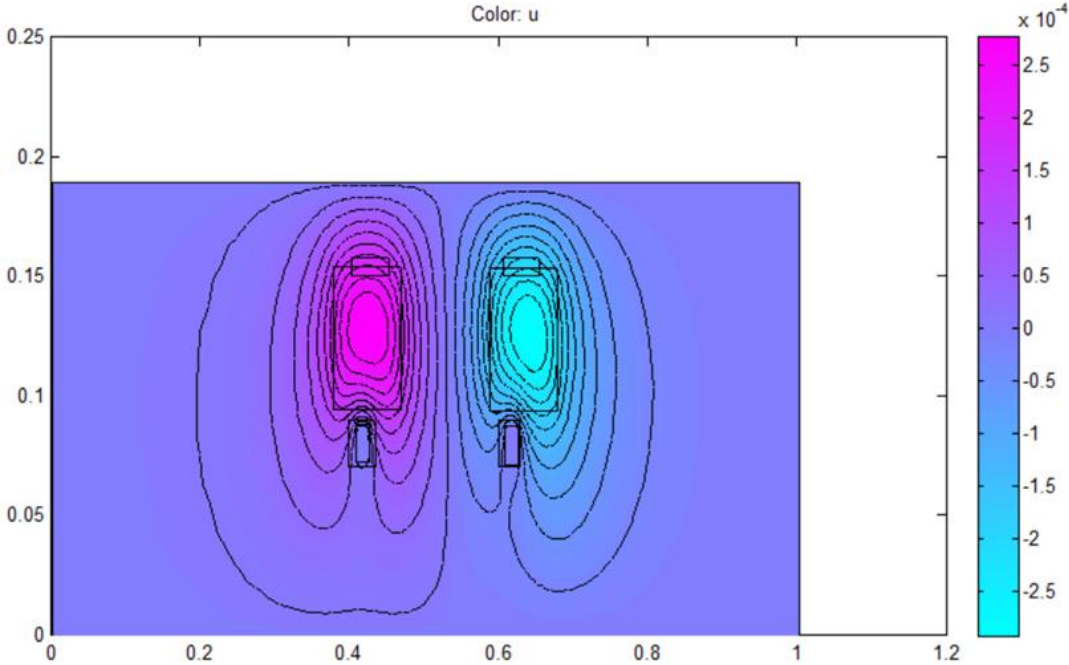


Figure IV 21: Répartition du potentiel vecteur magnétique A

La valeur de $A = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ } [T]$ ne change pas pour les trois fréquences

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

F = 850 Hz

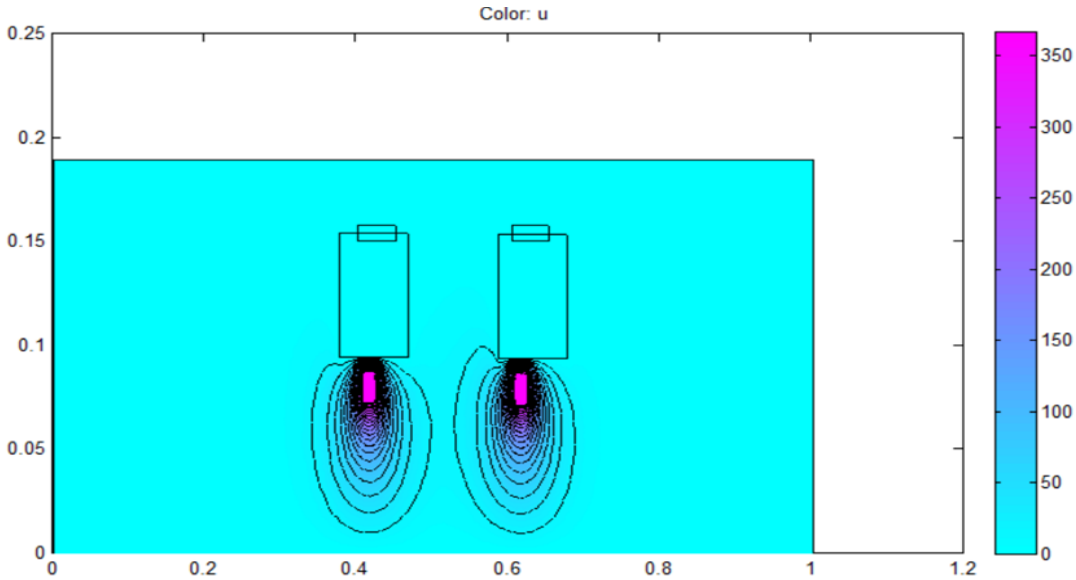


Figure IV 22: Température de l'aluminium à 850 Hz

F = 1000 Hz

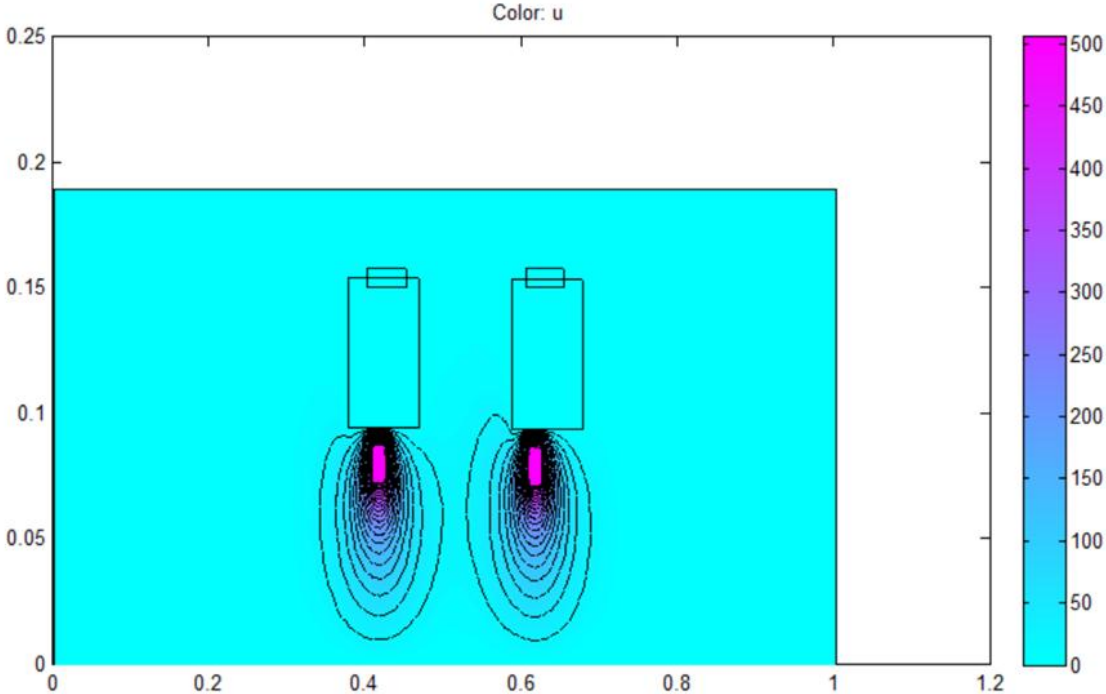


Figure IV 23: Température de l'aluminium à 1000 Hz

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

F = 1100 Hz

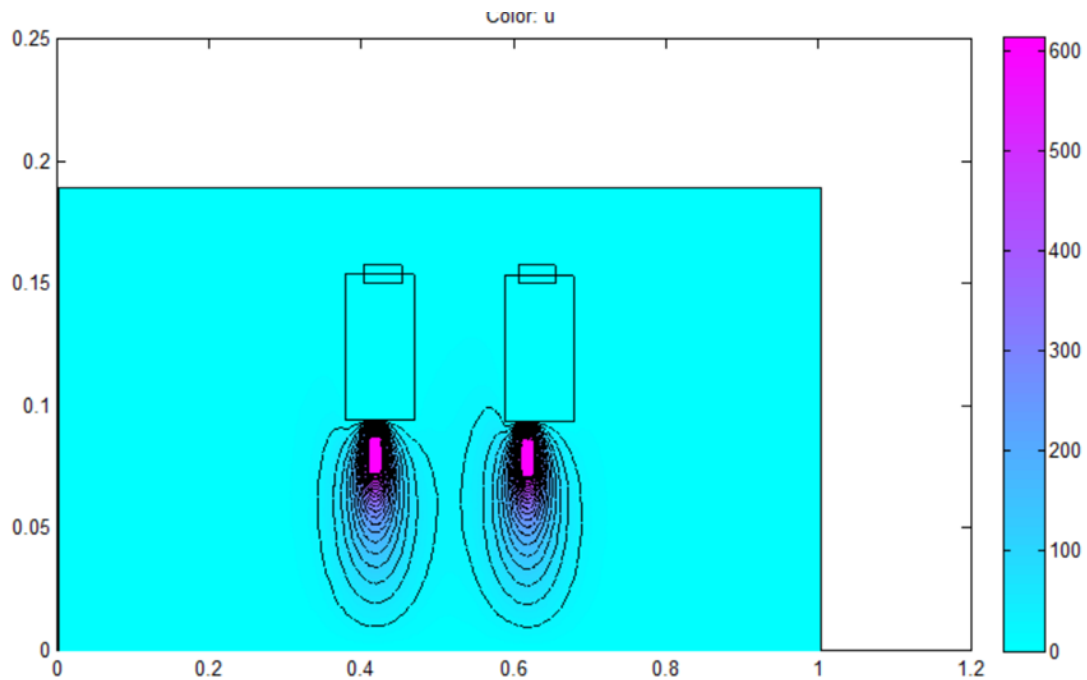


Figure IV 24: Température de l'aluminium à 1100 Hz

La soudure de l'aluminium se fait à une température de 1100 Hz

Les paramètres à exploiter sont : $J_{s2} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ A/mm}^2$; $f = 1100 \text{ Hz}$;

$\sigma = 3.4 \cdot 10^7 \text{ } [\Omega \cdot m]^{-1}$; $A = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ [T]}$.

On conclut donc que le J_{s2} est correct.

Calcul de 10 Δt pour tracer $T=f(\Delta t)$ pour les deux matériaux :

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

Δt (s)	T°C	
	CUIVRE	ALUMINIUM
10	55	40
25	140	100
40	220	160
55	300	220
70	400	250
85	500	300
100	550	400
115	600	450
135	700	500
150	800	600

Tableau IV 12: Valeurs de température du cuivre et de l'aluminium en fonction du temps

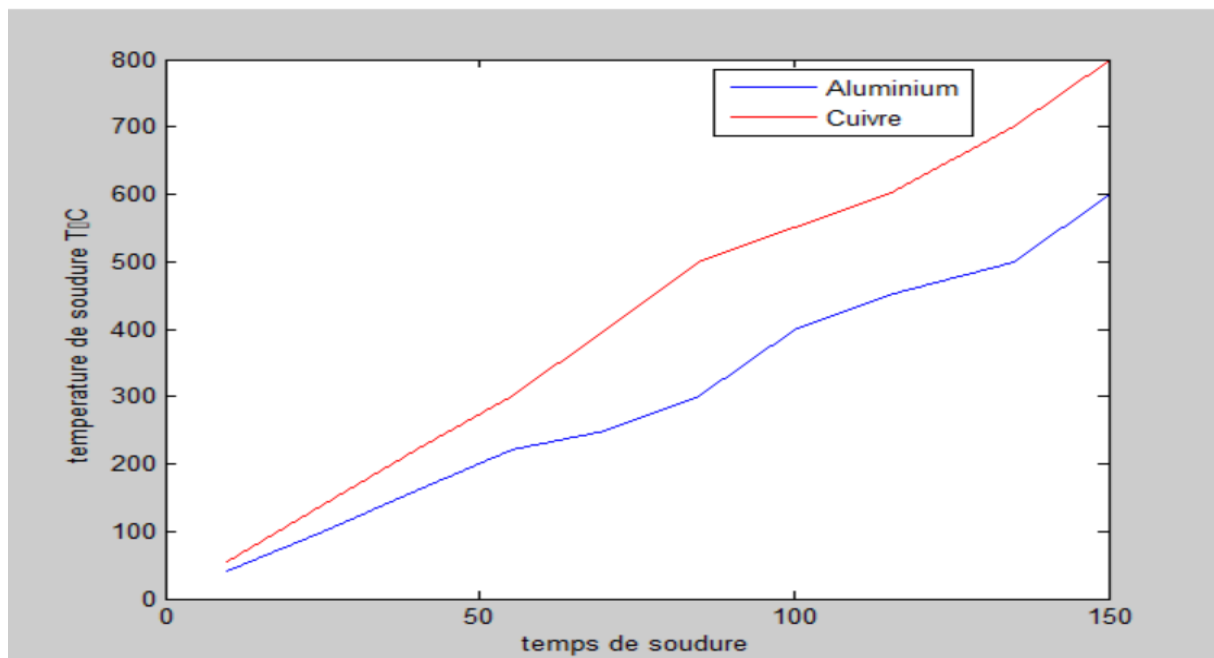


Figure IV 25: Variation de la température en fonction du temps.

CHAPITRE IV Détermination des températures et du temps de soudages des couronnes du moteur asynchrone

Interprétation

On remarque qu'on atteint la plage de soudage de l'aluminium avant la plage de soudage du cuivre, ce qui signifie que plus la conductivité électrique diminue plus la résistivité augmente, donc des courants induits plus importants, ce qui engendre un échauffement plus rapide.

VIII Conclusion

Pour Js1, la température est trop importante elle dépasse celle de la soudure à 500 Hz.

Donc quelque soit la valeur de la fréquence et de la perméabilité relative μ_r , la température reste toujours trop élevée, ce qui signifie que Js1 n'est pas adapté.

Avec le nouveau Js on a atteint la température de soudure du cuivre à 850 Hz et la température de l'aluminium à 1100 Hz donc Js2 est adapté.

Ce qui confirme que le problème venait du courant d'excitation Js.

Conclusion Générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire s'est déroulé en plusieurs étapes. Tout d'abord, une recherche bibliographique sur le chauffage par induction a été effectuée. Ensuite, une étude complète de l'installation de brasage par induction à rotor en cage utilisée par l'entreprise Électro-Industries a été réalisée et son principe de fonctionnement a été présenté.

Dans un deuxième temps, un calcul numérique de la température de brasage et de l'effet de la variation de la fréquence sur la répartition et la valeur de la température a été mené en utilisant la méthode des éléments finis, grâce au logiciel PDETOOL sous MATLAB. Il a été conclu que, pour le brasage par induction, la fréquence doit se situer dans les plages de moyennes fréquences.

Un programme de calcul par éléments finis pour l'évolution de la température en régime transitoire a été utilisé et appliqué à l'étude de l'évolution de la température à l'intérieur de la couronne (anneau de court-circuit). Plusieurs calculs ont été réalisés afin de déterminer la valeur optimale de la densité de courant nécessaire pour chauffer l'installation de brasage jusqu'à sa température de fonctionnement, qui est de l'ordre de 800°C.

Les résultats de la résolution de l'équation de la température pour différentes fréquences ont été représentés pour un point spécifique du barreau de court-circuit. L'effet de la conductivité des matériaux sur la température de chauffage a également été étudié afin de prévoir le brasage de différents matériaux, tels que le cuivre et l'aluminium.

Références Bibliographiques

- [1] Chauffage par induction électromagnétique : principes : Principe et spécificités | Techniques de l'Ingénieur (arn.dz), site web, Gérard Develey, 10 février 2000.
- [2] Contribution à l'étude et à la commande d'un système de chauffage par induction polyphasé - oatao (univ-toulouse.fr) , site web, Abdoul Majid Souley Madougou, Thèse 2011.
- [3] Chauffage par induction : quels sont les avantages ? (totalenergies.fr) site de TotalEnergies .
- [4] Quels Sont Les Différents Types De Fours À Induction ? - Kintek Solution (kindle-tech.com)
- [5] 411-0169-13.pdf (ambrell.com)
- [6] ed4211 (1).pdf, site de l'institut national de recherche et de sécurité, Février 2021
- [7] Four électrique à arc – Média LAROUSSE
- [8] Cahier de charge du four à induction de l'entreprise E.I (électro-industries)
- [9] M. BOUTELDJA, T.LADJEL « Etude d'une installation de brasage par induction de rotor a cage d'un moteur asynchrone », Mémoire de fin d'étude, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU 2008
- [10] Livre : "Manuel du soudeur" par Bernard Gentils. Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2008.
- [11] Livre : "Soudage à l'arc et soudage plasma : techniques et applications", Klas Weman, 2013
- [12] Livre : "Maintenance des moteurs électriques", Alain Girod, Dunod, 2013
- [13] Livre : "Ingénierie de la fabrication des machines électriques", Philippe Vigoureux, Éditions Hermès, 2009
- [14] Z. OUDNI , « Régulation par la température de Curie de chauffage par induction d'une plaque ferromagnétique », Thèse magistère, UMMTO, 2007.

Résumé :

Notre mémoire se compose de 4 parties. Premièrement, l'état de l'art sur le chauffage à induction et le soudage des couronnes des moteurs asynchrones. Deuxièmement, la présentation du four à induction d'Electro-Industries : constitution, fonctionnement et performances. Troisièmement, la modélisation numérique pour la résolution des équations aux dérivées partielles et à la résolution du problème magnétothermique (couplage magnétique et thermique). Quatrièmement, la détermination des températures et du temps de soudures des couronnes du moteur asynchrone.

Summary :

Our thesis consists of four parts. First, the state of the art on induction heating and the welding of the crowns of asynchronous motors. Second, the presentation of the induction furnace from Electro-Industries: its structure, operation, and performance. Third, numerical modeling for solving partial differential equations and addressing the magnetothermal problem (magnetic and thermal coupling). Fourth, the determination of temperatures and welding times for the crowns of asynchronous motors.