

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER académique

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Option : **Machines électriques**

Thème

**Modélisation et simulation numérique d'un couplage
magnétothermique d'une machine à réluctance variable**

Présenté par :

SIDANI Syphax
BETTACHE Mohamed

Encadré par :

ALITOUCHE Karim

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous exprimons notre reconnaissance envers le bon Dieu le tout-puissant pour nous avoir accordé la santé et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons, avant tout, à exprimer notre reconnaissance à notre encadrant Mr ALITOUCHE Karim pour avoir proposé ce sujet et accepté de nous encadrer. Nous le remercions pour son implication, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail et pour le temps précieux qu'ils y consacré.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude envers l'ensemble des enseignants en électrotechnique qui ont contribué à notre formation. Merci à eux pour leur enseignement et leur soutien.

Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères, à mes chers parents et à mes frères et sœurs. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez prodigués depuis mon enfance. J'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours. Que Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie et fasse en sorte que je ne vous déçoive jamais.

En particulier, à mon très cher binôme SIDANI Syphax, pour sa patience, sa complicité, son soutien moral, ses précieux encouragements pendant toutes nos études, et plus particulièrement durant la période de préparation de ce travail

Enfin, à toutes personnes qui m'ont encouragé ou aidé tout au long de mes études.

BETTACHE Mohamed

Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères de ma vie : mes chers parents, mon frère et ma sœur. Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon bien-être.

Je vous remercie infiniment pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez témoignés depuis mon enfance. J'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours. Que Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie, et veille à ce que je ne vous déçoive jamais.

En particulier, un immense merci à mon très cher binôme BETTACHE Mohamed pour sa patience, sa complicité, son soutien moral et ses précieux encouragements tout au long de nos études ensemble, notamment durant la préparation de ce travail.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui m'ont encouragé ou aidé au cours de mes études.

SIDANI Syphax

Listes des figures

Chapitre I

Figure I-1 Prototype d'une MRV.....	4
Figure I-2 Arbre généalogique des machines à courant alternatif.....	5
Figure I-3 Consitution de base de la MRV.....	6
Figure I-4 Structure élémentaire d'une machine à réluctance variable	6
Figure I-5 Position d'opposition	8
Figure I-6 Position de conjonction	8
Figure I-7 Variation du couple en fonction de la position.....	8
Figure I-8 Variation du flux en fonction du courant.....	9
Figure I-9 Machine à grosses dents.....	11
Figure I-10 Machine à petites dents.....	12

Chapitre II

Figure II-1 Discrétisation par éléments finis en deux dimensions.....	19
Figure II-2 Vue en coupe de la MRV6/4 étudiée.....	20
Figure II-3 Courbe de magnétisation pour l'acier.....	22
Figure II-4 Bibliothèque des matériaux.....	23
Figure II-5 Définition du nom du circuit.....	24
Figure II-6 Propriétés du circuit.....	24
Figure II-7 Propriétés du bloc sélectionné.....	24
Figure II-8 Définition de la condition aux limites.....	25
Figure II-9 Propriétés de la condition aux limites.....	25
Figure II-10 Affectation de la condition aux limites appropriée.....	26
Figure II-11 Position de conjonction.....	27
Figure II-12 Position d'opposition.....	27

Figure II-13 Variation des pertes Joule et des pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant $I=5A$	31
Figure II-14 Evolution des pertes Joule et des pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant $I=8A$	31
Figure II-15 Evolution des pertes Joule et des pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant $I=10A$	32
Figure II-16 Région statorique.....	32
Figure II-17 Région rotorique.....	32

CHAPITRE III

Figure-III-1 Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur.....	36
Figure-III-2 La diffusivité thermique.....	39
Figure-III-3 Schématisation du transfert convectif dans l'entrefer.....	43
Figure-III-4 Ecoulement laminaire de Taylor-Couette.....	44
Figure-III-5 Seconde Instabilité de l'écoulement.....	45
Figure-III-6 La convection naturelle dans une machine électrique.....	45
Figure-III-7 La convection forcée dans la MRV.....	46
Figure-III-8 Bilan thermique sur un système élémentaire.....	49
Figure III-9 Création d'un nouveau problème.....	54
Figure III-10 Vue en coupe d'une MRV 6/4.....	54
Figure III-11 Bloc des propriétés thermiques d'un matériau.....	55
La figure III-12 Résultats de la répartition des températures dans la MRV	56
Figure III-13 Variation de la température dans les différentes régions de la MRV en fonction de la vitesse pour un courant $I=5A$	57
FigureIII-14 Evolution de la température dans des différentes régions de la MRV en fonction de la vitesse pour un courant $I=8A$	58
Figure III-15 Evolution de la température dans des différentes régions de la MRV en fonction de la vitesse pour un courant $I=10A$	59
Figure III-16 Evolution de la température en fonction de la longueur radiale de la MRV.....	60

Figure III-17 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV pour N=1000 tr/mn.....	60
Figure III-18 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV pour N=3000 tr/mn.....	61
Figure III-19 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV Pour N=5000 tr/mn.....	61
Figure III-20 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV Pour N=6000 tr/mn.....	62
Figure III-21 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV Pour N=7000 tr/mn.....	62
Figure III-22 Evolution de la température à différents courants selon la longueur radiale de la MRV pour N=8000 tr/mn.....	63
Figure III-23 Evolution de la température à différentes vitesses en fonction de la longueur radiale de la MRV Pour I=5A.....	64
Figure III-24 montre l'évolution de la température à différentes vitesses en fonction de la longueur de la MRV Pour I=8A.....	65
Figure III-25 Evolution de la température à différentes vitesses en fonction de la longueur de la MRV Pour I=10A.....	65

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II-1 Les paramètres géométriques de la machine.....	20
Tableau II-2 Matériaux utilisés dans la MRV.....	21

Chapitre III

Tableau III-1 Diffusivité thermique de métaux à 20 °C.....	40
Tableau III-2 Comparaison des modes de transfert thermique.....	48
Tableau III-3 les matériaux utilisé dans la machine et leurs caractéristiques.....	55
Tableau III-4 Températures moyennes dans les différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant $I=5A$	56
Tableau III-5 Températures moyennes dans les différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant $I=8A$	57
Tableau III-6 Températures moyennes dans les différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant $I=10A$	58

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les machines à reluctance variable	
Introduction	4
I.1 Classification des MRV	4
I.2 Structure de base d'une MRV et principe de fonctionnement	5
I.2.1 Constitution.....	5
I.2.2 Principe de fonctionnement	6
I-3 Les différents types de la MRV	10
I-3-1 MRV à stator lisse :	10
I-3-2 Machine à double denture	11
I.4 Domaines d'utilisation	12
I-4-1 Utilisation en moteurs pas à pas	12
I-4-2 Utilisation en moteur à vitesse variable	12
I-5 Place de la machine à reluctance variable dans le monde industriel	13
I-5-1 Avantages	13
I-5-2 Inconvénients	13
I-6 Conclusion	14
Chapitre II : Modèle magnétique et simulation numérique de la MRV6/4	
II-1 Introduction	16
II-2 Modélisation magnétique de la MRV6/4	16
II-3 Simulation numérique du problème magnétique :	18
II-3-1 Présentation de l'outil de calcul	18
II-3-2 Présentation de la géométrie de la MRV6/4 étudiée.....	19
II-3-2-1 Dimensions géométriques de la MRV	20
II-3-2-2 Matériaux assignés aux différentes régions de la MRV	21
II-4 Simulation par éléments finis de la MRV6/4 :	21
II-4-1 Régions homogènes de la MRV	21
II-4-2. Equations associées à chaque région	22
Dans ce qui suit, nous présentons les équations à résoudre dans chaque région homogène de la machine étudiée.	22
II-5 Etapes de la simulation sur FEMM	23
II-5-1 Définition du problème magnétique	23
II-5-2 Conditions aux limites :	25
II-5-3 Lignes de champ pour les deux positions extrêmes et maillage	26

II-6 Analyse des pertes dans la MRV.....	28
II-6-1 Pertes Fer	28
I-6-2 Pertes Joule.....	29
II-6-3 Calcul des pertes Joule dans la machine étudiée	30
II-6-4 Calcul des pertes fer dans la machine étudiée.....	30
II-7 Conclusion.....	33
Chapitre III : Modélisation thermique et simulation numérique de la MRV	
III-1 Introduction.....	35
III-2 Définition des grandeurs	35
III-3 Mode du transfert de la chaleur	36
III-3-1 La conduction	36
III-3-2 La convection	37
III-3-3 Le rayonnement	37
III-4 Lois fondamentales du transfert de la chaleur	38
III-4-1 Loi de la conduction (loi de J. Fourier)	38
III-4-2 La diffusivité thermique	39
III-4-3 Loi de la convection	41
III-4-3-1 Nombre de Nusselt (Nu)	41
III-4-3-2 Nombre de Prandtl (Pr)	41
III-4-3-3 Nombre de Reynolds (Re).....	41
III-4-3-4 Nombre de Rayleigh (Ra)	41
III-4-3-5 Nombre de Grashof	42
III-4-3-6 Nombre de Taylor	42
III-4-4 Transfert convectif dans l'entrefer	42
III-4-4-1 Facteurs Influant sur le transfert convectif.....	43
III-4-4-1-1 Géométrie de l'entrefer.....	43
III-4-4-1-2 Propriétés du fluide	43
III-4-4-1-3 Températures de fonctionnement :.....	43
III-4-4-2 Régimes d'écoulement.....	44
III-4-4-2-1 Écoulement Laminaire	44
III-4-4-2-2 Écoulement Turbulent.....	44
III-4-5 Convection naturelle dans les machines électriques.....	45
III-4-5-1 Principe de la convection naturelle	45
III-4-5-2 Convection forcée dans la MRV	46
III-4-5-3 Mécanisme de convection forcée	46

III-4-5-4 Avantages de la convection forcée dans les MRV	46
III-4-6 Lois du rayonnement thermique :	47
III-4-6-1 Le rayonnement électromagnétique :	47
III-4-6-2 Loi de Wien	47
III-4-6-3 Loi de Stefan-Boltzmann	47
III-4-6-4 Loi de Planck	48
III-5 Comparaison des modes de transfert	48
III-6 Modèle thermique de la MRV6/4	49
III-6-1 Equations de transfert de chaleur par conduction	49
III-6-2 Condition aux limites	51
III-6-2-1 Condition de Neumann	51
III-6-2-2 Condition de Dirichlet	52
III-7 Méthodes pour résoudre le problème de transfert thermique	52
III-8 Simulation thermique de la MRV6/4	54
III-8-1 Domaine d'étude de la MRV6/4 en mode problème de flux de chaleur	54
III-8-2 Conditions aux limites	54
III-9 Résultats de simulation	55
III-9-1 Influence du courant et de la vitesse de rotation sur l'échauffement de la machine	549
III-9-2 Evolution de la température selon la direction radiale de la machine pour différents courants de phase	72
III-9-3 Evolution de la température selon la direction radiale de la machine pour différentes vitesses de rotation	77
III-10 Conclusion	66
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	69

Introduction

Générale

Introduction générale

Les moteurs électriques représentent de plus en plus la charge électrique la plus importante, car ils sont utilisés dans tous les secteurs et ont un large domaine d'application. La majeure partie de l'énergie électrique est consommée par des moteurs synchrones ou asynchrones classiques, mais de nouveaux types de moteurs, comme les moteurs à réluctance variable, émergent également dans l'industrie.

Les machines à réluctance variable représentent une classe particulière de machines électromagnétiques dans lesquelles les forces sont obtenues grâce à la variation de la perméance du circuit magnétique. Cette variation est obtenue lors du déplacement relatif des deux parties constitutives : le stator et le rotor dans les machines électriques tournantes. Ces variations de perméance sont sources de variations d'énergie électromagnétique ou encore de variations de réluctance, de perméance ou d'inductance (vues du bobinage), d'où le nom de "machines à réluctance variable". Ainsi, le stator ferromagnétique supporte les bobinages, quant au rotor, qui ne possède aucun conducteur ni aimant, il a une denture destinée à faire varier l'inductance du circuit électromagnétique.

Les systèmes électromagnétiques sont régis par les équations de Maxwell lesquelles sont fonction du champ électromagnétique. La résolution de ces équations s'effectue par des méthodes de calcul qui peuvent être analytiques ou numériques. Les méthodes analytiques sont efficaces mais limitées par la complexité géométrique, ce qui n'est pas le cas pour les méthodes numériques qui sont en plein essor grâce au développement de l'outil informatique. Parmi ces méthodes on retiendra la (M.E.F) qui est fortement développée. Elle est très adaptée à l'étude de géométrie complexe et aux traitements des systèmes non linéaires. De plus elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes souvent rencontrés dans la pratique de l'ingénieur [19].

La modélisation magnétique de ces machines (MRV) permet d'analyser l'évolution du champ magnétique en fonction de la position du rotor. Ceci est essentiel pour comprendre et optimiser les performances de la machine. La modélisation thermique permet d'évaluer la dissipation thermique due aux diverses pertes afin de garantir la fiabilité et la longévité de la machine. La relation entre la modélisation magnétique et thermique dans les machines à réluctance variable est indissociable car les pertes magnétiques peuvent générer de la chaleur, dégrader les performances magnétiques et créer des contraintes thermiques. L'approche

intégrée permet de développer des machines plus efficaces prenant en compte les interactions complexes entre champs magnétiques et phénomènes thermiques, optimisant ainsi les performances et la durabilité de ces dispositifs.

Dans ce travail, nous adopterons la méthode des éléments finis pour étudier le transfert thermique dans le moteur à réluctance variable (MRV) 6/4. Les calculs seront effectués en utilisant une combinaison de deux logiciels : MATLAB et FEMM (Finite Element Method Magnetics). Nous avons développé un programme sous Matlab pour analyser le comportement thermique d'un moteur à réluctance variable de type 6/4.

Ce mémoire décrit l'ensemble de notre travail et se compose de l'introduction présente ainsi que de trois chapitres :

Le premier chapitre est dédié à quelques généralités sur les machines à réluctance variable, incluant le principe de fonctionnement, les domaines d'utilisation, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation et la simulation magnétique de la MRV. Nous présenterons, également, le logiciel de calcul FEMM puis exposerons les différentes pertes dans le moteur MRV.

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation thermique d'une MRV 6/4. Nous débuterons par la présentation des différentes modes de transfert de chaleur, puis nous présenterons les résultats de la simulation de la MRV par la méthode numérique des éléments finis.

Enfin, nous conclurons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les

Machines à réluctance

variable

Introduction

La machine à réluctance variable (MRV) représente une avancée significative dans le domaine des machines électriques. Elle réunit des machines de structures différentes dont la propriété commune est la variation sensible de la forme de l'entrefer durant la rotation. Ces machines n'ont pas les mêmes performances et caractéristiques mais aussi ne sont pas aux mêmes usages.



Figure I-1 Prototype d'une MRV

I.1 Classification des MRV

Diverses classifications des machines à réluctance variable sont envisagées, selon le type d'énergie (alternatif ou continu), la géométrie de la machine, ou encore le type de mouvement (linéaire, rotatif, combiné).

Après plusieurs recherches bibliographiques, nous avons constaté que la machine à réluctance variable (MRV) peut fonctionner avec de l'énergie continue, comme la MRV pure à double saillance [3] [5] [6], ou avec de l'énergie alternative, comme la MRV synchrone [3], la MRV Vernier [3], MRV à petites dents, etc.

Certains chercheurs [3] [5] ont réussi à déterminer la place de la MRV dans l'arbre généalogique des machines électriques (figure I-2).

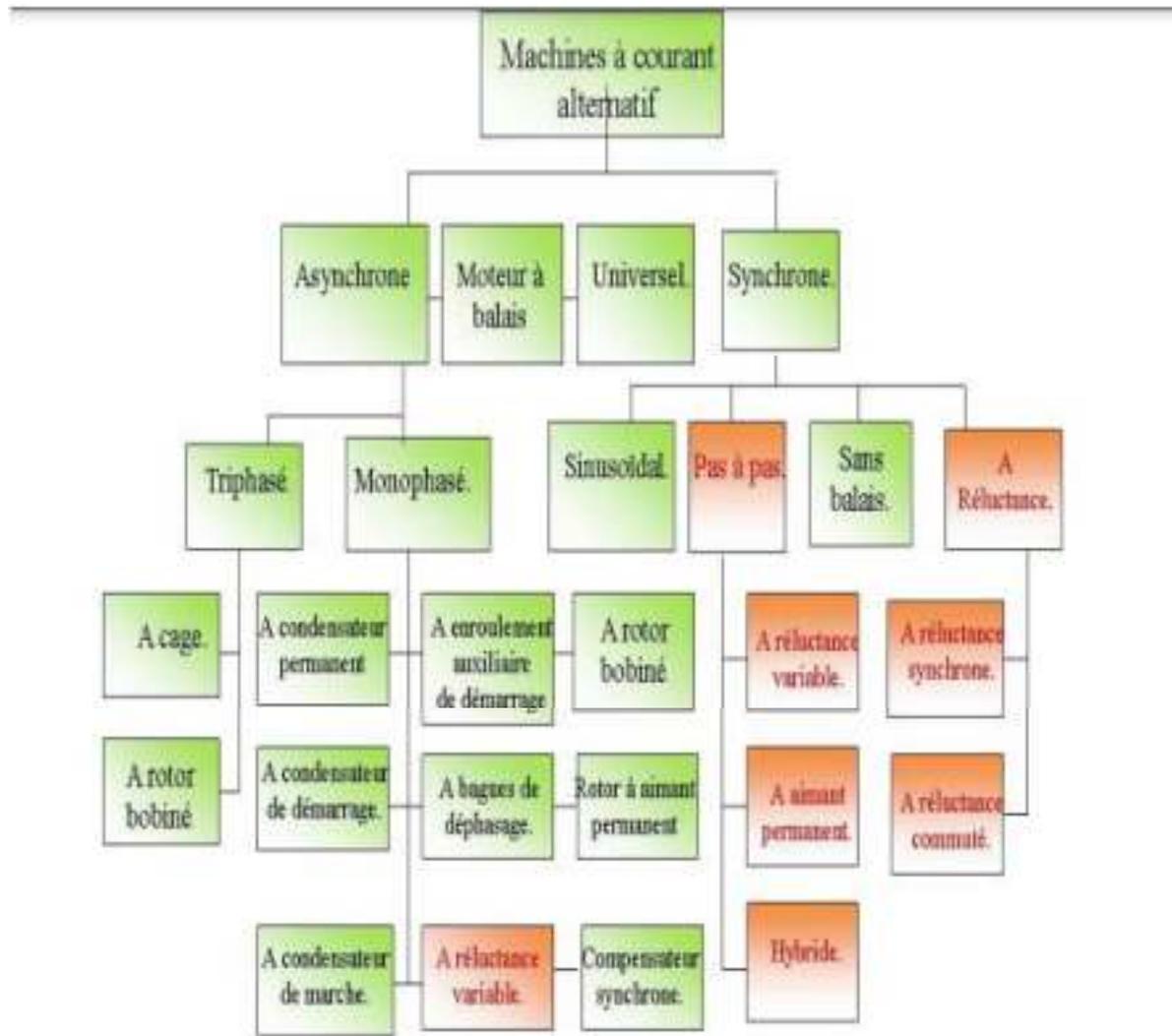


Figure I-2 Arbre généalogique des machines à courant alternatif

I.2 Structure de base d'une MRV et principe de fonctionnement

I.2.1 Constitution

La construction d'une machine à réductance variable (MRV) peut varier en fonction de la topologie et du design spécifique de la machine. Cependant, voici une description générale des principaux composants souvent utilisés dans la construction d'une MRV :

Stator : Le stator est la partie fixe de la machine et est généralement composé de tôles de fer empilées.

Les enroulements sont montés sur le stator pour générer le champ magnétique nécessaire.

Rotor : Le rotor est la partie mobile de la machine.

Dans une MRV, le rotor est souvent constitué de matériaux ferromagnétiques ayant une forte perméabilité magnétique.

Selon le type de MRV, le rotor peut être constitué de segments, de disques déformables, ou avoir des pôles variables.

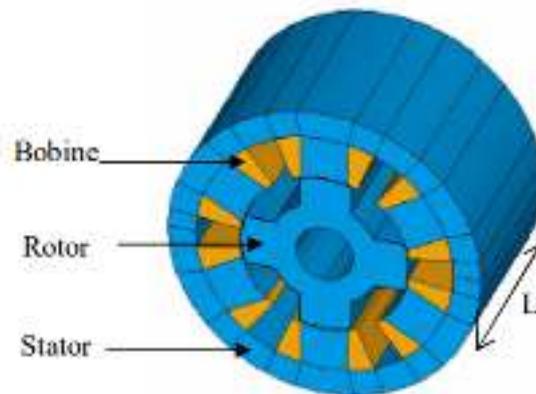


Figure I-3 Constitution de base de la MRV

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine à réluctance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée sur la figure I-4.

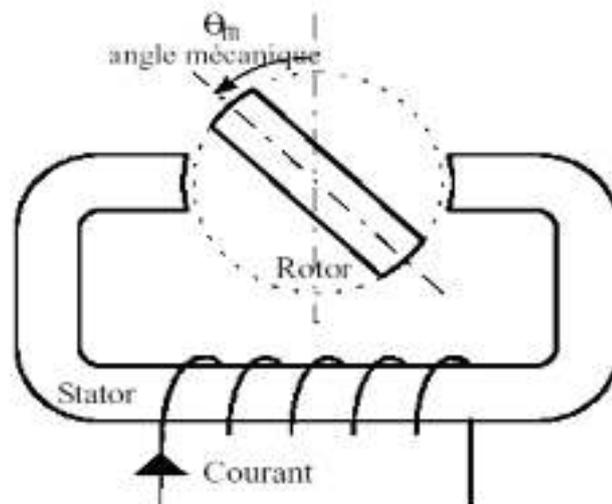


Figure I-4 Structure élémentaire d'une machine à réluctance variable

Le mouvement de la machine est obtenu par la tendance du rotor à s'aligner avec l'axe magnétique de la phase statorique alimentée.

Cette structure possède deux positions rotoriques remarquables :

A- Une position d'opposition pour laquelle le circuit magnétique présente une réductance maximale ou inductance minimale Figure (I-5).

B- Une position de conjonction où la réductance est minimale donc inductance maximale.

Figure (I-6) [2].

La période angulaire $\theta_{période}$ de l'inductance est déterminée par l'angle mécanique nécessaire pour que le rotor se retrouve dans une position électriquement identique à celle de départ. Cette période est donnée par :

$$\theta_{période} = \frac{2\pi}{PGCD(N_s, N_r)} \quad \mathbf{I-1}$$

- N_r : Nombre de dents au rotor.
- N_s : Nombre de dents au stator.
- PGCD : signifie le Plus Grand Commun Diviseur.

Le nombre de pas par tour est donné par:

$$N_p = 360(\alpha_1 - \alpha_2) \quad \mathbf{I-2}$$

Avec :

- α_1 : Pas dentaire rotorique (en degrés)
- α_2 : Pas dentaire statorique (en degrés)

L'angle électrique est donné par :

$$\theta_e = Nr \cdot \theta_m \quad \mathbf{I-3}$$

- θ_e : Angle électrique
- θ_m : angle mécanique
- Nr : Nombre de dents au rotor

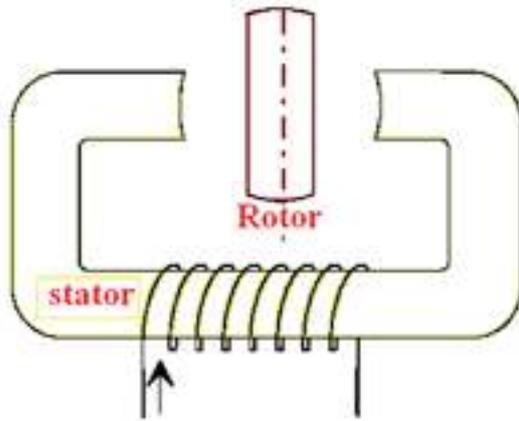


Figure I-5 : Position d'opposition

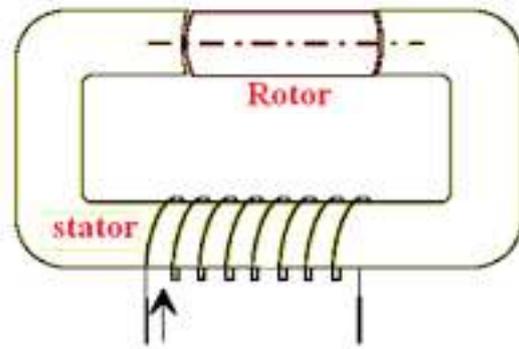


Figure I-6 : Position de conjonction

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction et si un courant est injecté dans l'armature fixe, ce dernier modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale, c'est-à-dire le passage du flux maximal entre les armatures.

Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on pourra répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation [2].

En résumé, le principe de fonctionnement de cette machine repose sur la variation de la réluctance magnétique du circuit en fonction de la position du rotor, ce qui permet de générer un couple variable en contrôlant cette position (voir figure I-7).

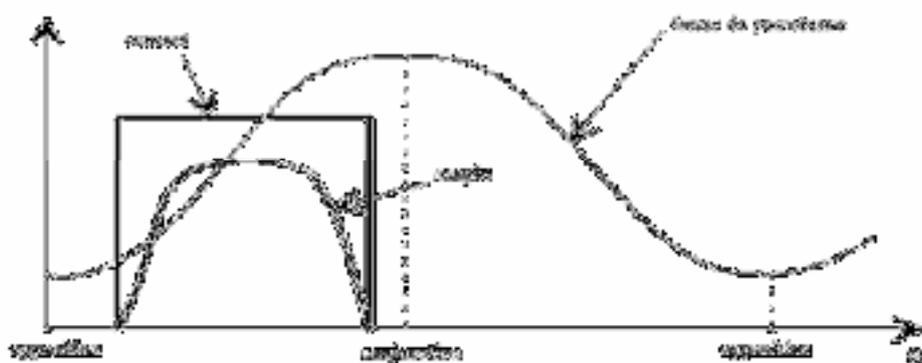


Figure I-7 Variation du couple en fonction de la position

A l'inverse l'alimentation de la phase lors de la croissance de la perméance engendre un couple négatif, ce qui est appelé fonctionnement frein de la MRV.

Le couple instantané d'une machine électromagnétique est donné par :

$$C = - \left. \frac{\partial W_{em}}{\partial \theta_m} \right|_{\Phi=cte} = -Nr. \left. \frac{\partial W_{em}}{\partial \theta_e} \right|_{\Phi=cte} \quad \text{I-4}$$

$$C = \left. \frac{\partial W'_{em}}{\partial \theta_m} \right|_{i=cte} = Nr. \left. \frac{\partial W'_{em}}{\partial \theta_e} \right|_{i=cte} \quad \text{I-5}$$

D'où

$$W_{em} = \int_0^{\Phi_0} ni. d\Phi \quad \text{Et} \quad W'_{em} = \int_0^{ni} \Phi. dni \quad \text{I-6}$$

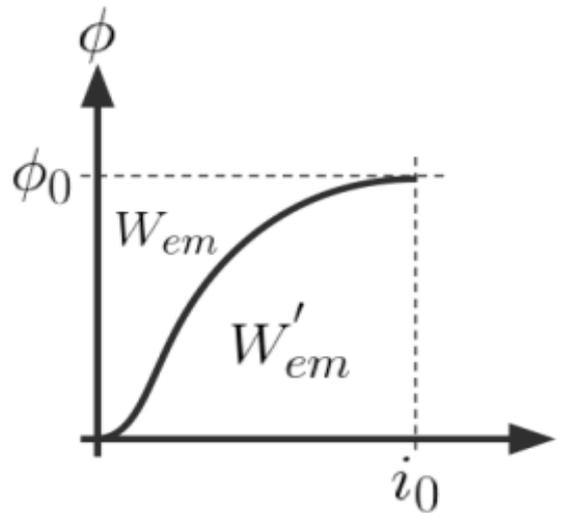


Figure I-8 Variation du flux en fonction du courant.

En régime linéaire, le flux est lié aux (ni) par la perméance P(θ) :

$$\Phi(\theta) = P(\theta).ni \quad \text{I-7}$$

$$W'_{em} = \int_0^{ni_0} P(\theta).ni. dni = \frac{1}{2} * ni^2 \quad \text{I-8}$$

Ce qui permet d'exprimer le couple par :

$$C = \frac{Nr}{2} * ni^2 * \frac{dP}{d\theta} \quad \text{I-9}$$

Par rapport à l'inductance de la phase L(θ) :

$$C = \frac{Nr}{2} * i^2 * \frac{d(n^2P)}{d\theta} = \frac{Nr}{2} * i^2 * \frac{dL}{d\theta} \quad \text{I-10}$$

De la même manière, si on impose le flux on obtient à partir de l'expression de l'énergie magnétique (I-5) le couple :

$$C = \frac{Nr}{2} n^2 * \Phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad \text{I-11}$$

Où $R(\theta)$ est la réluctance de la machine.

A partir de l'équation (I.10) on conclut que le signe du couple ne dépend pas du sens du courant. Donc on pourra utiliser un convertisseur unidirectionnel en courant pour alimenter la machine.

Lorsque la machine atteint le point de saturation, l'inductance de la phase ne dépend plus seulement de la position.

On doit calculer le couple à partir de l'énergie convertie lors d'un cycle d'alimentation.

La puissance électromagnétique convertie P_{em} s'exprime par :

$$P_{em} = f \cdot W \quad \text{I-12}$$

f : la fréquence électrique d'alimentation, on peut la calculer à partir de la pulsation de rotation du moteur Ω

$$f = N_r \frac{\Omega}{2\pi} \quad \text{I-13}$$

Ainsi le couple électromagnétique C_{em} vaut si le moteur comporte q phase :

$$C_{em} = \frac{q \cdot P_{em}}{\Omega} = q N_r \frac{W}{2\pi} \quad \text{I-14}$$

Cette relation permet de comprendre les performances de cette machine électrique, car elle relie directement le couple au nombre de phases, à la vitesse angulaire, et à la puissance électromagnétique.

I-3 Les différents types de la MRV

Les machines à réluctance variable se divisent, de part leur construction, en deux grandes catégories :

I-3-1 MRV à stator lisse :

Dans ce type de machine, le stator est cylindrique de révolution de rayon R_s dans lequel sont creusées des encoches destinées à loger les conducteurs. Le terme « stator lisse » est du

surtout à la faiblesse de la largeur des encoches au niveau de l'entrefer qui constituent une irrégularité locale négligeable dans la géométrie [1].

Cette machine à réluctance variable (MRV) fonctionne grâce au champ magnétique tournant produit par le stator polyphasé lisse. Le stator, dépourvu de pôles saillants, est muni de plusieurs enroulements répartis de manière à générer des champs magnétiques déphasés entre eux. Lorsque le courant polyphasé traverse ces enroulements, un champ magnétique tournant est créé. Ce champ magnétique interagit avec le rotor en modifiant la réluctance du circuit magnétique, entraînant ainsi la rotation du rotor. Le champ magnétique tournant généré par le stator lisse est donc important pour le fonctionnement et la performance de la MRV [1].

I-3-2 Machine à double denture

Ce sont des machines dont le stator et à grosses et petites dents. Les irrégularités locales dues au positionnement relatif des dents rotoriques et statoriques sont d'ailleurs la cause de la conversion d'énergie.

La figure (I-9) représente une machine à réluctance variable à double denture (chaque deux pôle diamétralement opposés reçoivent deux bobinages alimentés en série). Le rotor ne comporte ni conducteur électrique ni aimant, ce qui lui confère une grande robustesse et une extrême simplicité [1].

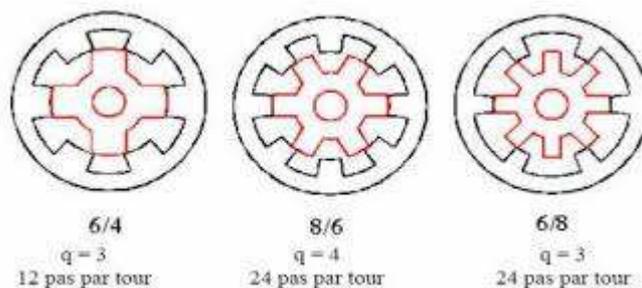


Figure I-9 : Machines à grosses dents

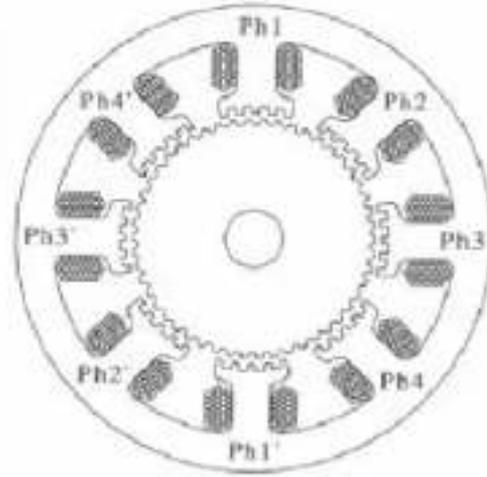


Figure I-10 : Machine à petites dents

I.4 Domaines d'utilisation

On peut distinguer deux domaines d'utilisation des machines à réductance variable :

I-4-1 Utilisation en moteurs pas à pas

On envoie un certain nombre d'impulsions sur les bobines des phases successives : le rotor avance d'un nombre de pas égal au nombre d'impulsions.

Cette utilisation plus classique permet de réaliser des dépassements ou des positionnements précis avec une commande en boucle ouverte (robotique). Plus la précision demandée est grande plus il faut augmenter le nombre de pas par tour [3].

I-4-2 Utilisation en moteur à vitesse variable

En concurrence pour certaines applications avec le moteur asynchrone à cage ou le moteur synchrone à aimants permanents.

Le moteur à réductance variable est alors à commutation c'est-à-dire que le courant dans chacune des phases est à chaque période établi puis coupé par un convertisseur à semi-conducteur.

Le moteur à réductance variable est alors en mode autopilotage, c'est-à-dire que c'est la position du rotor qui commande l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs [3].

I-5 Place de la machine à réductance variable dans le monde industriel

I-5-1 Avantages

Les machines à réductance variable présentent les avantages suivants :

A- Structure rotorique simple, robuste, sans bobinages ni conducteurs rotoriques ou aimants permanents. Du point de vue mécanique, le moment d'inertie d'une MRV est faible, typiquement la moitié de celui d'une machine asynchrone avec le même rayon externe du rotor. Ce qui permet une accélération élevée. Du point de vue thermique, les pertes rotoriques faibles conduisent à un simple système de refroidissement.

B- Excellentes performances dans des environnements extrêmes. Elles sont souhaitables pour des applications à haute température, haute vitesse.

C- Grande capacité de surcharge de courte durée. Celle-ci est limitée seulement par la température maximale dans les bobines et la saturation magnétique des matériaux magnétiques. Par conséquent, elles peuvent produire de hauts couples de démarrage ou/et de l'accélération

D- Potentiellement, faible coût de fabrication et de maintenance, malgré l'exigence relativement élevée de la fabrication due à leurs faibles épaisseurs de l'entrefer.

E- Fonctionnement dans une large plage de puissance constante. Leurs efficacités peuvent être maintenues au-delà de la vitesse de base. Par conséquent, elles ont les aptitudes pour les applications telles que les véhicules hybrides ou électriques.

F- Alimentation des phases en séquences indépendantes dans le temps pour les MRV conventionnelles. L'ouverture ou le court-circuit d'une phase influence peu les autres phases. Ainsi, la fiabilité d'une MRV est élevée [3].

I-5-2 Inconvénients

Les MRV possèdent certains inconvénients qui limitent leurs applications dans l'industrie. Les inconvénients principaux cités dans la littérature sont les suivants :

A- Ondulation de couple, vibrations ainsi que bruits acoustiques relativement plus élevés que les machines asynchrones et les machines à aimants permanents. Mais il y a heureusement déjà plusieurs méthodes de compensations actives ou passives pour diminuer les vibrations et les bruits acoustiques.

- B- L'alimentation en courant unidirectionnel est préférable dans les MRV conventionnelles, ce qui nécessite souvent des convertisseurs non-standards. Pourtant, pour différentes applications, des convertisseurs bipolaires (demi-pont ou pont complet) ont aussi vu le jour.
- C- Le bon fonctionnement à faible vitesse demande un profil complexe de l'onde du courant et des mesures précises de la position du rotor [3].

I-6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différentes structures des machines à réluctance variable (MRV) en s'appuyant sur une recherche bibliographique non exhaustive. Pour une première approche de ce type de machines, nous avons choisi de nous concentrer sur une structure simple mais couramment citée dans la littérature en raison de ses nombreux avantages : la MRV à 6 dents statoriques et 4 dents rotoriques. Après avoir étudié les bases théoriques de son fonctionnement, nous aborderons dans les prochains chapitres ses modélisations magnétique et thermique.

Chapitre II

Modélisation magnétique et simulation numérique de la MRV6/4

II-1 Introduction

L'optimisation des dimensions géométriques de la machine ou encore la prédiction précise de son fonctionnement exige la connaissance de la répartition du champ magnétique dans toutes les régions actives de la machine. Par conséquent, le calcul du champ magnétique est le moyen le plus précis pour la détermination des paramètres électromagnétiques des machines en fonctionnement non linéaire. Pour cette raison, il est indispensable d'employer une méthode numérique, capable de fournir une précision élevée dans le calcul du champ avec le moins d'équations possibles, tel que la plus performante est la méthode des éléments finis. Pour plusieurs combinaisons de courants d'excitation et des positions angulaires du rotor on est amené à calculer le champ magnétique. Plusieurs logiciels de modélisation sont basés sur le principe de la MEF qui permettent de calculer des valeurs discrètes du champ magnétique qui sont ensuite analysées pour déterminer les performances de la machine comme le couple, le rendement et donc les pertes, etc [1].

II-2 Modélisation magnétique de la MRV6/4

Le fonctionnement de la machine à réluctance variable comme toutes les machines électrique est régi par les équations Maxwell. Le champ électromagnétique est calculé avec la résolution de ces équations dans le domaine quasi-stationnaire. Ces équations lient le champ électrique \vec{E} , le champ magnétique \vec{H} , l'induction électrique \vec{D} et l'induction magnétique \vec{B} , entre eux dans tout système électromagnétique [5].

$$\text{rot } \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t \quad \text{II-1}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad \text{II-2}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} \quad \text{II-3}$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad \text{II-4}$$

Où \vec{j} représente la densité de courant et ρ la densité de charge électrique. La conservation du courant implique:

$$\text{div } \vec{j} = 0 \quad \text{II-5}$$

Les relations constitutives des matériaux isotropes fournissent trois nouvelles relations entre les grandeurs utilisées précédemment :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \text{II-6}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II-7}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{II-8}$$

Où σ est la conductivité électrique, μ la perméabilité magnétique et ϵ la permittivité électrique. Puisque la relation affirme que la divergence de l'induction magnétique est nulle, c'est donc qu'elle dérive d'un potentiel vecteur \vec{A} :

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \vec{B} \quad \text{II-9}$$

D'après le théorème d'Helmoltz, un vecteur ne peut être défini que si son rotationnel et sa divergence sont simultanément donnés. Dans ce cas, la relation (II-9) ne suffit pas pour définir le vecteur A , il faut en plus définir sa divergence. Généralement on utilise la jauge de Coulomb:

$$div \vec{A} = 0 \quad \text{II-10}$$

Dans bon nombre de machines électriques, on peut ramener un problème à trois dimensions à un problème bidimensionnel. Ce sont les systèmes invariants par translation (comme dans notre cas) ou par rotation. Dans ces deux cas, il est possible d'étudier la machine dans un plan de découpe.

Dans le cas étudié, le potentiel vecteur et les densités de courant sont alors perpendiculaires au plan de coupe et ne sont plus que des grandeurs vectorielles à une seule composante selon la direction axiale $\vec{j} = (0 \ 0 \ J)$ $\vec{A} = (0 \ 0 \ A)$ d'où des équations scalaires de la forme :

$$-div((1/\mu)\overrightarrow{grad} A = J \quad \text{II-11}$$

Ceci permet de réduire considérablement les temps de calcul et les difficultés de modélisation sans perdre dans la précision des calculs en bidimensionnel.

Un circuit électrique peut être intégré en ajoutant des équations liant la densité de courant et le potentiel vecteur. En effet, le flux dans une phase s'exprime à partir du potentiel vecteur dans ses encoches, ce qui permet de calculer les tensions induites ou forces électromotrices. Il est nécessaire de préciser les conditions aux limites du domaine d'étude qui peuvent être de trois types :

Condition de Dirichlet : Dans ce type de condition aux limites, la valeur du potentiel A est explicitement définie sur la frontière, par ex. $A = 0$. L'utilisation la plus courante des conditions aux limites de type Dirichlet dans les problèmes magnétiques consiste à définir

$A = 0$ le long d'une frontière pour empêcher le flux magnétique de traverser la frontière.

Condition de Neumann : Cette condition aux limites spécifie la dérivée normale du potentiel le long de la frontière.

Dans les problèmes magnétiques, la condition aux limites homogène de Neumann :

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad \text{II-12}$$

Est définie le long d'une frontière pour forcer le flux à franchir la frontière exactement à un angle de 90° par rapport à la frontière. Ce type de condition aux limites est cohérent avec une interface avec un métal très hautement perméable.

Robin : La condition aux limites de Robin est une sorte de mélange entre Dirichlet et Neumann, prescrivant une relation entre la valeur de A et sa dérivée normale à la frontière. Un exemple de cette condition aux limites est :

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c = 0 \quad \text{II-13}$$

Plusieurs logiciels de modélisation sont basés sur le principe de la MEF tel que le « FEMM ». Ce logiciel nous permet d'évaluer des niveaux de saturation et d'analyser la répartition du flux dans les différentes parties du circuit magnétique [5].

II-3 Simulation numérique du problème magnétique :

La méthode des éléments finis est malléable, précise et permet la prise en compte de phénomènes physiques différents non linéaires et fortement couplés (thermique, électrique, magnétique, vibratoire, mécanique). Plus la modélisation sera fine et prendra en compte un nombre de phénomènes croissant, plus le temps de simulation sera important.

II-3-1 Présentation de l'outil de calcul

Les calculs, dans ce mémoire, sont effectués à l'aide d'un logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis désigné par FEMM (Finite Element Method Magnetics) qui est un logiciel d'accès libre [20] Mis en œuvre par D. Meeker. C'est un code de calcul articulé en trois

modules appelés "préprocesseur", "processeur" et "post processeur". FEMM est un logiciel qui nous donne la possibilité de le commander par des programmes extérieurs. Nous définirons alors le post et le pré processeur à l'aide du langage LUA, qui est dérivé du langage C. Le script LUA est une partie de programme directement interprétée par FEMM, contenant des fonctions propres au logiciel FEMM. Il est tout à fait adapté à être piloté par le logiciel Matlab car ils sont compatibles. Sur la figure II.1, nous avons une idée sur la discrétisation d'un domaine quelconque en éléments finis donnant ainsi un réseau de nœuds. La solution du problème donne des valeurs discrètes du potentiel vecteur aux nœuds de ce domaine. La valeur du potentiel vecteur à l'intérieur d'un élément résulte de la fonction d'approximation en fonction de ses valeurs nodales.

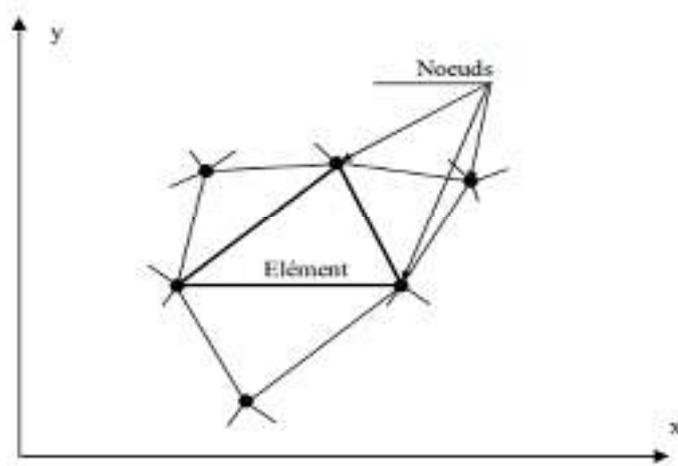


Figure II-1 Discrétisation par éléments finis en deux dimensions

II-3-2 Présentation de la géométrie de la MRV6/4 étudiée

La figure II-2 représente la vue en coupe de la machine à reluctance variable étudiée.

En général, les bobines des pôles statoriques diamétralement opposés sont reliées deux à deux en série ou en parallèle, constituant ainsi une phase électrique reliée de façon indépendante à un circuit de commutation commandé pour son alimentation.

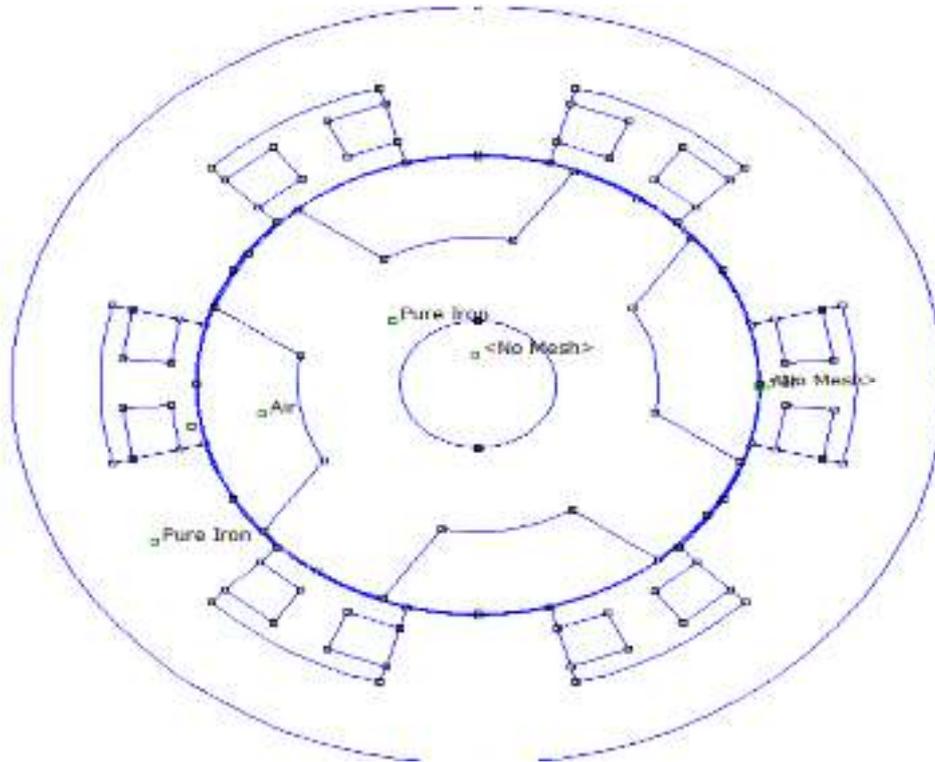


Figure II-2 Vue en coupe de la MRV6/4 étudiée.

II-3-2-1 Dimensions géométriques de la MRV

Les paramètres géométriques de la machine sont représentés dans le tableau suivant :

Intitulé	Notation	Dimensions
Nombre de dent statorique	N_s	6
Nombre de dent rotorique	N_r	4
Rayon extérieur du stator	$R_{S_{ext}}$	125 mm
Rayon intérieur du stator	$R_{S_{int}}$	76 mm
Rayon du rotor extérieur	$R_{r_{ext}}$	75 mm
Rayon du rotor intérieur	$R_{r_{int}}$	48.5 mm
Arc polaire du stator	β_s	30°
Arc polaire du rotor	β_r	42.8°
Rayon de l'arbre	R_a	21 mm
Nombre de tours par bobine	N	100
Nombre de phase	M	3

Tableau II-1 Les paramètres géométriques de la machine [21].

II-3-2-2 Matériaux assignés aux différentes régions de la MRV

Région	Matériaux utilisés	Perméabilité magnétique relative	Conductivité électrique (Ms/m)
L'arbre	Non maillée (No mesh)		
Le rotor	Fer rotor (Pure iron)	14872	10.44
Le stator	Fer stator (Pure iron)	14872	10.44
L'entrefer	Air	1	58

Tableau II-2 Matériaux utilisés dans la MRV**II-4 Simulation par éléments finis de la MRV6/4 :**

Examinons dans ce qui suit les équations à résoudre dans chaque région et les conditions aux limites qui permettent de simuler le fonctionnement de la MRV6/4 et donc de prédire le comportement de cette machine.

II-4-1 Régions homogènes de la MRV

Dans ce paragraphe nous présentons les différentes régions avec leurs caractéristiques magnétiques.

A. Stator

- **Matériaux** : Composé d'un acier laminé et de bobines en cuivre.
- **Propriétés** : Acier laminé est un matériau ferromagnétique avec une perméabilité magnétique élevée et non linéaire (Figure II-3) et une conductivité électrique moyenne. Et le cuivre étant un matériau amagnétique et une bonne conductivité.

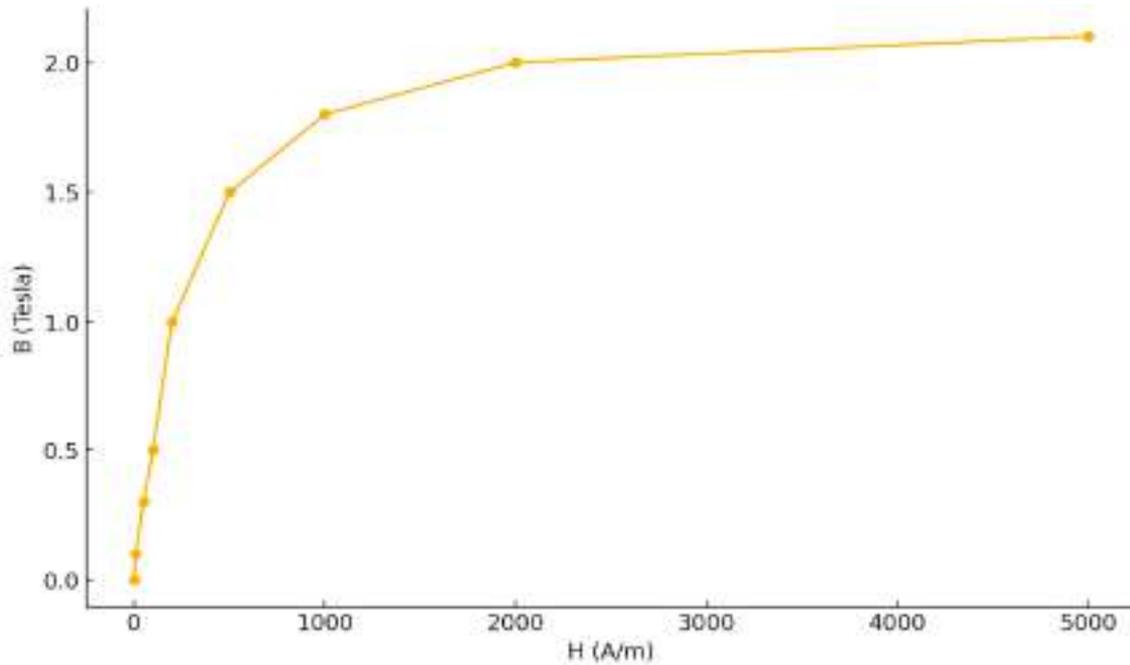


Figure II-3 Courbe de magnétisation pour l'acier

B. Entrefer

- **Matériaux** : Air de perméabilité magnétique proche de celle du vide et de conductivité électrique nulle.

C. Rotor

- **Matériaux** : Fer doux ou acier étant un matériau ferromagnétique (figure II.5) avec des variations de réluctance dues à la forme du rotor.

II-4-2. Equations associées à chaque région

Dans ce qui suit, nous présentons les équations à résoudre dans chaque région homogène de la machine étudiée.

A. Région du Stator

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = J \quad \text{II-14}$$

Avec $J=0$ dans la région du fer et $J \neq 0$ dans la région du cuivre avec $\mu = \mu_0$

B. Région de l'Entrefer

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right) = 0 \quad \text{II-15}$$

Les courants étant nuls dans l'entrefer et la perméabilité magnétique constante et égale à celle du vide.

C. Région du Rotor

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{II-16}$$

Dans le rotor, les courants électriques sont nuls et la perméabilité magnétique reste fortement non linéaire.

II-5 Etapes de la simulation sur FEMM

II-5-1 Définition du problème magnétique

- Après avoir déterminé les coordonnées de tous les points permettant de tracer la géométrie de la machine.
- En utilisant le logiciel FEMM on dessine la géométrie du domaine d'étude de la machine, on définit les matériaux la constituant, ainsi que les conditions aux limites sur les frontières.

On constitue la bibliothèque des matériaux du modèle de la machine:

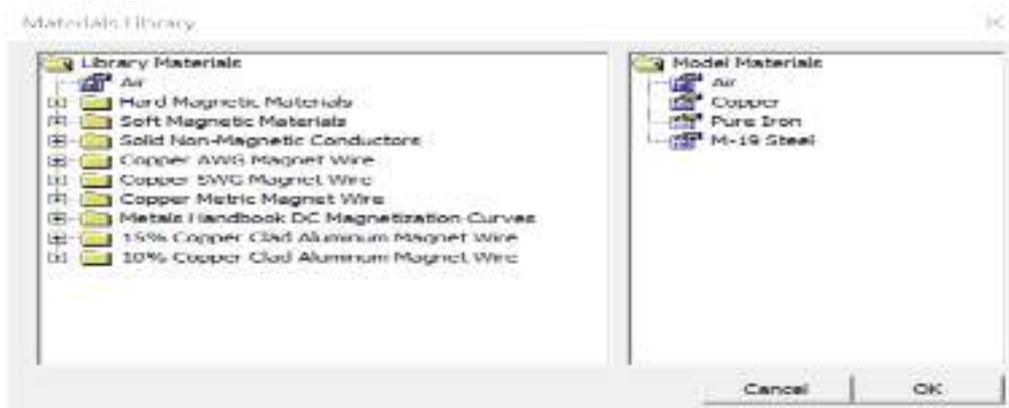


Figure II-4 Bibliothèque des matériaux

- On affecte à chaque région du domaine d'étude le matériau qui lui correspond.
- On Crée 3 circuits correspondants aux phases de la machine.

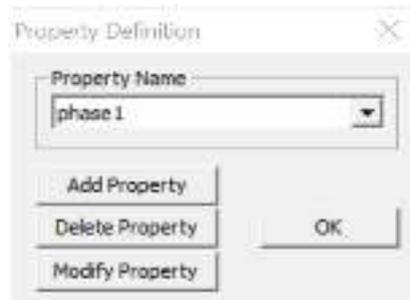


Figure II-5 Définition du nom du circuit

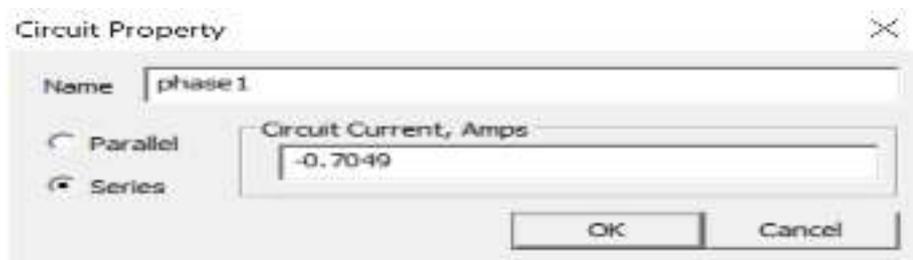


Figure II-6 Propriétés du circuit

- On attribue les 12 bobines aux 3 phases de la MRV avec la définition du nombre de conducteurs par encoche : $N = +100$ pour les conducteurs « aller » et $N = -100$ pour les conducteurs « retours »

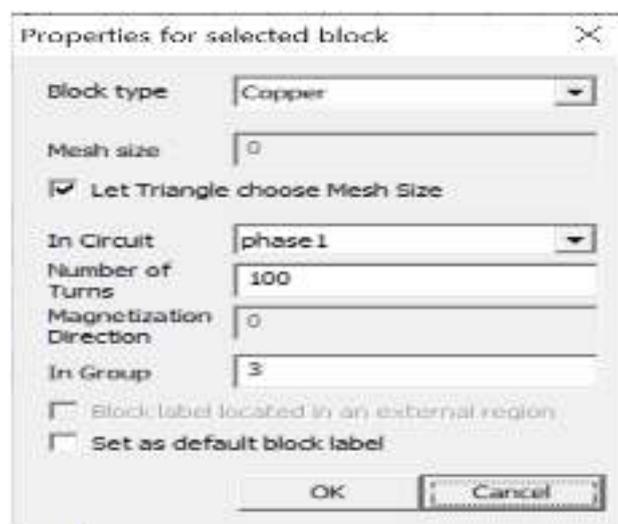


Figure II-7 Propriétés du bloc sélectionné

II-5-2 Conditions aux limites :

Pour assurer une modélisation précise et fiable, il est important de spécifier les conditions aux limites de chaque région du modèle, en tenant compte des interactions complexes entre les différentes composantes du champ magnétique et des influences environnementales. Ces conditions peuvent inclure, par exemple, des champs magnétiques prédéfinis, des flux magnétiques spécifiques.

On introduit les conditions aux limites sur la frontière du domaine d'étude (La condition de Dirichlet $A=0$ sur la frontière extérieure de la machine). Cette condition assure que le champ magnétique reste à l'intérieur des limites géométriques de la machine étudiée.



Figure II-8 Définition de la condition aux limites

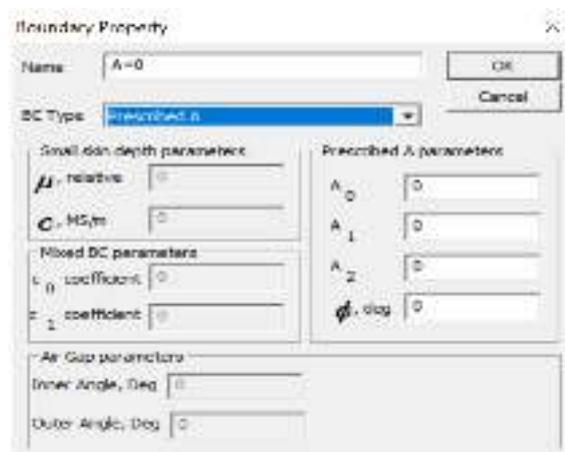


Figure II-9 Propriétés de la condition aux limites

- On sélectionne les frontières concernées et on leur affecte la condition aux limites appropriée (Figure II-10).

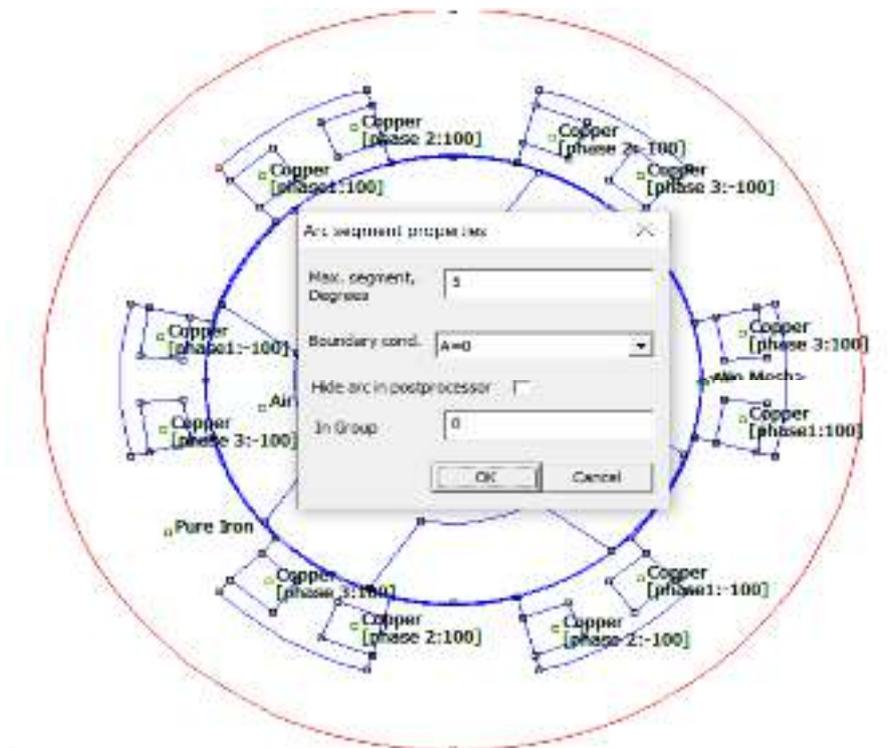


Figure II-10 Affectation de la condition aux limites appropriée

II-5-3 Lignes de champ pour les deux positions extrêmes et maillage

La simulation d'un point de fonctionnement en magnétostatique de la MRV6/4 donne l'occasion de tracer les courbes suivantes :

La figure (II-11) montre le rotor dans la position de conjonction ($\Theta = 0^\circ$). L'inductance de la phase dans cette position est caractérisée sa valeur maximale L_{\max} .

La figure (II-12) montre le rotor dans la position d'opposition ($\Theta = 45^\circ$). L'inductance de la phase passe par sa valeur minimale L_{\min} dans cette position.

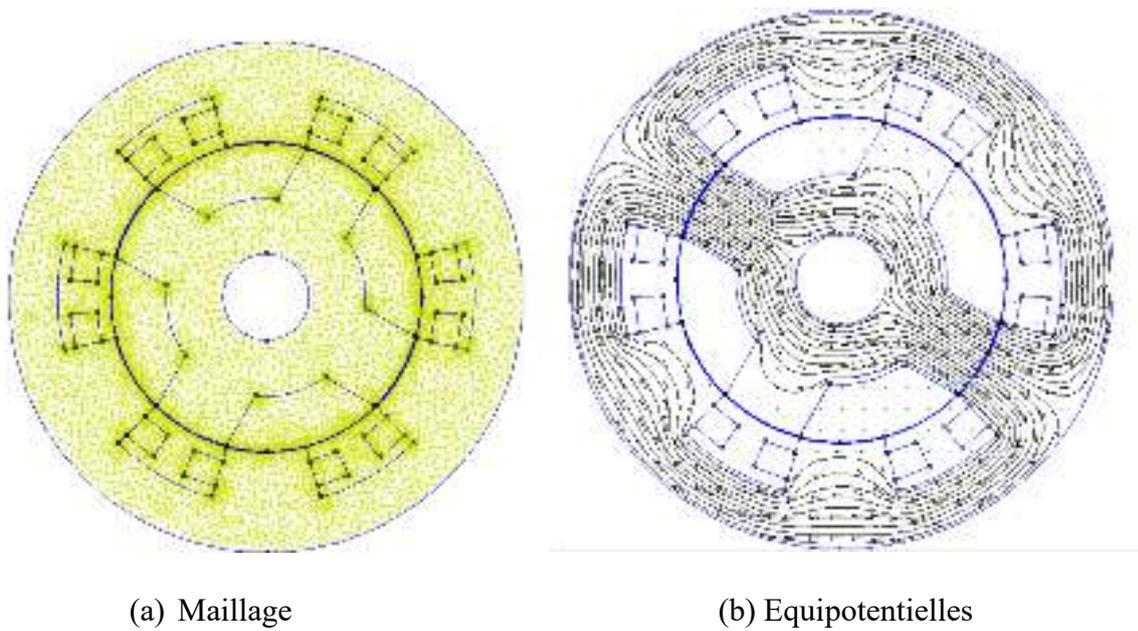


Figure II-11 Position de conjonction

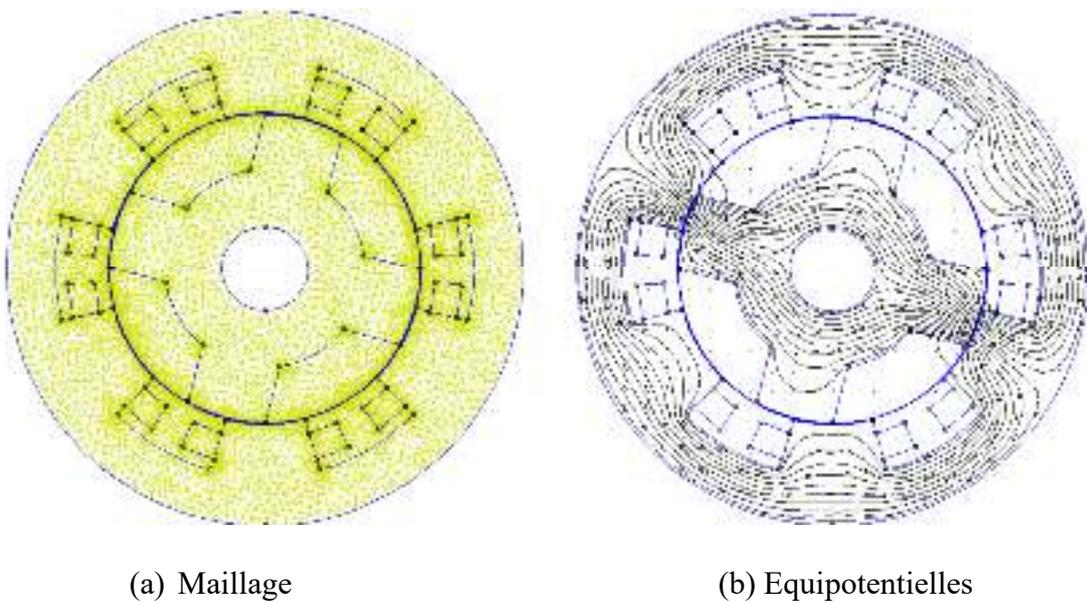


Figure II-12 Position d'opposition

Après avoir lancée la simulation sur FEMM pour visualiser l'évolution de l'induction magnétique pour les deux positions, on constate que l'induction magnétique est plus forte

dans la position de conjonction par rapport à celle dans la position d'opposition. La déformation du potentiel vecteur dans la position de conjonction est due à l'augmentation et la diminution de l'entrefer [1].

II-6 Analyse des pertes dans la MRV

Par définition les générateurs et les moteurs électriques sont des machines électriques qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Durant le processus de conversion une partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur. Ces actionneurs font tous intervenir des principes, électromagnétiques et mécaniques qui s'accompagnent inévitablement de pertes. Les pertes électriques sont principalement associées aux pertes par effet Joule. Elles sont facilement identifiées dans les conducteurs traversés par des courants.

D'autres pertes sont aussi engendrées par la variation du champ magnétique et sont fonction de la fréquence de ces variations qu'on nomme pertes Fer. Egalement des pertes auxiliaires mais aussi mécaniques sont se produisent dans cette machine mais qu'on néglige.

II-6-1 Pertes Fer

Les pertes Fer, également appelées pertes magnétiques, sont l'une des principales sources de pertes énergétiques dans les dispositifs électrotechniques. Elles se produisent dans les circuits magnétiques des transformateurs et des machines électriques en raison des phénomènes inductifs résultant de la variation d'induction dans le matériau magnétique. Les pertes Fer sont principalement dues à deux phénomènes : l'hystérésis magnétique et les courants de Foucault.

A) Pertes par hystérésis magnétique : Lorsque le champ magnétique dans le matériau magnétique varie, les domaines magnétiques du matériau doivent se réorienter pour s'aligner avec le nouveau champ. Ce processus de réorientation des domaines magnétiques entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, ce qui se traduit par des pertes fer.

Les pertes par hystérésis dépendent des propriétés magnétiques du matériau utilisé dans le circuit magnétique.

B) Pertes par courants de Foucault : Lorsqu'un matériau conducteur est soumis à un champ magnétique variable, des courants induits, appelés courants de Foucault, circulent à l'intérieur du matériau. Ces courants circulaires génèrent des pertes d'énergie sous forme de chaleur en raison de la résistance électrique du matériau. Les pertes par courants de Foucault dépendent de la conductivité électrique du matériau et de la fréquence du champ magnétique [6].

$$P_h = K_h \cdot B^\beta \cdot \omega_s \quad \text{II-13}$$

$$P_{CF} = K_e \cdot B^2 \cdot \omega_s^2 \quad \text{II-14}$$

Avec :

- P_h : Pertes par hystérésis (W/kg)
- B : Induction magnétique (Tesla)
- K_h : Facteur d'hystérésis dépendant du matériau [$40 < \beta < 55$]
- ω_s : Pulsation des courants électriques (rd /s)
- β : Coefficient de Steinmetz [$1.8 < \beta < 2$]
- P_{CF} : Pertes par courant de Foucault (W/kg)
- K_e : Facteur de courant de Foucault dépendant du matériau [$0.04 < \beta < 0.07$]

I-6-2 Pertes Joule

L'effet Joule est un effet thermique qui se produit lors du passage du courant électrique dans un conducteur. Il se manifeste par une augmentation de l'énergie interne du conducteur et généralement de sa température. Et dans la modélisation thermique, une source de chaleur volumique est injectée dans toutes les bobines, celle-ci représente les pertes Joule dans le cuivre rapportées au volume de cuivre. Pour notre modèle les pertes Joule sont calculées à partir de la formule suivante [7] :

$$P_j = RI^2 = \rho \frac{l}{s} j^2 s^2 = \rho j^2 sl = \rho j^2 V \quad \text{II-15}$$

Donc

$$P_j = \rho j^2 \quad \text{II-16}$$

Ou

- ρ : La résistivité du cuivre [$\Omega \cdot m$].
- J : La densité du courant [A/m^2].
- P_j : La source de chaleur [W/m^3].
- V : le volume du conducteur [m^3].

II-6-3 Calcul des pertes Joule dans la machine étudiée

Ce calcul permet de tenir compte des têtes de bobines qui sont négligées dans le calcul en 2D sur le logiciel FEMM :

$$P_j = R_n * I^2 = n^2 R I^2 \quad \text{II-26}$$

$$P_j = R(n.I)^2 \quad \text{II-27}$$

De plus

$$R_n = \rho \frac{l_{bob}}{S_{cond}} \quad \text{II-28}$$

On a:

$$l_{spire} = 2(2(L_u + BR)) \quad \text{II-29}$$

$$l_{bob} = n * l_{spire} \quad \text{II-30}$$

$$\text{Et} \quad S = \frac{ab}{n} \quad \text{II-31}$$

$$\text{Avec} \quad S = 205.10^{-6} m^2$$

Donc :

$$R_n = \rho \frac{n * l_{spire}}{\frac{ab}{n}} = \rho \frac{n^2 l_{spire}}{ab} \quad \text{II-32}$$

ρ : la résistivité du cuivre

$$\rho = 1,72.10^{-8} \Omega m$$

II-6-4 Calcul des pertes fer dans la machine étudiée

Les résultats numériques des diverses pertes calculées par FEMM à partir du niveau de l'induction dans chaque région et en fonction du courant injecté dans les phases de la MRV étudiée. Ensuite, les pertes fer sont estimées en fonction de la vitesse de la machine donc de la fréquence correspondante. Les évolutions des pertes joules et des pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse sont représentées sur les figures II-13 à II-15 pour les courants de 5A, 8A et 10A respectivement.

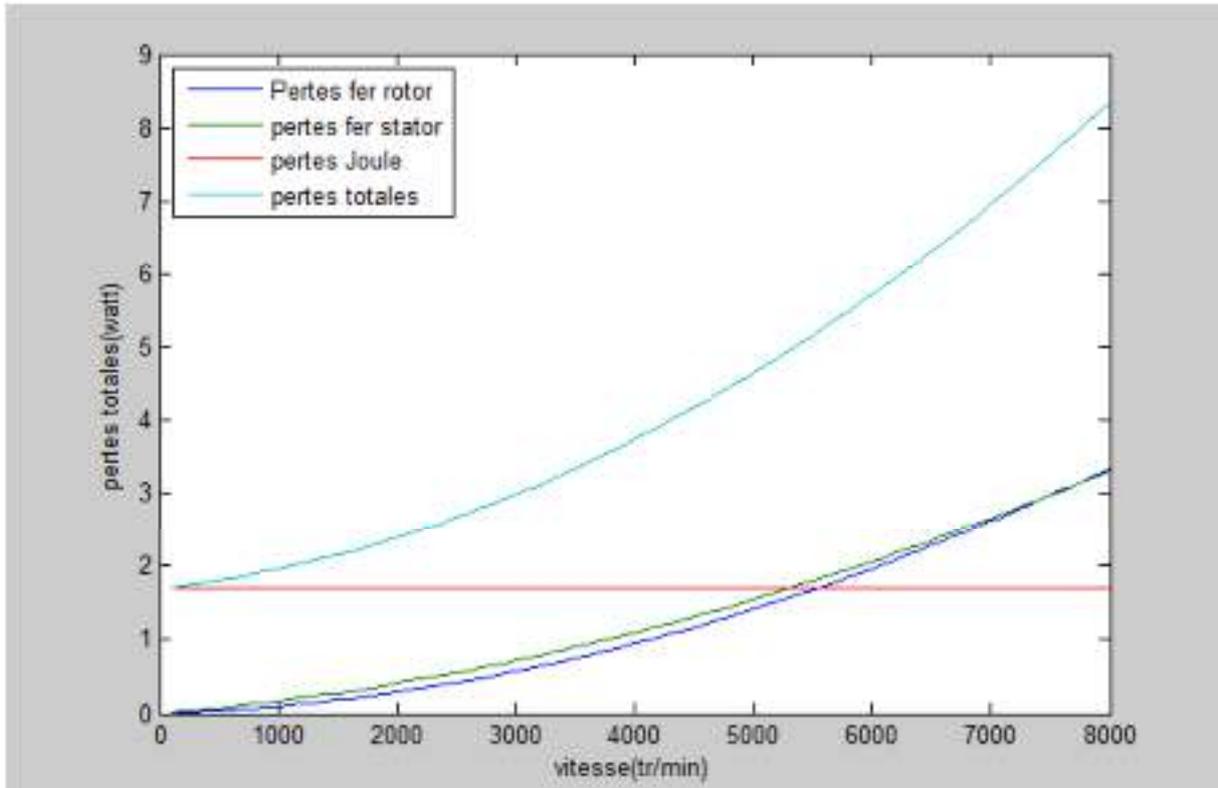


Figure (II-13) : Variation des pertes joules et les pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant I=5A.

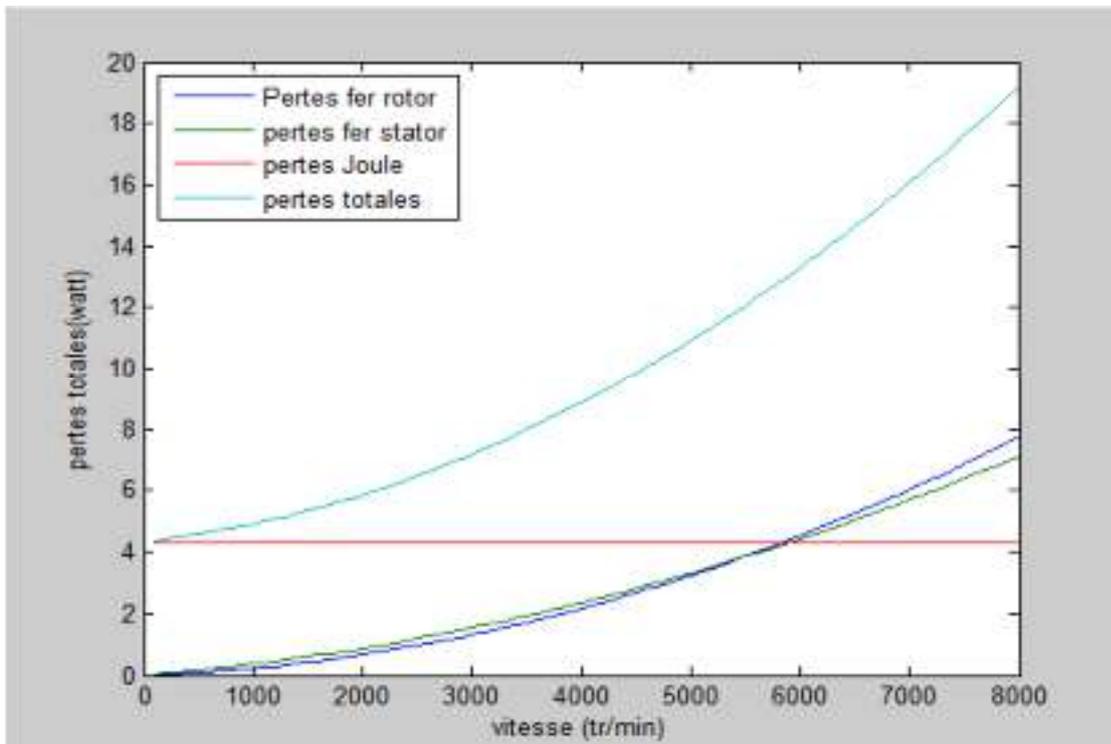


Figure (II-14) montre l'évolution des pertes joules et les pertes fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant I=8A.

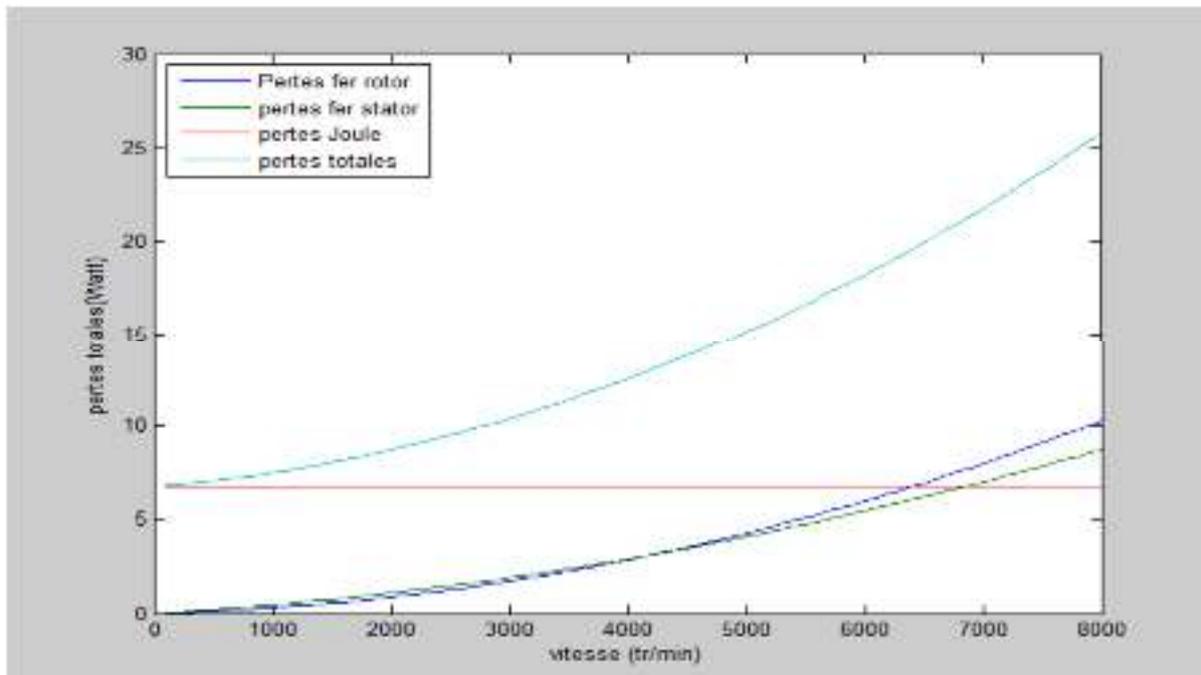


Figure (II-15) : Evolution des pertes Joule et les pertes Fer au stator et au rotor en fonction de la vitesse pour un courant I=10A.

Calcul du volume des différentes régions :

- $V_{bobine} = l_{bob} * s_{bob} = 0,628 * 205 = 128.74 \text{ mm}^3$
- $V_{stator} = 2.14.10^4 \text{ mm}^3$
- $V_{rotor} = 9.17.10^3 \text{ mm}^3$

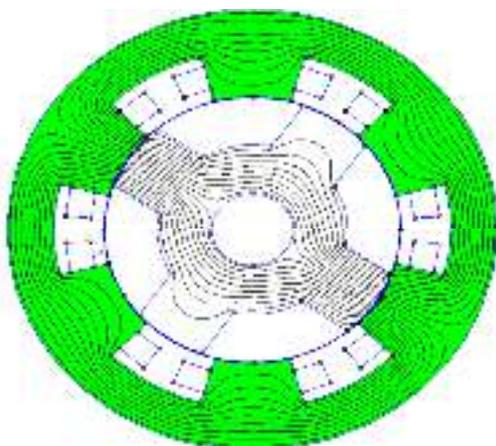


Figure II-16 Région statorique

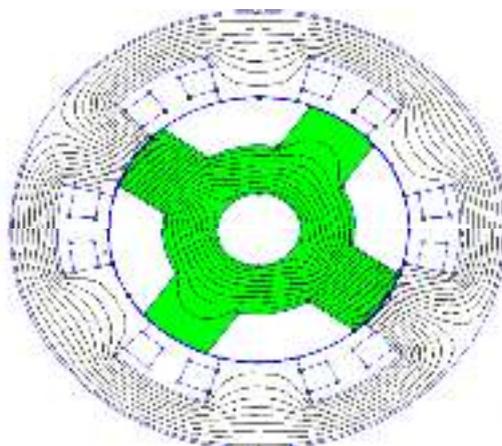


Figure II-17 Région rotorique

On obtient le volume rotorique et statorique en sélectionnant la région puis on appuie sur la fonction intégration pour calculer leurs valeurs.

Le calcul des pertes volumiques pour les différentes régions est nécessaire comme entrée du programme de simulation du problème thermique de la machine. A titre d'exemple :

Pour $I=10A$, $N=1000$ tr/mn

$$Pj_{vbob} = \frac{Pj}{V_{bob}} = 410097.0873 \text{ W/m}^3$$

$$Pv_{stat} = \frac{Pf}{V_{stat}} = 30.2192 \text{ W/m}^3$$

$$Pv_{rot} = \frac{Pf}{V_{rot}} = 37.0594 \text{ W/m}^3$$

L'intensification du champ magnétique induit influe directement sur la densité des pertes ferromagnétiques du rotor et du stator. Ces pertes sont significatives dans les régions où il y a une concentration élevée des lignes de flux. Les pertes Joule dans la machine restent constantes pour un courant d'alimentation de la MRV donné. Tandis que les pertes fer augmentent avec la vitesse du moteur. On constate que les pertes au stator sont supérieures à celles du rotor jusqu'à une vitesse de $N=6000$ tr/mn, juste après elles s'inversent, devenant plus élevées au niveau du rotor. De plus, on observe que les pertes fer deviennent prépondérantes par rapport aux pertes Joule à partir d'une certaine vitesse de la MRV alors qu'elles étaient négligeables pour les basses vitesses.

II-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, le modèle magnétique de la MRV 6/4 et sa simulation grâce au logiciel FEMM. Ce modèle est basé sur les équations de Maxwell qui régissent le fonctionnement de la machine étudiée. Pour la simulation numérique, nous avons adopté la méthode des éléments finis. Cette méthode a été choisie en raison de sa grande facilité à s'appliquer à toutes sortes de géométries et sa capacité de prise en charge des non linéarités des phénomènes physique. Le logiciel FEMM est un outil appliquant la MEF pour les calculs en 2D des problèmes magnétique. Les sorties de cette simulation numériques serviront comme entrées au modèle thermique qui sera développé dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Modélisation thermique et simulation numérique de la MRV

III-1 Introduction

Le transfert thermique est la discipline qui étudie comment les molécules ou particules échangent de l'énergie à différentes températures. Son objectif est d'analyser et de prédire le taux d'échange de chaleur dans des conditions spécifiques, en complément des principes de la thermodynamique. La conception et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs de chaleur, les condenseurs, etc., sont fortement influencés par les phénomènes de transfert thermique, en particulier la chaleur. Dans le contexte de l'essor industriel et de la croissance de la demande et du coût de l'énergie, l'efficacité énergétique est devenue un objectif clé dans l'utilisation de tout équipement de transfert de chaleur. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie tout en maximisant les performances.

III-2 Définition des grandeurs

Plusieurs grandeurs interviennent dans l'étude des transferts thermiques :

- **Quantité de chaleur (q)** : est l'énergie thermique transférée pendant un échange thermique. Son unité est le Joule [J].

- **Flux de chaleur (ϕ)** : est la quantité d'énergie transférée par unité de temps (III.1). Ce flux thermique ϕ correspond à une puissance et s'exprime en Watt [W].

$$\phi = \frac{\partial q}{\partial t} \quad \text{III.1}$$

- **Densité de flux de chaleur (φ)** : correspond au taux de chaleur (énergie thermique) qui traverse une surface donnée S par unité de temps. Son unité est le $[W.m^{-2}]$

$$\varphi = \frac{1}{s} \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\phi}{s} \quad \text{III.2}$$

- **Conductivité thermique (λ)** : est la grandeur caractérisant l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Plus elle est grande, meilleure est la conduction de la chaleur par ce matériau. Son unité est le $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

- **Résistance thermique :**

La résistance thermique d'un élément, exprime sa résistance au passage d'un flux de chaleur; elle est donnée en $[K/W]$. Cette notion n'est valable qu'en régime stationnaire, le régime transitoire faisant appel à la notion de quadripôle thermique [1].

La résistance thermique de conduction d'une plaque d'épaisseur e et de surface S est donnée par:

$$R_c = \frac{e}{\lambda \times S} \quad \text{III-3}$$

Où λ est la conductivité thermique du matériau.

La résistance thermique de convection d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de chaleur d'origine convective.

$$R_{cv} = \frac{1}{h \times S} \quad \text{III-4}$$

Où :

h est le coefficient de convection thermique ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

S est la surface de convection en m^2

R_{cv} est la résistance thermique de convection [K/W].

Contrairement à la résistance thermique de conduction, celle-ci ne dépend pas de l'épaisseur de la paroi considérée. Elle dépend uniquement de la surface, et du fluide.

III-3 Modes du transfert de la chaleur

La thermodynamique nous dit que l'énergie peut être transférée sous forme de chaleur et fonctionner grâce aux interactions entre un système et son environnement. Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud transfère la chaleur au système le plus froid. Il y a échange thermique et même transfert de chaleur entre ces deux systèmes. Il existe trois modes fondamentaux de transfert de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection [2].

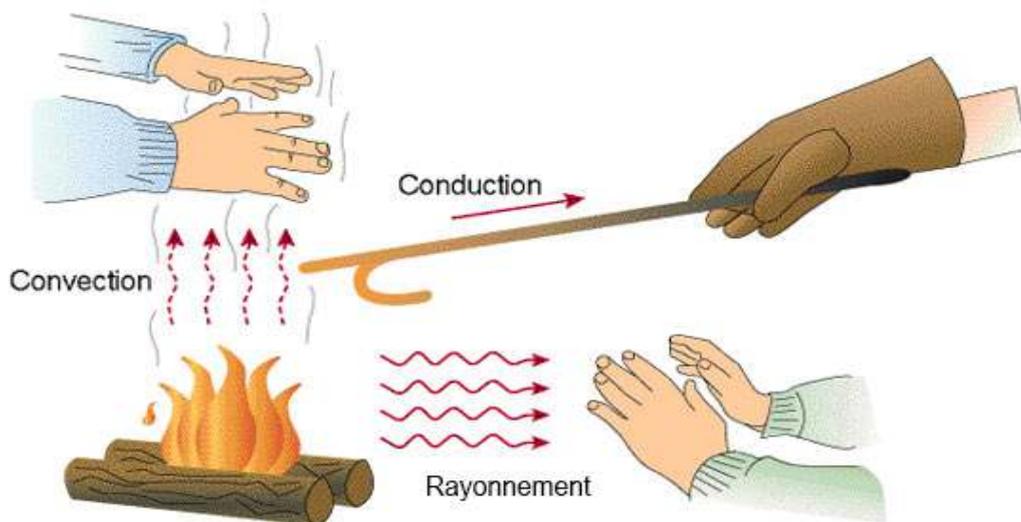


Figure-III-1 Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur [8].

III-3-1 Conduction

L'agitation moléculaire dans un corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, est connue sous le nom de température. Prenons pour l'instant en compte un corps solide où la

température fluctue. La concentration élevée de molécules dans la zone chaude transmettra de l'énergie cinétique aux zones plus froides grâce à un phénomène connu sous le nom de conduction de la chaleur. Le processus de conduction est une méthode de diffusion qui permet à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide. C'est le cas pour un liquide ou un gaz, mais nous verrons plus loin que la convection peut être un autre moyen de transfert de chaleur.

Dans la MRV, le transfert de chaleur par conduction est un transfert d'énergie dans les matériaux solides et homogènes comme le fer du stator ou du rotor ou encore dans les fils de cuivre mais aussi entre matériaux solides différentes comme entre le fer du stator et le cuivre des bobines ou encore entre le cuivre et l'isolant l'entourant.

Notons enfin que la conduction de la chaleur n'est pas possible dans le vide puisqu'il n'y a pas de support moléculaire pour cela. [3]

III-3-2 Convection

La convection est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide liquide ou gazeux. Ce mode de transmission se trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide. En réalité, il s'agit d'une combinaison du phénomène de conduction avec celui d'un transfert de matière. La paroi, (supposée chaude, par exemple) cède, par une conduction, de la chaleur au fluide adjacent qui la transmet de couche en couche, dans une direction perpendiculaire à la paroi toujours par conduction.

En outre le mouvement du fluide permet à l'énergie ainsi accumulée de s'écouler vers les régions les plus froides. Si le mouvement est « turbulent », un brassage énergétique des particules de fluide en mouvement permet un transport d'énergie considérable, dans la direction perpendiculaire à la paroi.

On distingue la convection forcée et la convection naturelle (libre). Dans la première, le mouvement du fluide est dû à l'action d'une pompe, d'un ventilateur ou d'une cheminée placée dans le circuit. Dans la deuxième, le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles-mêmes dues à des différences de températures existantes dans le fluide.

Le transfert de chaleur par convection dans les MRVs se fait entre les surfaces solides de la machine et le milieu fluide, dans ou autour de la machine : entre la surface externe du rotor et l'entrefer, entre la surface interne du stator et l'entrefer, entre la surface externe du stator et l'environnement ainsi qu'entre les têtes de bobines et le fluide environnant.

III-3-3 Rayonnement

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber, ce qui l'augmente. De par sa

nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaque (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau) [4].

III-4 Lois fondamentales du transfert de la chaleur

Les lois fondamentales du transfert de chaleur sont des principes physiques qui régissent le mouvement de la chaleur d'un endroit à un autre. Elles comprennent principalement trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

III-4-1 Loi de la conduction (loi de J. Fourier)

La loi fondamentale de la conduction thermique, également connue sous le nom de loi de Fourier, établit la relation entre le flux de chaleur à travers un matériau et le gradient de température qui existe à travers ce matériau. Cette loi a été formulée par le physicien et mathématicien français Joseph Fourier au début du 19^e siècle [9].

La loi de Fourier peut être exprimée mathématiquement comme suit :

$$Q = -k\nabla T \quad \text{III-11}$$

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{III-12}$$

Où :

- (q) représente le flux de chaleur à travers le matériau (en watts),
- (k) est la conductivité thermique du matériau (en watts par mètre-kelvin, W/mK),
- (A) est la section transversale du matériau à travers laquelle la chaleur se propage (en mètre carré),
- $\frac{dT}{dx}$ Est le gradient de température à travers le matériau (en kelvins par mètre). Cette quantité représente la variation de température par unité de distance dans la direction du flux de chaleur.
- Le signe négatif (-) indique que la chaleur se déplace des régions de haute température vers les régions de basse température.

La forme vectorielle de cette loi qui exprime la densité de flux thermique est définie comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de surface, soit :

$$\vec{\phi} = -K \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad \text{III-13}$$

Essentiellement, cette équation indique que le flux de chaleur (q) est proportionnel à la conductivité thermique (k) du matériau, à la surface à travers laquelle la chaleur se propage, et au gradient de température. Plus le gradient de température est élevé, plus le flux de chaleur sera important, et vice versa [9].

La loi de Fourier est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie thermique, la géophysique, la science des matériaux et d'autres disciplines où la conduction thermique est un aspect crucial de l'analyse et de la conception.

III-4-2 La diffusivité thermique

La diffusivité thermique (α) est une propriété matérielle qui indique la rapidité avec laquelle la chaleur se diffuse à travers un matériau. Elle est définie comme le rapport de la conductivité thermique à la capacité thermique volumique du matériau :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad \text{II-15}$$

Avec :

- λ est la conductivité thermique.
- ρ est la densité du matériau.
- C_p est la capacité thermique massique.

Une diffusivité thermique élevée signifie que la chaleur se propage rapidement dans le matériau, tandis qu'une diffusivité faible indique que la chaleur se diffuse lentement. Cette propriété est essentielle pour comprendre les réponses thermiques des matériaux sous des variations de température [14].

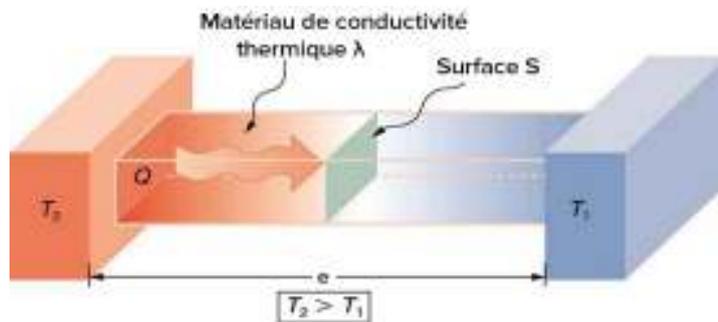


Figure-III-2 La diffusivité thermique

Diffusivité thermique de métaux à 20 °C				
	Masse volumique (10 ³ kg/m ³)	Capacité thermique massique (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Diffusivité thermique (10 ⁻⁶ m ² /s)

Diffusivité thermique de métaux à 20 °C				
	Masse volumique (10 ³ kg/m ³)	Capacité thermique massique (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Diffusivité thermique (10 ⁻⁶ m ² /s)
Aluminium	2,7	0,888	237	98,8
Plomb	11,34	0,129	35	23,9
Bronze	8,8	0,377	62	18,7
Chrome	6,92	0,44	91	29,9
Cr-Ni-Acier (X12CrNi18 8)	7,8	0,5	15	3,8
Fer	7,86	0,452	81	22,8
Or	19,26	0,129	316	127,2
Fonte	7,8	0,54	42...50	10...12
Acier (< 0,4 % C)	7,85	0,465	45...55	12...15
Cuivre	8,93	0,382	399	117
Magnésium	1,74	1,02	156	87,9
Manganèse	7,42	0,473	21	6
Molybdène	10,2	0,251	138	53,9
Nickel	8,85	0,448	91	23
Platine	21,37	0,133	71	25
Argent	10,5	0,235	427	173
Titane	4,5	0,522	22	9,4
Tungstène	19	0,134	173	67,9
Zinc	7,1	0,387	121	44
Étain, blanc	7,29	0,225	67	40,8
Silicium	2,33	0,700	148	87

Tableau-III-1 Diffusivité thermique de métaux à 20 °C

III-4-3 Loi de la convection

Dans l'étude de la convection, les nombres adimensionnels jouent un rôle important pour caractériser et analyser les phénomènes de transfert de chaleur. Parmi ces nombres adimensionnels, le nombre de Rayleigh, le nombre de Nusselt, et le nombre de Prandtl sont souvent utilisés pour étudier les différents aspects de la convection naturelle et forcée. Ces nombres adimensionnels permettent de quantifier les relations entre les différentes forces en jeu, les transferts de chaleur et la dynamique des fluides, offrant ainsi des outils essentiels pour la modélisation et la prédiction des phénomènes de convection et de leurs effets sur les systèmes thermiques.

III-4-3-1 Nombre de Nusselt (Nu)

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{III-5}$$

Avec :

- L est une longueur caractéristique
- k est la conductivité thermique du fluide.

III-4-3-2 Nombre de Prandtl (Pr)

Le rapport entre la diffusion de l'impulsion et la diffusion thermique :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad \text{III-6}$$

Avec :

- C_p est la capacité thermique massique à pression constante.

III-4-3-3 Nombre de Reynolds (Re)

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide, indiquant si l'écoulement est laminaire ou turbulent :

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad \text{III-7}$$

Avec :

- ρ est la densité du fluide.
- u est la vitesse d'écoulement.
- L est une longueur caractéristique.
- μ est la viscosité dynamique.

III-4-3-4 Nombre de Rayleigh (Ra)

$$Ra = Gr * Pr \quad \text{III-8}$$

Donc ;

$$Nu = \alpha (Gr * Pr)^m \quad \text{III-9}$$

Avec :

- Gr est le nombre de Grashof

III-4-3-5 Nombre de Grashof

Quantifie l'importance relative des forces de flottabilité par rapport aux forces visqueuses

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad \text{III-10}$$

Avec :

- Gr est le nombre de Grashof (adimensionnel),
- g est l'accélération due à la gravité (en m/s^2),
- β est le coefficient de dilatation thermique volumique du fluide (en K^{-1}),
- T_s est la température de la surface chauffée (en K),
- T_∞ est la température du fluide loin de la surface (en K),
- L est une longueur caractéristique (en m),
- ν est la viscosité cinématique du fluide (en m^2/s).

III-4-3-6 Nombre de Taylor

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la stabilité de l'écoulement d'un fluide placé entre deux tubes concentriques. Il correspond au rapport des forces centrifuges sur les forces visqueuses.

On le définit de la manière suivante :

$$\text{Ta} = \frac{4\omega^2 Lc^4}{\nu^2} \quad \text{III-11}$$

Avec:

- ω : vitesse angulaire.

III-4-4 Transfert convectif dans l'entrefer

Le transfert convectif dans l'entrefer est un phénomène clé dans plusieurs domaines de l'ingénierie, tels que les moteurs électriques, les transformateurs, et les machines tournantes. L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor dans une machine électrique, et le transfert de chaleur par convection dans cet espace joue un rôle essentiel dans le maintien des températures de fonctionnement sécuritaires et efficaces.

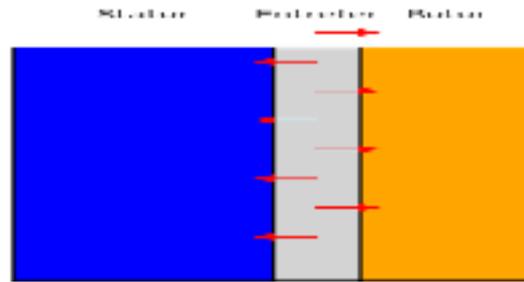


Figure-III-3 Schématisation du transfert convectif dans l'entrefer

III-4-4-1 Facteurs influant sur le transfert convectif

III-4-4-1-1 Géométrie de l'entrefer

A-Largeur de l'entrefer : Un entrefer plus étroit peut limiter le mouvement du fluide, réduisant ainsi le transfert de chaleur par convection.

B-Forme de l'entrefer : Des variations géométriques peuvent créer des zones de recirculation ou des flux turbulents, influençant l'efficacité de la convection.

III-4-4-1-2 Propriétés du fluide

A-Conductivité thermique : Les fluides avec une conductivité thermique plus élevée facilitent un meilleur transfert de chaleur.

B-Viscosité et densité : Affectées par la température, ces propriétés influencent la vitesse et le comportement du fluide dans l'entrefer.

C-Conditions d'écoulement :

D-Vitesse du fluide : Dans les systèmes avec convection forcée, une vitesse de fluide plus élevée améliore le coefficient de transfert de chaleur. Dans les systèmes avec convection naturelle, la vitesse est déterminée par les différences de température et la géométrie de l'entrefer.

E-Turbulence : La turbulence augmente le mélange du fluide et améliore ainsi le transfert de chaleur.

III-4-4-1-3 Températures de fonctionnement :

Gradients de température : Les différences de température entre le stator et le rotor sont les principaux moteurs du transfert de chaleur par convection. Un gradient plus élevé signifie une force motrice plus importante pour le transfert de chaleur.

III-4-4-2 Régimes d'écoulement

III-4-4-2-1 Écoulement laminaire

- Caractérisé par des lignes de courant parallèles et un écoulement ordonné.
- Le transfert de chaleur est principalement par conduction dans le fluide.
- Se produit à des nombres de Reynolds (Re) faibles.

III-4-4-2-2 Écoulement turbulent

- Caractérisé par des mouvements désordonnés et des fluctuations de vitesse et de pression.
- Le transfert de chaleur est amélioré par le mélange intense du fluide.
- Se produit à des nombres de Reynolds élevés.

Pour un nombre de Taylor plus petit que 1700, le régime est laminaire et stable. Le transfert thermique se fait essentiellement par conduction. Lorsque la vitesse de rotation augmente, des tourbillons apparaissent et occupent la largeur de l'entrefer. Une longueur d'onde axiale peut être ainsi définie, celle-ci est formée par une paire de tourbillons contrarotatifs. Ces phénomènes prennent place pour $1700 < Ta_m < 10^4$ (figure (5)). Dans le cas où $Ta_m < 10^4$, le régime d'onde azimuthale prend place où des ondulations apparaissent et progressent dans le sens de rotation du cylindre intérieur [18].

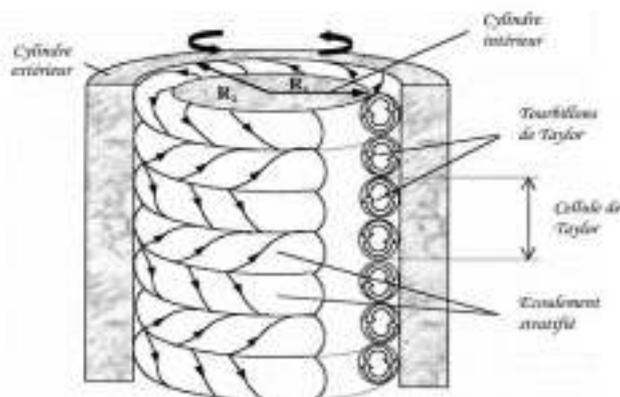


Figure-III-4 Ecoulement laminaire de Taylor-Couette

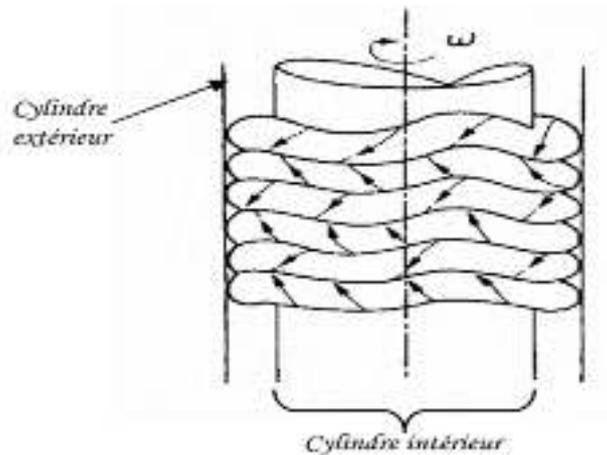


Figure-III-5 Seconde instabilité de l'écoulement

III-4-5 Convection naturelle dans les machines électriques

La convection naturelle est un mécanisme essentiel de transfert de chaleur dans les machines électriques, jouant un rôle essentiel dans le refroidissement des composants internes, tels que les stators, rotors, bobines et les noyaux magnétiques. Une gestion thermique efficace est indispensable pour assurer la fiabilité et la performance des machines électriques, car des températures élevées peuvent réduire l'efficacité et la durée de vie des matériaux d'isolation et des composants électroniques [9].

III-4-5-1 Principe de la convection naturelle

La convection naturelle se produit en raison des différences de densité dans le fluide (air ou liquide) causées par les gradients de température. Dans le contexte des machines électriques, la chaleur générée par les pertes résistives, les pertes par hystérésis et les courants de Foucault crée des différences de température entre les composants de la machine et l'environnement ambiant. Cela induit des mouvements de fluide qui facilitent le transfert de chaleur de la surface des composants chauds vers le fluide environnant plus froid [9].

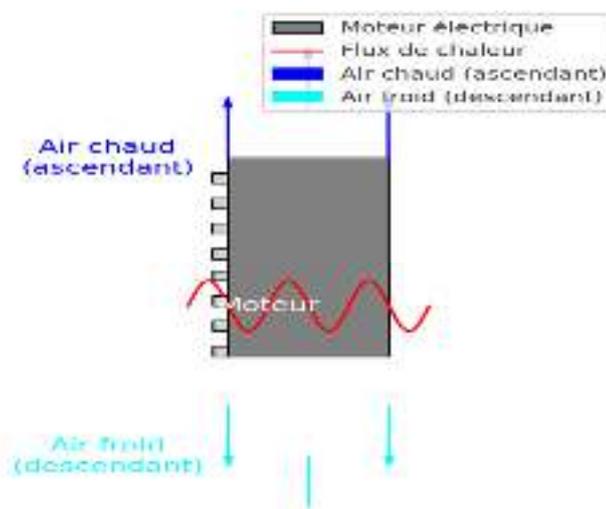


Figure-III-6 Convection naturelle dans une machine électrique

III-4-5-2 Convection forcée dans la MRV

Les machines à réluctance variable (MRV), sont de plus en plus populaires dans diverses applications industrielles et de traction en raison de leur robustesse, de leur simplicité de conception et de leur efficacité. Comme toutes les machines électriques, les MRV génèrent de la chaleur pendant leur fonctionnement, et une gestion thermique efficace est essentielle pour maintenir leurs performances et leur fiabilité. La convection forcée est l'une des méthodes clés utilisées pour le refroidissement de ces machines.

III-4-5-3 Mécanisme de la convection forcée

La convection forcée dans les MRV fonctionne en utilisant des ventilateurs ou des systèmes de refroidissement pour forcer l'air (ou un autre fluide) à circuler autour et à travers la machine. Ce processus augmente le taux de transfert de chaleur, aidant à maintenir des températures de fonctionnement acceptables [17].

III-4-5-4 Avantages de la convection forcée dans les MRV

- Efficacité thermique améliorée : En augmentant le coefficient de transfert de chaleur, la convection forcée permet de maintenir des températures de fonctionnement plus basses, ce qui améliore l'efficacité énergétique de la MRV.
- Réduction des risques de surchauffe : Une dissipation thermique efficace réduit les risques de surchauffe des enroulements et des composants critiques, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie de la machine.
- Conception compacte et puissance élevée : Grâce à une gestion thermique efficace, les MRV peuvent être conçues de manière plus compacte, tout en délivrant une puissance élevée sans risque de surchauffe.

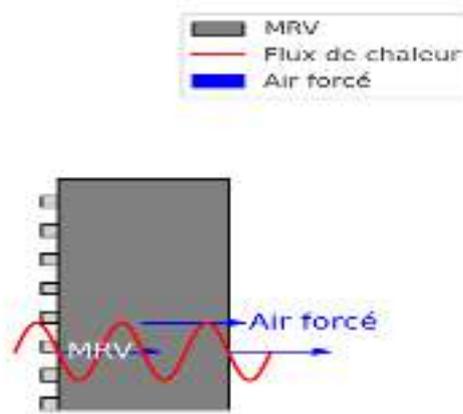


Figure-III-7 Convection forcée dans la MRV

III-4-6 Lois du rayonnement thermique :**III-4-6-1 Le rayonnement électromagnétique :**

Le rayonnement thermique est de nature électromagnétique en raison de l'agitation de la matière sous l'effet de la température. Une onde électromagnétique consiste en un champ électrique \vec{E} , un champ magnétique \vec{B} et un vecteur d'onde \vec{k} , toutes trois perpendiculaires. L'onde se propage dans la direction du vecteur d'onde avec une vitesse c qui varie selon le milieu qu'elle traverse. Cette vitesse vaut $c = c_0 / n$ ou c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice du milieu. La fréquence d'une onde électromagnétique ne varie pas avec le milieu qu'elle traverse. Elle est liée à c par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c T \quad \text{III-12}$$

Où $\nu = 1/T$ est la fréquence de l'onde électromagnétique.

On voit donc que la longueur d'onde sera fonction du milieu traversée. Une onde transporte avec elle de l'énergie. Lorsqu'elle est émise par un corps radiant, celui-ci perd donc un certain flux d'énergie Φ (Watt). De même, un corps frappe par une onde électromagnétique reçoit de l'énergie. La distribution énergétique d'un rayonnement polychromatique (large gamme de λ) varie avec λ . [9].

III-4-6-2 Loi de Wien

La loi de Wien, également connue sous le nom de loi du déplacement de Wien, est une loi fondamentale en physique du rayonnement thermique qui décrit la relation entre la température d'un corps noir et la longueur d'onde à laquelle il émet le plus d'énergie.

La loi de Wien décrit la relation liant la longueur d'onde λ_{\max} , correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température absolue T . On retient généralement :

$$\lambda_{\max} = \frac{h c}{4.9561142317 k T} = \frac{2.89777291 \times 10^{-3}}{T} \text{ m K} \quad \text{III-13}$$

Où h est la constante de Planck ; k , la constante de Boltzmann et c , la vitesse de la lumière dans le vide. [10]

Est alors ainsi définie, la constante de Wien, notée b ou σ_w :

$$\sigma_w = 2.89777291 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

III-4-6-3 Loi de Stefan-Boltzmann

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue. [11]

$$M^0 = \sigma T^4 \quad \text{III-14}$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Un corps rayonne d'autant plus qu'il est plus chaud.

III-4-6-4 Loi de Planck

L'émittance monochromatique pour une longueur d'onde α donnée est donnée par la loi de Planck :

$$M_{\alpha}^0 = \pi \cdot \hat{L}_{\alpha}^0 = \frac{2\pi \cdot k_p \cdot c^2}{\alpha^5 (e^{k_p c / \alpha K_B T} - 1)} \quad \text{III-15}$$

Où c est la vitesse de la lumière dans le vide, K_p est la constante de Planck et K_B est la constante de Boltzmann. [4]

- $K_p = 6,6255 \cdot 10^{-34}$ J.s
- $K_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ J/K

III-5 Comparaison des modes de transfert thermique

Le transfert d'énergie par chaleur est effectué généralement en utilisant une combinaison de différents modes de transfert. Il arrive que l'un des trois modes soit moins important comme est le cas pour le rayonnement dans le cas de la machine étudiée.

Caractéristique	Conduction	Convection	Rayonnement
Milieu de transfert	Solides, Liquides, Gaz	Fluides (liquides et gaz)	Vide et Atmosphère
Mécanisme	Collision de particules	Déplacement de masse à grande échelle	Émission d'énergie électromagnétique
Présence de matière	Oui	Oui	Non (peut se produire dans le vide)
Support matériel nécessaire	Oui	Oui	Non (peut se produire dans le vide)
Dépendance à la température	Oui	Oui	Oui (proportionnelle à la quatrième puissance de la température)
Méthodes de transfert supplémentaires	Transfert de masse	Transfert de masse	(pas de transfert de masse)
Vitesse de transfert	Plus lente	Plus rapide dans les fluides que dans les solides	Rapide, indépendante du milieu
Applications typiques	Échange de chaleur dans les matériaux solides	Circulation de l'air dans les pièces, transfert de chaleur dans les fluides	Échange de chaleur dans les fours, transfert de chaleur entre la Terre et l'espace

Tableau III-2 comparaison modes de transfert thermique

III-6 Modèle thermique de la MRV6/4

Pour modéliser la machine étudiée, il est nécessaire de mettre en équation les phénomènes de transfert de chaleur. Le mode le plus important étant la conduction.

III-6-1 Equations de transfert de chaleur par conduction

Considérons un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction Ox .

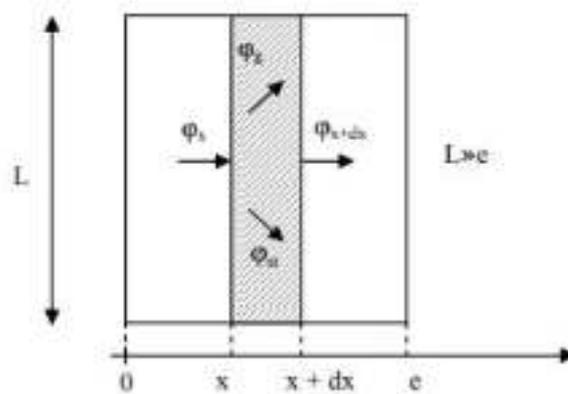


Figure-III-8 Bilan thermique sur un système élémentaire

Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\varphi_x + \varphi_g = \varphi_{x+dx} + \varphi_{st} \quad \text{III-16}$$

Avec :

$$\varphi_x = -(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_x \quad \text{Et} \quad \varphi_{x+dx} = -(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_{x+dx} \quad \text{III-17}$$

$$\varphi_g = \dot{q} S dx \quad \text{et} \quad \varphi_{st} = \rho cp S dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-18}$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx , nous obtenons :

$$\frac{(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_{x+dx} - (\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_x}{dx} + \dot{q} S = \rho cp S \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-19}$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} S = \rho cp S \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-20}$$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-21}$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- a) Si le milieu est isotrope : $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$
- b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\dot{q} = 0$
- c) Si le milieu est homogène, λ n'est fonction que de T [8].

Les hypothèses (a)+(b) + (c) permettent d'écrire :

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{d\lambda}{dT} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-22}$$

- d) Si de plus λ est constant (écart modère de température), nous obtenons l'équation de Poisson :

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-23}$$

Le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ est appelé la diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers un matériau.

- e) En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace

$$\nabla^2 T = 0 \quad \text{III-24}$$

Par ailleurs, les hypothèses a), c) et d) permettent d'écrire :

- Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-25}$$

Dans le cas d'un problème a symétrie cylindrique ou la température ne dépend que de r et de t, l'équation qui peut s'écrire sous forme simplifiée :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-26}$$

- L'équation de la chaleur devient en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-27}$$

Ou encore bidimensionnel et en coordonnées cartésienne :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{III-28}$$

A cette équation aux dérivées partielles, il faut associer des conditions aux limites géométriques du système qui sont de différents types :

- Condition de types Dirichlet ou la température est connue à la frontière considérée.
- Condition de type Neumann ou le flux de chaleur est connu.
- Condition de symétrie ou d'antisymétrie.
- Condition de convection à la frontière entre un milieu solide et un fluide.

Dans le cas d'un problème évolutionnaire, une condition initiale sur la valeur de la température est nécessairement associée au problème à résoudre.

III-6-2 Conditions aux limites

III-6-2-1 Condition de Neumann

La condition de Neumann est un type de condition aux limites utilisée dans les problèmes de transfert de chaleur. Elle spécifie le flux thermique à la frontière d'un domaine. Cette condition est particulièrement utile dans les situations où le taux de transfert de chaleur est connu à la surface d'un matériau plutôt que la température elle-même [15].

La condition de Neumann pour une surface donnée peut être exprimée comme suit :

$$q = k \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{III-29}$$

Avec :

- k est la conductivité thermique du matériau (en $\text{W/m}^1 \cdot \text{K}^{-1}$).
- $\frac{\partial T}{\partial n}$ est le gradient de température normal à la surface.
- q est le flux thermique imposé (en W/m^2).
- n est la direction normale à la surface.

La condition de Neumann peut être homogène (flux thermique nul) ou non homogène (flux thermique non nul).

Cette condition est souvent utilisée dans des situations pratiques telles que :

1. **Isolation Parfaite** : Si une surface est parfaitement isolée, il n'y a pas de flux thermique à travers cette surface. La condition de Neumann homogène s'applique alors :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{III-30}$$

2. **Surface avec Flux Thermique Imposé** : Si un flux thermique constant ou variable est appliqué à une surface, la condition de Neumann non homogène décrit cette situation.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{K}{Q} \quad \text{III-31}$$

III-6-2-2 Condition de Dirichlet

La condition de Dirichlet, aussi connue sous le nom de condition de température imposée, est un type de condition aux limites utilisé dans les problèmes de transfert de chaleur. Elle spécifie la température exacte à la frontière d'un domaine. Cette condition est particulièrement utile dans les situations où la température à la surface d'un matériau est contrôlée ou maintenue constante [15].

Mathématiquement, la condition de Dirichlet pour une surface donnée peut être exprimée comme suit :

$$T(x,t) = T_s(x) \quad \text{III-32}$$

Où :

- $T(x,t)$ est la température à la position x et au temps t .
- $T_s(x,t)$ est la température imposée à la frontière, qui peut être constante ou variable dans le temps et l'espace.

Cette condition est souvent utilisée dans des situations pratiques telles que :

Surfaces à Température Contrôlée : Par exemple, la surface d'un réacteur ou d'un échangeur de chaleur où la température est maintenue constante pour des raisons de sécurité ou d'efficacité.

Interfaces entre Matériaux Différents : Lorsque deux matériaux sont en contact, la température à l'interface peut être connue ou contrôlée, nécessitant l'application de la condition de Dirichlet.

III-7 Méthodes pour résoudre le problème de transfert thermique

Dans le domaine des machines électriques, plusieurs méthodes sont utilisées pour traiter et modéliser les phénomènes thermiques. Voici quelques-unes des principales méthodes :

1- Méthode analytique :

Les techniques analytiques nécessitent une résolution précise des équations de transfert de chaleur. On les utilise fréquemment pour résoudre des problèmes simples avec des géométries et des conditions aux limites simples [6].

- **Equation de la chaleur** : Une équation différentielle partielle décrivant la distribution de la température dans un matériau au fil du temps.
- **Méthode de séparation des variables** : Utilisée pour résoudre l'équation de la chaleur dans des domaines où les conditions aux limites sont séparables.
- **Solutions de Fourier** : Décomposition de la température en séries de Fourier pour résoudre des problèmes périodiques.

2- Méthode numérique :

Les méthodes numériques sont essentielles pour résoudre les problèmes complexes où les solutions analytiques sont impossibles à mettre en œuvre. Les équations de transfert de chaleur sont discrétisées et résolues à l'aide d'algorithmes informatiques [7].

- **Méthode des Différences Finies (FDM)** : Approche qui discrétise les équations de transfert de chaleur sur une grille spatiale et temporelle.
- **Méthode des Éléments Finis (FEM)** : Technique qui divise le domaine en petits éléments finis et utilise des fonctions de forme pour approximer les solutions.
- **Méthode des Volumes Finis (FVM)** : Similaire à FDM, mais conserve les flux de chaleur à travers les volumes de contrôle, souvent utilisée en mécanique des fluides.
- **Méthodes Monte Carlo** : Utilisées pour les problèmes de rayonnement thermique, simulant le chemin des photons à travers un matériau.

3- Méthode expérimentales :

On utilise des techniques expérimentales afin d'obtenir des informations empiriques sur le transfert de chaleur dans des systèmes réels.

- **Thermographie infrarouge** : Mesure de la distribution de la température sur une surface en utilisant des caméras infrarouges.
- **Capteurs de température** : Utilisation de thermocouples, résistances thermiques (RTD), et autres capteurs pour mesurer la température en différents points.
- **Calorimétrie** : Technique pour mesurer la quantité de chaleur transférée lors de réactions chimiques ou de changements de phase.

4- Méthodes Semi-Empiriques :

Ces méthodes combinent des approches théoriques avec des données expérimentales pour créer des modèles de transfert thermique plus précis [8].

- **Corrélations empiriques** : Formules dérivées de données expérimentales pour prédire le transfert de chaleur dans des configurations spécifiques (ex. : convection forcée dans les tubes).
- **Modèles hybrides** : Utilisation de données expérimentales pour ajuster les modèles numériques et améliorer leur précision.

III-8 Simulation thermique de la MRV6/4

Nous avons vu que la nature des équations du modèle thermique sont des équations aux dérivées partielles identiques à celle du problème magnétique, les conditions aux limites aussi. Pour passer au modèle thermique, on sélectionne sur le menu déroulant de FEMM le type (heat flow problem).

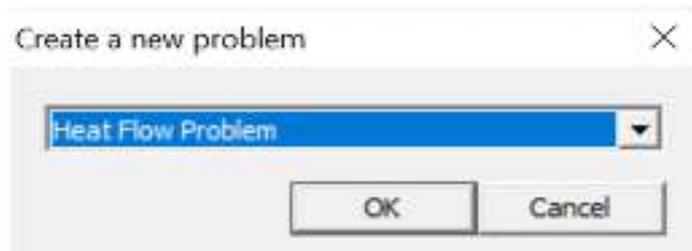


Figure III-9 Création d'un nouveau problème

III-8-1 Domaine d'étude de la MRV (6/4) en mode problème de flux de chaleur:

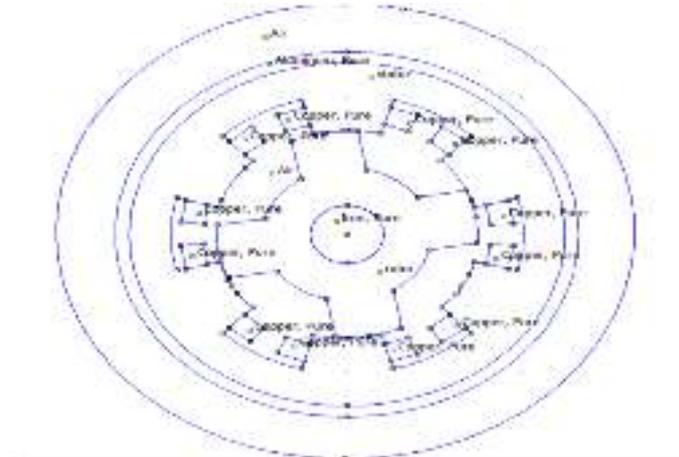


Figure III-10 Vue en coupe d'une MRV 6/4

III-8-2 Conditions aux limites

Pour assurer une modélisation précise et fiable, il est important de spécifier les conditions aux limites de chaque région du modèle, en tenant compte des interactions complexes entre les différentes composantes de la MRV et des influences environnementales. Ces conditions

peuvent inclure, par exemple, des températures prédéfinies, des flux thermiques spécifiques, et des transferts de chaleur par convection.

Condition de type Dirichlet : Comme la surface extérieure de la machine est en contact avec l'air ambiant, nous nous fixons de manière arbitraire une couche d'air à la surface externe de laquelle nous appliquons une condition de Dirichlet. Cela signifie que la température T à cette interface est fixée à la valeur de la température ambiante T_{∞} . Cette condition peut être exprimée comme suit :

$$T = T_{\infty} \quad \text{III-33}$$

III-9 Résultats de simulation :

Après avoir affecté les différents matériaux et leurs conductivités thermique, on a calculé les pertes volumiques dans les différentes régions de la machine à savoir les bobines, le stator et le rotor (voir le tableau III.3).

Matériau	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Capacité thermique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Pertes volumiques (W.m^{-3})
Bobines de cuivre (Cooper)	399	0.382	410097.0873
Fer stator	81	0.452	30.2192
Fer rotor	81	0.452	37.0594

Tableau III-3 Matériaux utilisés dans la machine et leurs caractéristiques

- On introduit les valeurs des pertes volumiques des différentes régions de la MRV comme entrées du programme de simulation numérique du problème thermique.

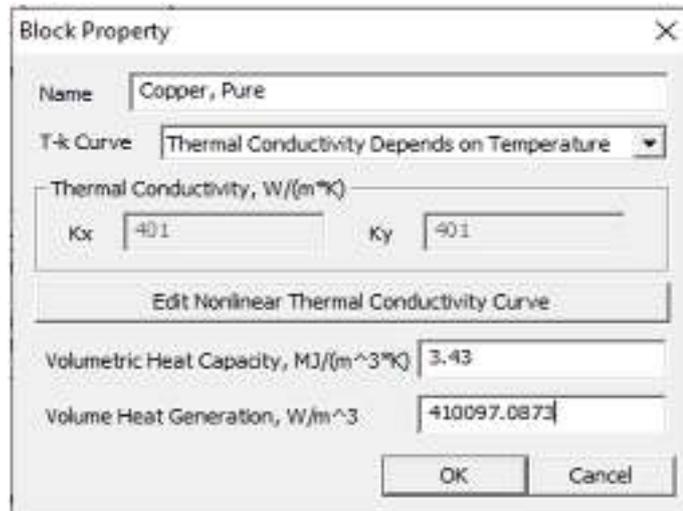
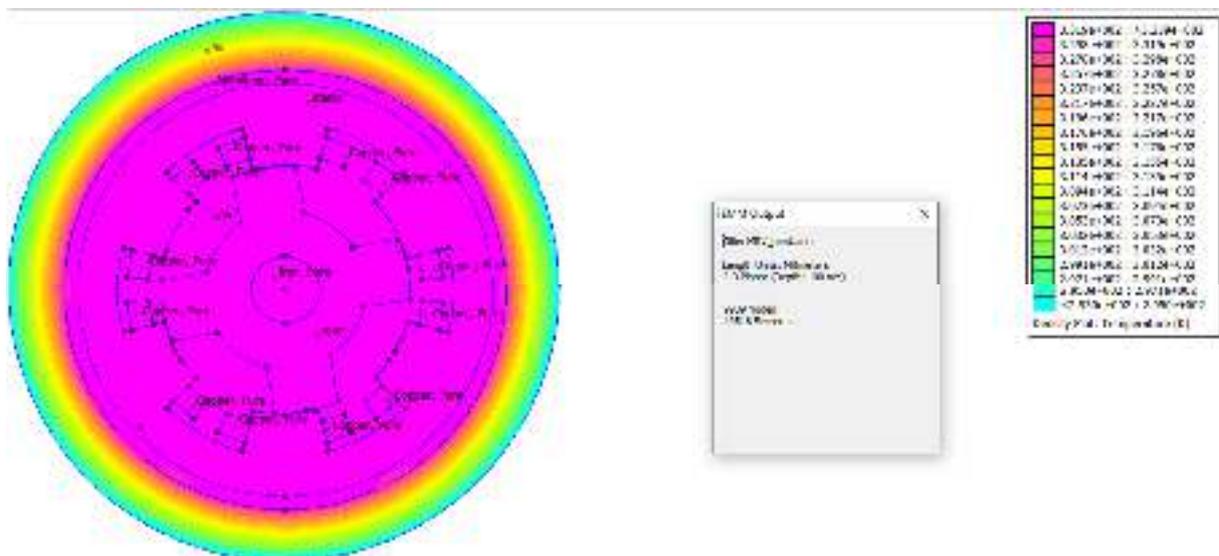


Figure III-11 bloc de propriétés thermiques d'un matériau

On lance le programme de résolution du problème thermique ainsi défini et on obtient le résultat de la répartition de la température dans la machine comme par exemple représenté sur la figure III.12.



La figure III-12 Résultats de la répartition de la température dans la MRV.

III-9-1 Influence du courant et de la vitesse de rotation sur l'échauffement de la machine :

Pour différentes valeurs du courant dans la MRV et pour diverses vitesses, les pertes Joule et fer varient et donc donnent des répartitions et des niveaux de température variable dans la machine étudiée.

Nous pouvons extraire de ces calculs les températures moyennes dans chaque région de la MRV pour des courants et vitesses de la machine comme paramètres (tableau III-4 à III-6).

	T_{stator}	T_{rotor}	$T_{entrfer}$	T_{Bobine}
$N_1=1000$	302.842	303.053	303.029	303.088
$N_2=3000$	302.887	303.287	303.186	303.383
$N_3=5000$	302.961	303.67	303.338	303.208
$N_4=6000$	302.999	303.878	303.441	303.246
$N_5=7000$	303.064	304.228	303.614	303.312
$N_6=8000$	303.118	304.528	303.561	303.366

Tableau III-4 : Températures moyennes dans différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant I=5A.

Les figures III.13-15 montrent les variations des températures moyennes en fonction de la vitesse de rotation de la machine avec le courant de phase comme paramètre.

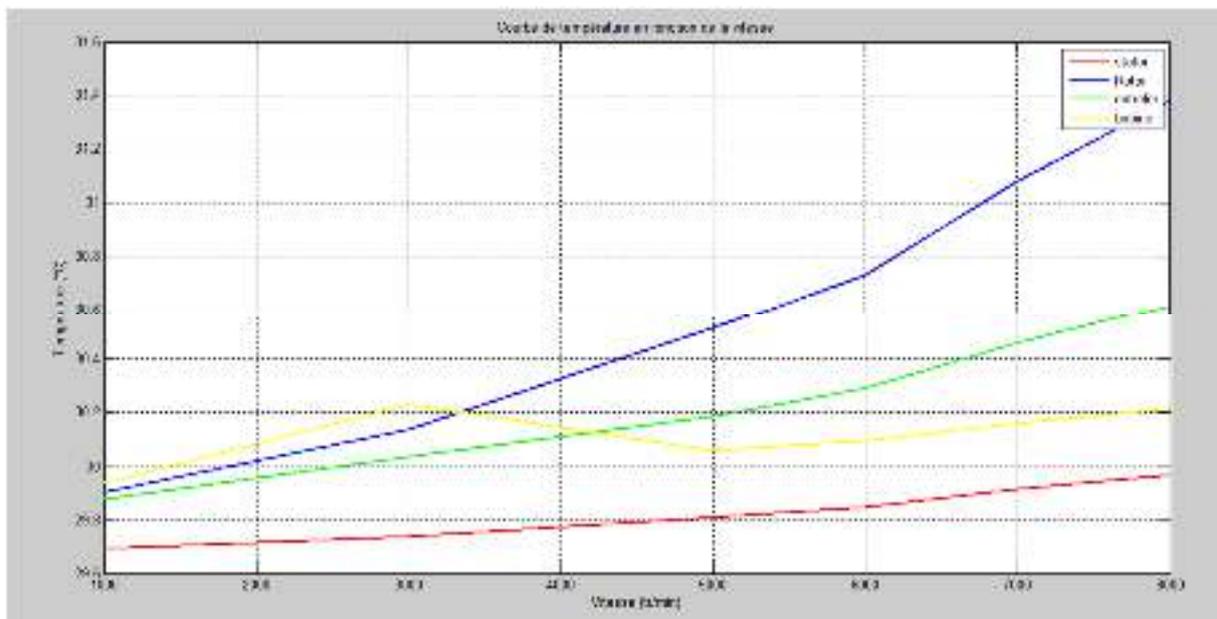


Figure III-13: Variation de la température dans les différentes régions de la MRV en fonction de la vitesse pour un courant I=5A.

	T_{stator}	T_{rotor}	$T_{entrfer}$	T_{Bobine}
$N_1=1000$	318.108	319.645	318.586	318.736
$N_2=3000$	318.202	319.148	318.838	318.836
$N_3=5000$	318.378	320.026	319.278	319.008
$N_4=6000$	318.478	320.526	319.524	319.099
$N_5=7000$	318.587	321.17	319.844	319.22
$N_6=8000$	318.723	321.903	320.207	319.357

Tableau III-5 : Températures moyennes dans différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant I=8A.

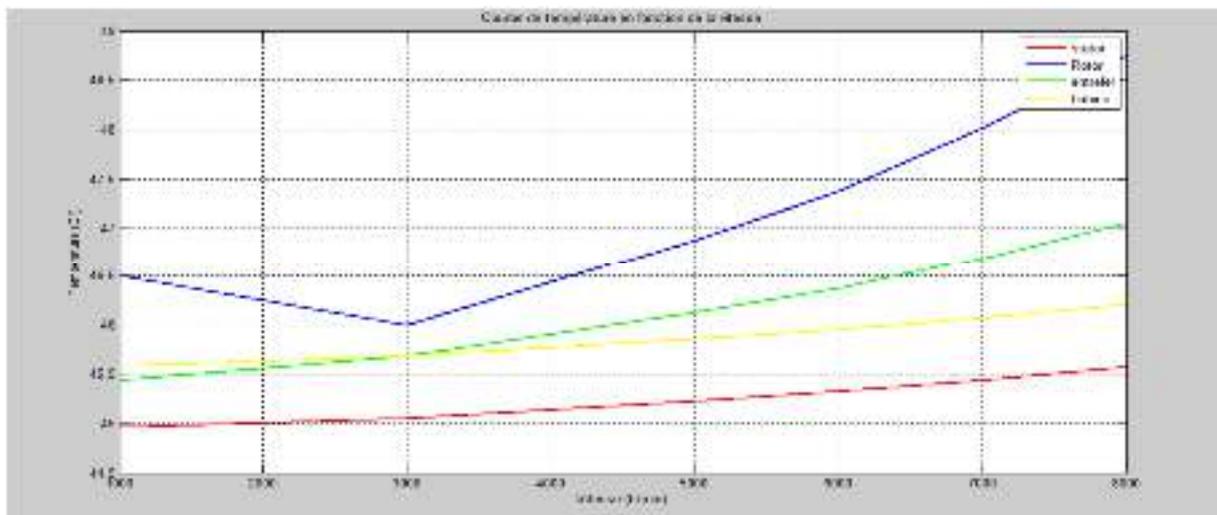


Figure III-14 : Evolution de la température dans des différentes régions de la mrv en fonction de la vitesse pour un courant I=8A.

	T_{stator}	T_{rotor}	$T_{entrfer}$	T_{Bobine}
$N_1=1000$	332.307	333.154	333.057	333.29
$N_2=3000$	332.43	333.741	333.356	333.414
$N_3=5000$	332.636	334.82	333.895	333.623
$N_4=6000$	332.68	335.513	334.334	333.756
$N_5=7000$	332.927	336.353	334.659	333.917
$N_6=8000$	333.097	337.097	335.124	335.251

Tableau III-6 : Températures moyennes dans différentes régions de la MRV étudiée en fonction de la vitesse pour un courant I=10A.

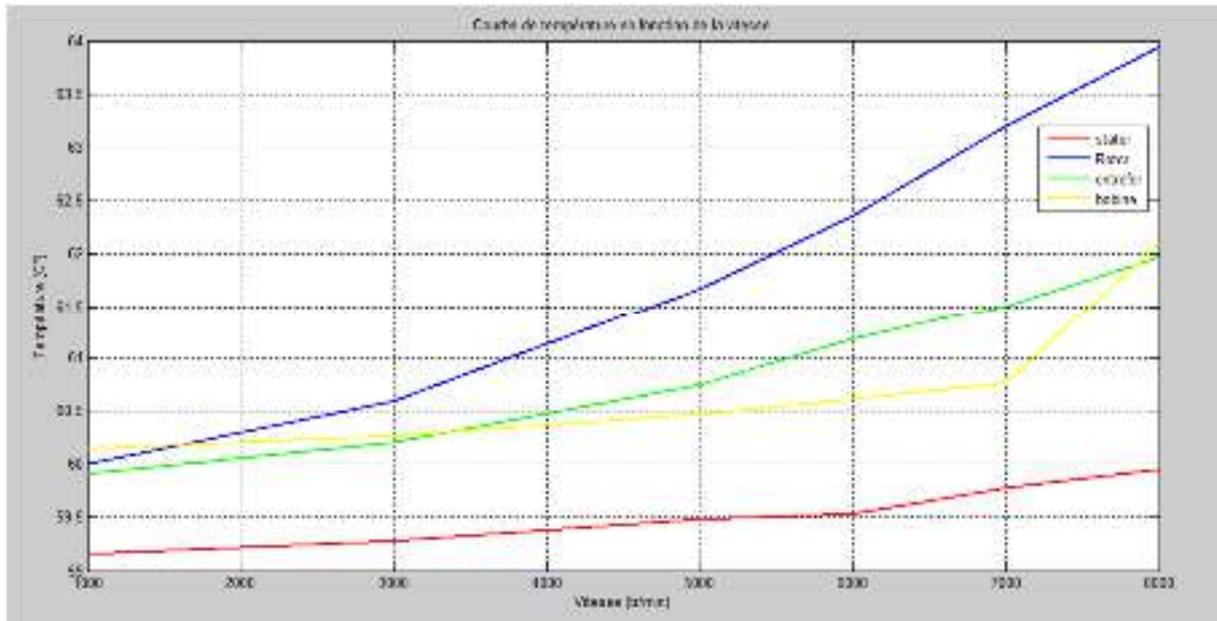


Figure III-15: Evolution de la température dans des différentes régions de la mrv en fonction de la vitesse pour un courant I=10A.

Commentaire

Les tableaux III.4-6 révèlent des températures moyennes plus élevées dans les deux zones de la machine, à savoir la bobine et le rotor, par rapport aux autres zones. De plus, il est observé que l'élévation de la vitesse autant que l'augmentation de l'intensité du courant une augmentation de la température entraînent un accroissement de la température de la machine.

Les variations de température dans le rotor, le stator, l'entrefer et les bobines d'un moteur MRV (machine à réluctance variable) dépendent de la vitesse du moteur. À des vitesses plus élevées, les pertes par courants de Foucault dans le rotor varient, entraînant une génération de chaleur accrue dans le stator et le rotor. Par conséquent, la température de ces composants a tendance à augmenter proportionnellement à la vitesse de rotation. Cependant, cette augmentation de température peut être contenue grâce à un système de refroidissement efficace, tel qu'un système à air pulsé ou une boucle de refroidissement liquide.

III-9-2 Evolution de la température en fonction de la longueur pour différents courants dans la machine :

Après avoir analysé la répartition des températures moyennes dans les différentes zones de la MRV en fonction de la vitesse de rotation pour différents courants, nous poursuivons l'étude

de l'évolution de la température en fonction de la longueur pour courant de phase. Pour cela nous définissons une ligne dans la direction radiale allant du centre vers la limite externe de la couche d'air ambiant entourant la machine (trait en rouge sur la figure III-16). Le point initiale (longueur zéro) de la longueur étant évidemment le centre de la machine

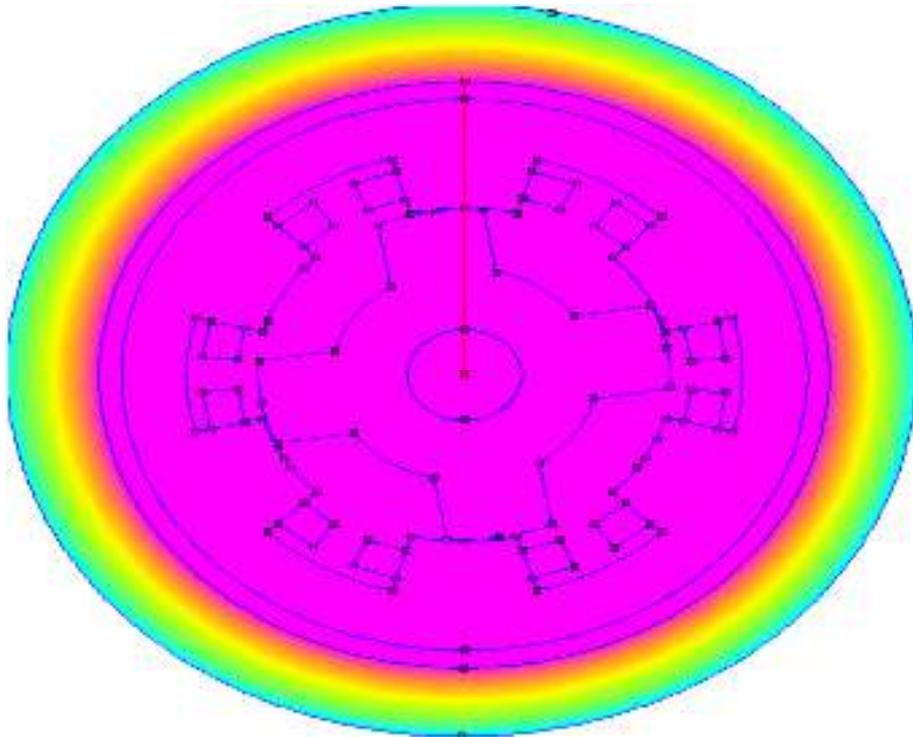


Figure III-16 L'évolution de la température en fonction de la longueur.

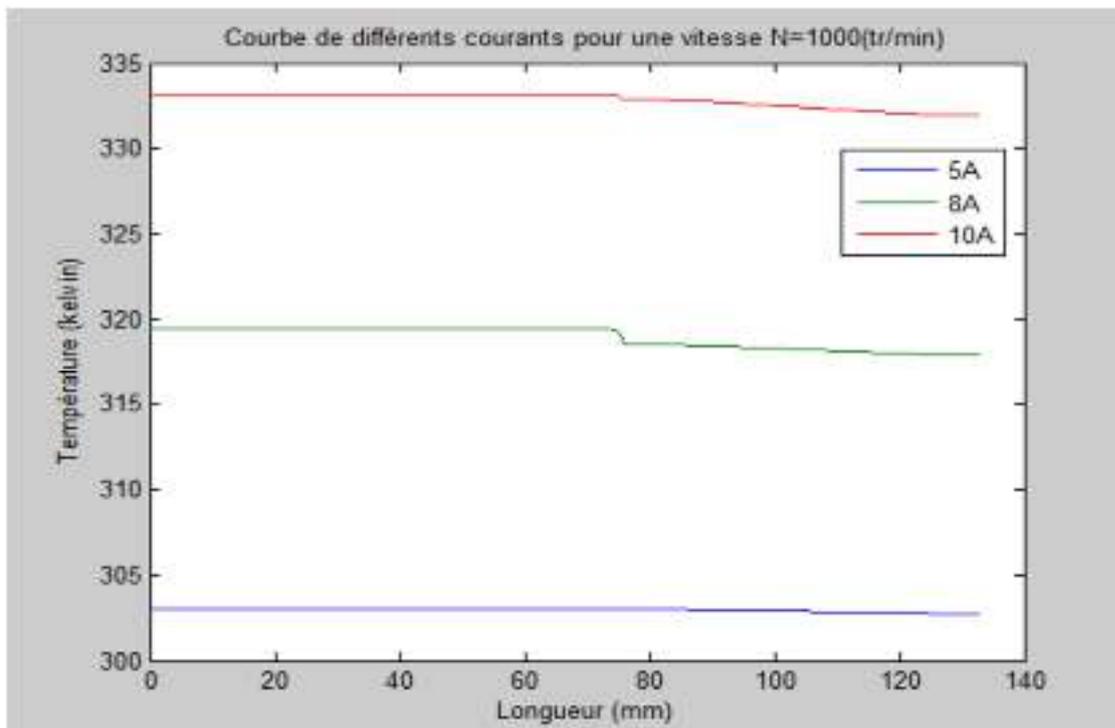


Figure III-17: Evolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur de la MRV Pour N=1000 tr/mn.

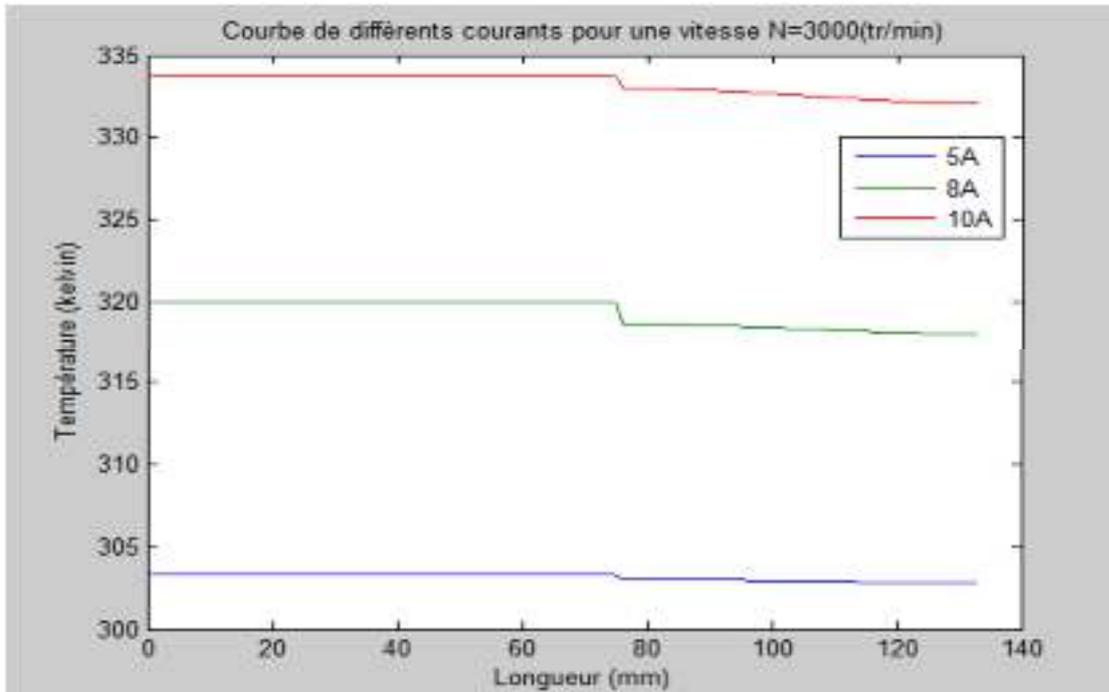


Figure III-18: Evolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur de la MRV Pour N=3000 tr/mn.

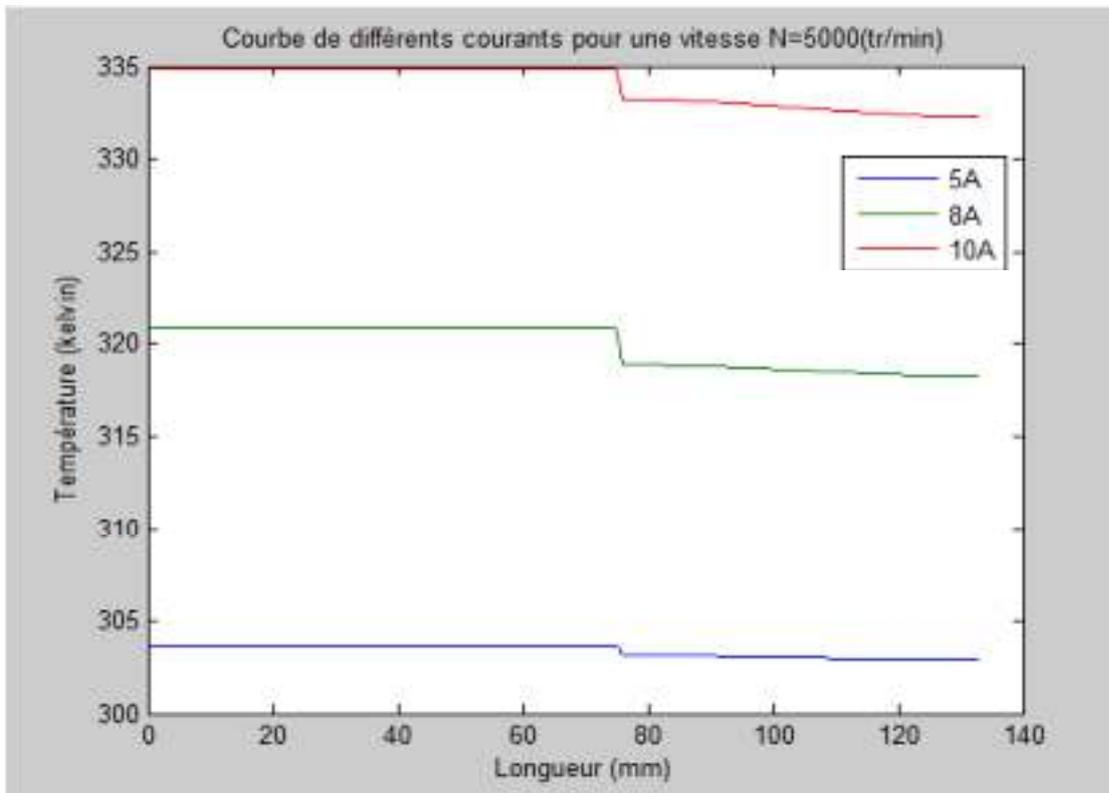


Figure III-19: Evolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur la MRV Pour N=5000 tr/mn.

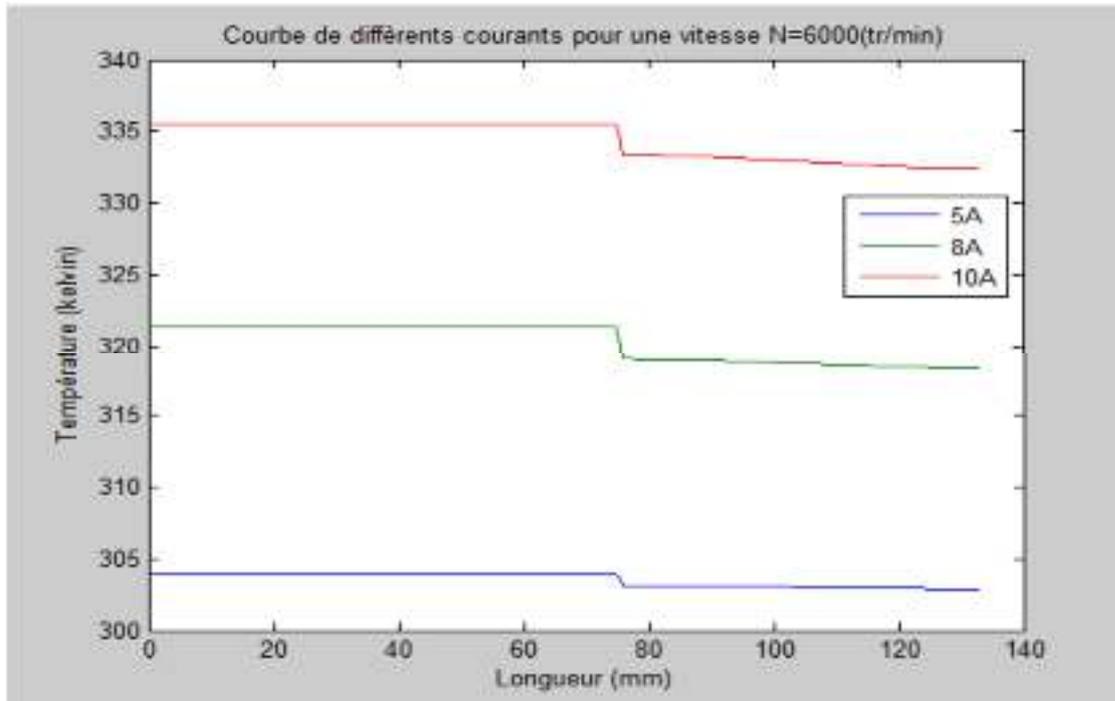


Figure III-20: montre l'évolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur la mrv Pour N=6000 tr/mn.

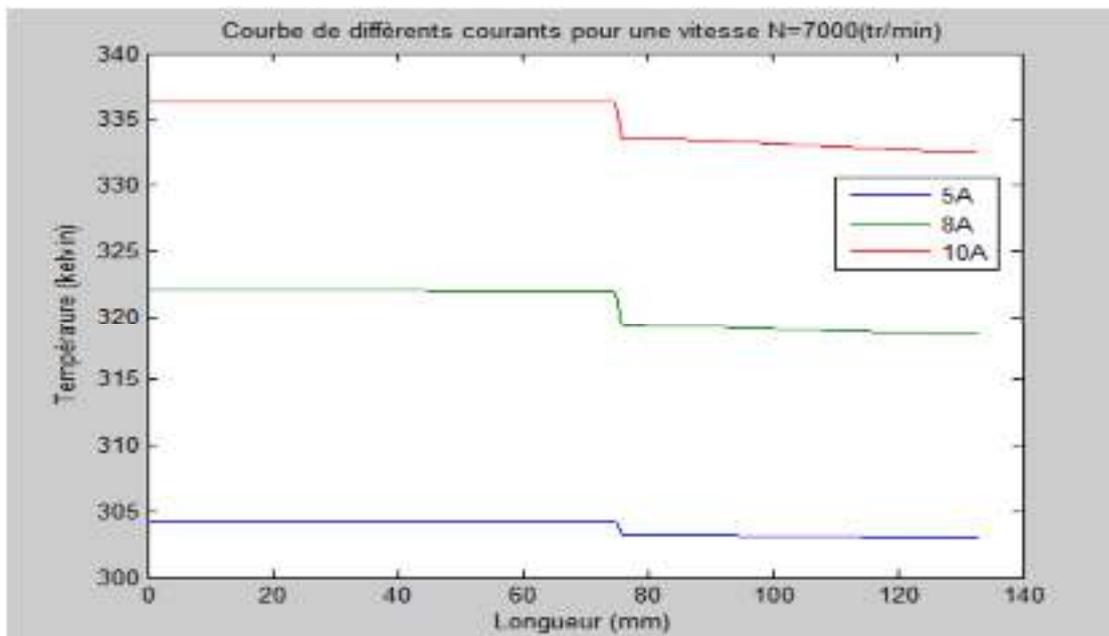


Figure III-21 : Evolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur la MRV Pour N=7000 tr/mn.

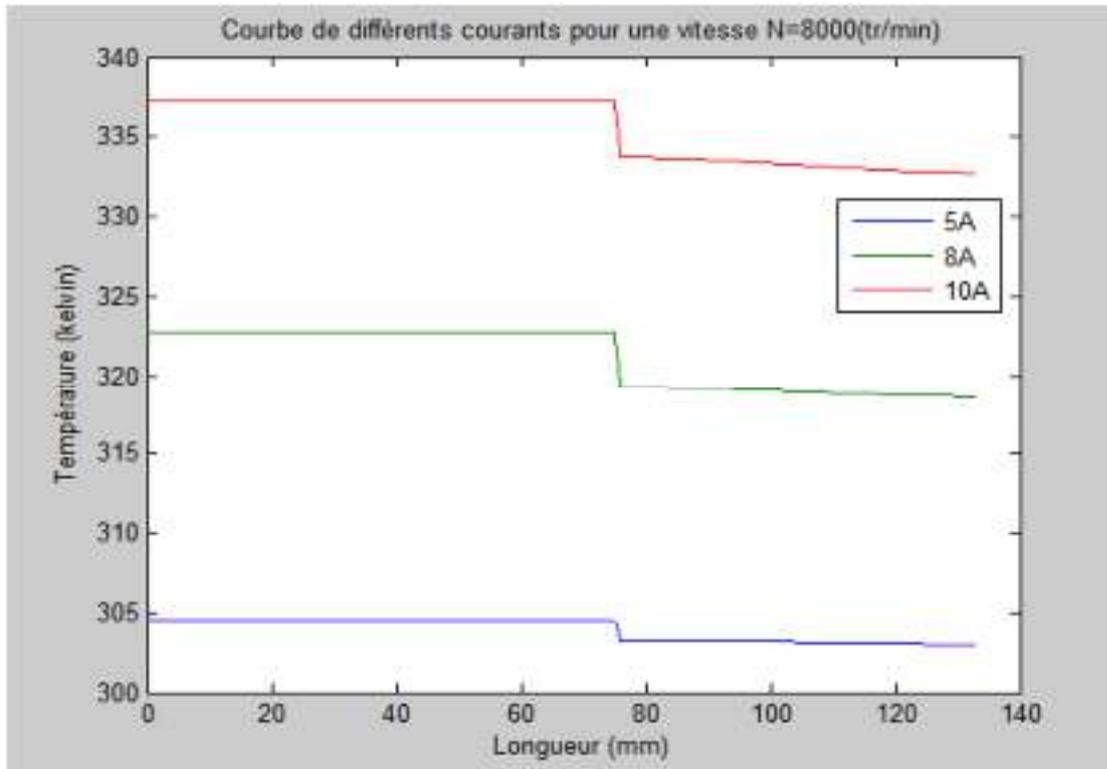


Figure III-22 : montre l'évolution de la température pour les différents courants en fonction de la longueur la MRV pour N=8000 tr/mn.

Commentaire

Les Figures (III-17) à (III-22) illustrent la variation de la température le long de la ligne tracée sur la Figure (III-16) dans la machine, à différents courants et à une vitesse de rotation constante. Elles offrent des informations précieuses sur le transfert de chaleur à travers la machine. En analysant ces courbes pour trois niveaux de courant distincts, on constate que la température augmente généralement de manière "linéaire" le long de la machine pour chaque courant en raison de la dissipation thermique le long de ce trajet. Cependant, à des courants plus élevés, la pente de cette augmentation peut être plus prononcée, suggérant une augmentation de la génération de chaleur due à des pertes plus importantes dans différentes parties de la machine. Les variations significatives entre les courbes pour les différents courants indiquent des changements dans la répartition des températures à travers la machine. Pour prévenir tout risque de dommage, il peut être nécessaire d'apporter des ajustements au niveau de la conception ou au fonctionnement de la machine afin d'assurer une dissipation thermique constante et d'éviter la formation de points chauds.

III-9-3 Evolution de température en fonction de la longueur pour différentes vitesses de rotation de la machine :

Les figures III-23 à III-25 représentent les variations de température depuis le centre de la machine en remontant vers la surface externe de la couche d'air entourant la machine, en prenant en compte la vitesse de rotation et le courant de phase comme paramètres.

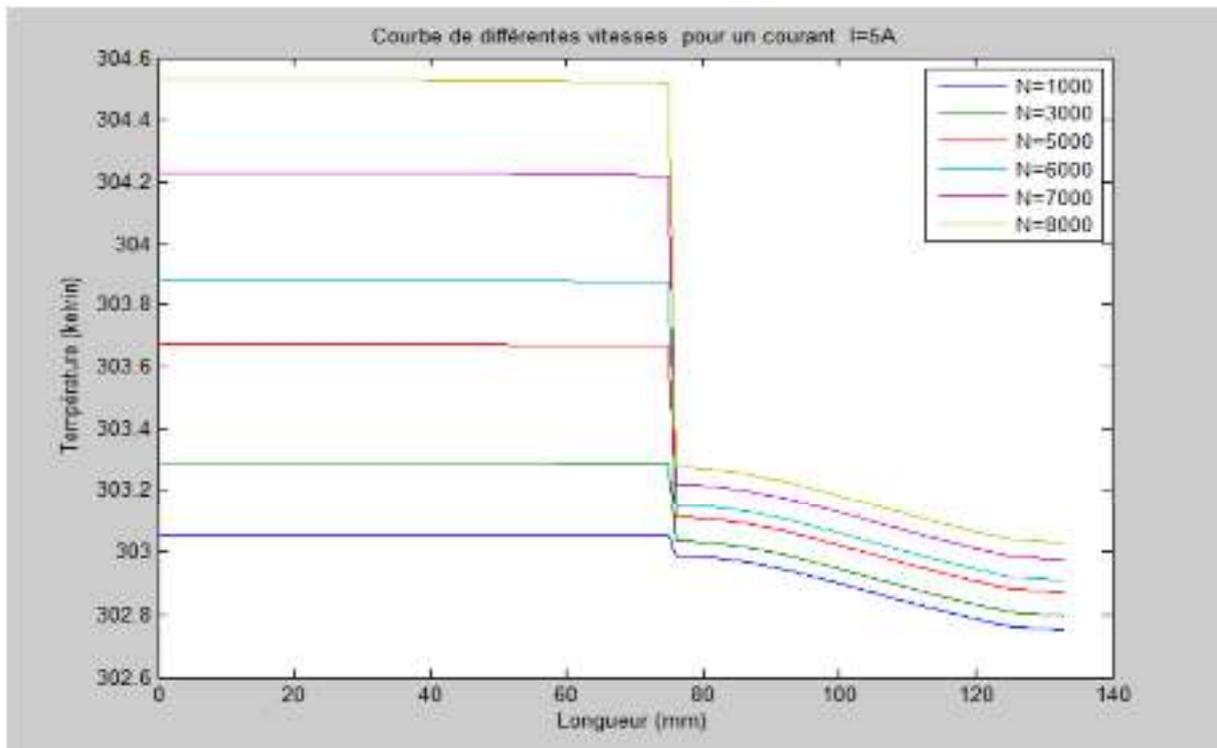


Figure III-23 Evolution de la température des différentes vitesses en fonction de la longueur de la MRV Pour I=5A.

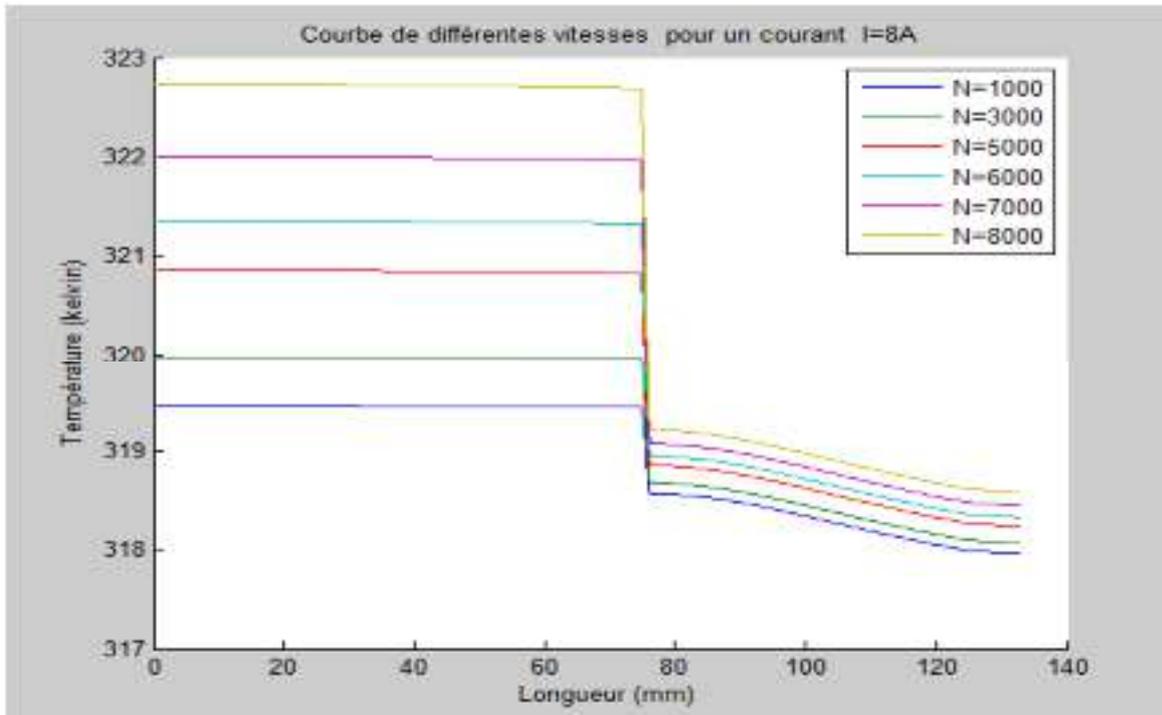


Figure III-24 : montre l'évolution de la température à différentes vitesses en fonction de la longueur de la MRV Pour I=8A.

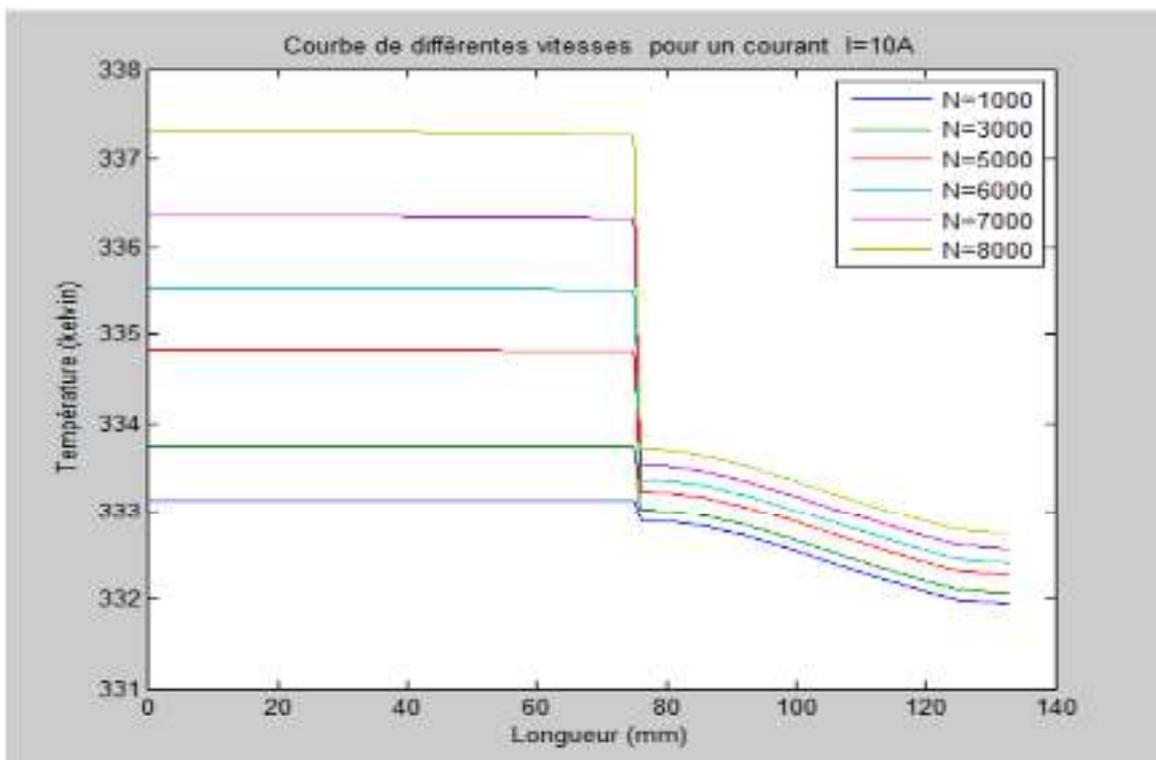


Figure III-25 : Evolution de la température à différentes vitesses en fonction de la longueur de la MRV Pour I=10A.

Commentaire

Il est important d'examiner l'impact de la vitesse de rotation sur la répartition de la chaleur au sein d'une machine. Il est important de comprendre comment la température varie en fonction de la longueur de la machine tout en maintenant le courant constant. En général, à des vitesses plus élevées, on peut s'attendre à une augmentation de la température de la machine en raison des pertes par frottement et des pertes par courants de Foucault accrues. Ainsi, une augmentation globale de la température le long de la machine peut être observée à mesure que la vitesse de rotation augmente, même si le courant reste constant.

Il est également pertinent de noter que l'augmentation de la température à l'intérieur de la machine peut ne pas être uniforme. Certaines zones pourraient connaître une élévation de température plus importante en raison de pertes concentrées, tandis que d'autres sections pourraient rester relativement plus froides en raison d'une dissipation thermique plus efficace ou d'autres facteurs tels que la ventilation instaurée.

III-10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié comment utiliser la méthode des éléments finis (implémentée sur le logiciel d'accès libre FEMM) pour simuler le transfert de chaleur dans une Machine à Réductance Variable (MRV). Les modèles numériques ont joué un rôle essentiel en nous permettant d'analyser comment la chaleur se propage à travers la Machine à Réductance Variable (MRV), en identifiant les températures dans les différentes zones de la MRV. Cette approche nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes et d'identifier des possibilités d'amélioration. Grâce à cette analyse approfondie, il est possible d'optimiser les systèmes de MRV et d'ouvrir la voie à des progrès continus dans ce domaine.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons mis en œuvre un modèle magnétothermique pour la simulation numérique d'une MRV6/4. Le couplage entre les phénomènes magnétiques et thermiques au sein de cette machine est un couplage faible : les phénomènes magnétiques sont beaucoup plus rapides que les phénomènes thermiques. Nous n'avons donc analysé que le fonctionnement aux régimes permanents magnétique et thermique.

La machine à réluctance variable est de conception très simple qui peut concurrencer les machines classiques à courant alternatif grâce à ses bonnes performances. Avec un accent particulier sur la configuration 6/4. Les MRV représentent une solution prometteuse pour diverses applications industrielles en raison de leur robustesse, de leur coût de fabrication réduit et de leur efficacité énergétique. Toutefois, pour exploiter pleinement ces avantages et améliorer ses performances notamment les puissances ou couple volumiques, il est important de comprendre et de repousser les limites imposées par les contraintes thermiques en terme de vitesses ou de courant de phase.

Dans les machines électrique, le point faible reste l'isolant utilisé pour protéger les conducteurs des courts circuits entre spires et/ ou entre phase. Il est important de l'introduire dans le modèle géométrique de la machine, à l'avenir, pour en tenir compte dans le choix du matériau (nature de l'isolant) et la détermination de ses dimensions.

Une autre perspective possible est de prendre en considération l'évolution des paramètres magnétiques et thermiques des matériaux constituant la machine étudiée (Le logiciel FEMM étant adapté pour se faire) et ainsi analyser l'évolution des températures en fonction du temps.

Références bibliographiques

- [1] F.M.SARGOS : "Machine à réluctance variable". Cours non éditer de DEA.I.N.P.L. NANCY, France. Décembre 1992.
- [2] A. MAILFERT, F-M. SARGOS : "Machines à réluctance variable : principes des MRV, machines à commutation». Techniques d'ingénieurs Techniques de l'Ingénieur, D 3680.
- [3] M. REZIG : «Machines électriques spéciales. ", Cours M1 Electromécanique, Université de Biskra.
- [4] T. OUKSEL : "Cours de transfert thermique. " 3^e Licence énergétique
- [5] B. KIYYOUR : "Commande vectorielle de la machine à réluctance variable à stator lisse et rotor massif", Thèse de magister, Université de Batna, 2001.
- [6] C. KEYES : "Guide de référence sur l'efficacité énergétique de moteurs, " CEA Technologies Inc., Fys²²²²²²²²²²²²&hwick, 2007.
- [7] S. MOUELLEF : "Contribution à l'étude d'une machine a reluctance variable", Thèse de Magister, Université de Constantine, Juin 2008.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique?veaction=edit§ion.
- [9] P. MARTY : "Cours de transferts thermiques, Conduction et rayonnement", Génie des procédés, L3 Université Joseph Fourier, Grenoble, 2012-2013.
- [10] <http://www.techno-sciences.net/>
- [11] J.F. SACADURA : "Initiation aux transferts thermiques", Edition Tec et Doc, Paris, 2000.
- [12] S. BADACHE : "Contribution à la modélisation thermique d'une machine à reluctance variable à double saillance (MRV6/4) par éléments finis en 2D et 3D. ", Thèse de Doctorat en sciences, UST Oran, 2016
- [13] <https://www.ferlam-technologies.fr/conduction-thermique-comprendre-le-processus-et-ses-enjeux>
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivit%C3%A9_thermique

- [15] F. P. INCROPERA, D. P. DEWITT, T. L. BERGMAN, A. S. LAVINE: "Fundamentals of Heat and Mass Transfer. ", John Wiley and Sons, 6^e edition, 2007.
- [16] S. KHALDI: «Modélisation du transfert thermique. « Cours M2- Energétique, Université de Tlemcen.
- [17] D.A. STATON, A. CAVAGNINO: "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models. ", Industrial Electronics, IEEE Transactions on IE, vol. 55, n° 10, pages 3509-3516, Oct 2008.
- [18] F.Z. SERAT : " Transfert de chaleur" Cours L2, Université d'Oran2. <https://elearn.univ-oran2.dz/course/view.php?id=3648#section-0>
- [19] : R. REZGUI : " Etude d'une machine à réluctance variable linéaire par la méthode des éléments finis. ", Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou,
- [20] <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [21] N. Makhlof, M.T Ouammar, "Modélisation thermique d'une machine à réluctance variable à double saillance", Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2020