

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Réf.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Modélisation d'une machine à courant continu par
logiciel COMSOL -Multiphysics**

Présenté par :

ZEKRAOUI Errabia

Devant le jury compose de :

Mr REZIG Mohamed

MAA

President

Mr kHENE Mohamed Lotfi

MCA

Encadreur

Mr ALLOUI Lotfi

Prof

Examineur

Année universities: 2017 / 2018

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Modélisation d'une machine à courant continu par logiciel
COMSOL -Multiphysics**

Présenté par :
ZEKRAOUI Errabia

Avis favorable de l'encadreur :
KhENE Mohamed Lotfi

Avis favorable du Président du Jury

REZIG Mohamed

Cachet et signature

Résumé

Les machines électrique équipent la majeure partie des systèmes d'entraînement industriels à vitesse variable. les applications vont de la robotique (servomoteurs) jusqu'à l'entraînement des laminoirs en sidérurgie en passant par le domaine des transports. La machine à courant continu est restée longtemps l'actionneur les plus utilisé pour réaliser ces systèmes. Convenablement compensée, cette machine présente l'avantage d'être simple à commander, le couple étant directement proportionnel au courant d'induit. La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. L'objectif de ce travail est de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans la machine à courant continu par l'utilisation du logiciel COMSOL-Multiphysics, pour calculer les différentes grandeurs électromagnétiques tels que : le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique et le champ magnétique afin de prévoir certains grandeurs développés par la machine tel que l'énergie magnétique.

ملخص

الألات الكهربائية تجهز معظم أنظمة محركات السرعة المتغيرة الصناعية ، وتتراوح التطبيقات من الروبوتات (المحركات) إلى المطاحن المتدرجة في صناعة الحديد والصلب والنقل. لطالما كانت آلة التيار المستمر هي المحرك الأكثر استخدامًا لهذه الأنظمة. هذه الماكينة تتميز بالتعويض المناسب ، وتتميز بكونها سهلة التحكم ، حيث يتناسب عزم الدوران بشكل مباشر مع تيار المحرك. المحاكاة وسيلة فعالة واقتصادية شائعة الاستخدام للدراسات الأولية و / أو المقارنة، سواء في مرحلة التطوير (التصميم) وأثناء التشغيل العادي للأنظمة. الهدف من هذا العمل هو محاكاة الظواهر الكهرومغناطيسية في جهاز DC باستخدام برنامج COMSOL-Multiphysics ، لحساب الكميات الكهرومغناطيسية المختلفة مثل: المتجه المغنطيسي المحتمل ، الحث المغناطيسي والمجال المغنطيسي للتنبؤ بمقاييس معينة طورته الآلة مثل الطاقة المغناطيسية.

Dédicaces

** Ma très chère mère.*

** Mon très cher père.*

** Mes sœurs et mes frères*

** toute la famille zekraoui*

** Tout mes amis.*

** Tout la promotion 2017/2018*

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné du courage et de la patience pour accomplir ce travail.

Ces mémos actuels n'auraient pas pu être créés sans l'apport des personnes qui leur offrent beaucoup de plaisir aujourd'hui et merci pour leur gratitude et leur témoignage profond.

Nous remercions notre superviseur, Mr .Khene Mohamed Lotfi, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail, que nous avons consacré tout au long de son travail.

Tous les professeurs du Collège des Sciences et Technologies, qui n'ont pas cessé de nous aider.

Nous n'oublions pas le soutien moral et matériel de notre peuple.

Nous espérons être la même chose pour tous nos amis qui ont un soutien ferme et la loyauté dans l'amitié. Merci.

Nous remercions également les membres du jury qui travailleront pour calmer, évaluer et juger notre travail. Enfin, nous avons remercié tous ceux qui ont aidé, de près ou de loin, pendant l'achèvement de ce travail.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I .1 : Symboles de la machine à courant continu.....3

Figure I .2 : L'inducteur d'une machine à courante continu.....5

Figure I .3 : L'induit d'une machine à courant continu.....6

Figure I .4 : Eléments d'une machine à courant continu.....7

Figure I .5 : Barre en translation dans le champ B.....7

Figure I .6 : Barre place dans un champ B.....8

Figure I .7 : Moteur série.....9

Figure I .8 : Moteur shunt.....10

Figure I .9 : Diagramme des puissances pour les générateurs.....11

Chapitre III

Figure III .1 : Diagramme des étapes de conception avec COMSOL.....26

Chapitre IV

Figure IV.1 : La géométrie de la machine.....28

Figure IV.2 : L'interface de COMSOL- Multiphysics.....29

Figure IV.3 : Fenêtre de paramètres.....29

Figure IV.4 : Fenêtre de la géométrie.....30

Figure IV.5 : Fenêtre de matériaux.....30

Figure IV.6: Fenêtre de maillage.....31

Figure IV.7 : Maillage de la génératrice étudié.....31

LISTE DES FIGURES

Figure IV.8 (a-d) : Densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	33
Figure IV.9 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	34
Figure IV.10 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	35
Figure IV.11 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	36
Figure IV.12 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	37
Figure IV.13 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	38
Figure IV.14 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 50, 75, 100$ et $150 tr/min$ respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	40
Figure IV.15 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et $300 tr/min$ respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	41
Figure IV.16 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	43
Figure IV.17 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	44
Figure IV.18 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	45
Figure IV.19 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	46

LISTE DES FIGURES

Figure IV.20 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	47
Figure IV.21 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	48
Figure IV.22 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 50, 75, 100$ et $150 tr/min$ respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	50
Figure IV.23 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et $300 tr/min$ respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	51
Figure IV.24 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	53
Figure IV.25 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour Différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	54
Figure IV.26 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	55
Figure IV.27 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	56
Figure IV.28 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	57
Figure IV.29 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$	58

LISTE DES FIGURES

Figure IV.30 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	60
Figure IV.31 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et 300 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$	61

Liste des Tableaux

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Dimensions de la machine.....	27
---	----

LISTE DES SYMBOLES

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V/m],

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A/m],

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T],

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m],

ρ : Densité volumique de charges électriques [C/m],

\vec{J}_c : Densité du courant électrique de conduction [A/m^2],

J_D : Vecteur densité du courant électrique de déplacement [A/m²],

ε : Permittivité diélectrique [F/m],

μ : Perméabilité magnétique [H/m],

ν : Réflectivité magnétique [m/H],

σ : Conductivité électrique [S/m],

ϑ : Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptible de ce déplacé [m/s]. [8]

Remerciement	
Dédicaces	
Table des matières	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la machine à courant continu	
I.1	Introduction..... 3
I.2	Symboles..... 3
I.3	Constitution d'une machine à courant continu 4
I.3.1	L'inducteur 4
I.3.1.1	Une culasse (ou bâti) en fonte ou en acier coulé 4
I.3.1.2	Pôles principaux 4
I.3.1.3	Les bobines inductrices 4
I.3.1.4	Les pôles auxiliaires 4
I.3.1.2	L'induit..... 5
I.3.2.1	Rôle..... 5
I.3.2.2	Encoches 5
I.3.2.3	Entrefers..... 5
I.3.2.4	Distribution du flux 5
I.3.2.5	Bobinage 6
I.4	Principe de fonctionnement 7
I.4.1	Cas Générateur 7
I.4.2	Cas Moteur 8
I.5	Les matériaux utilisés dans la machine à courant continu 8
I.5.1	Les matériaux ferromagnétiques doux 8
I.5.2	Les aimants permanents (matériau ferromagnétique dur) 9
I.6	Les différents types de moteur à courant continu..... 9
I.6.1	Moteur série..... 9
I.6.2	Moteur shunt 10
I.6.3	Moteur à aimant permanent..... 11
I.7	Diagrammes des puissances 11
I.7.1	Cas générateur..... 11
I.7.2	pour le fonctionnement dans le Cas moteur 12
I.8	Couple électromagnétique 12
I.8.1	pour le fonctionnement Dans le cas moteur 12
I.8.2	pour le fonctionnement Dans le cas générateur..... 12
I.9	Utilisation de la machine à courant continu 12
I.10	Avantages et inconvénients 13
I.11	Conclusion 14

Chapitre II : les formulations mathématiques

II.1	Introduction :	15
II.2	Les équations électromagnétiques	15
II.3	Les modèles électromagnétiques	16
II.3.1	Le modèle électrostatique.....	16
II.3.2	Modèle magnétostatique.....	17
II.3.2.1	Modèle magnétostatique scalaire.....	17
II.3.2.2	Modèle magnétostatique vectorielle	17
II.3.3	Modèle électrocinétique	18
II.3.4	Modèle magnétodynamique	19
II.4	Conclusion.....	20

Chapitre III : Méthodes numériques

III.1	Introduction	21
III.2	Méthode de résolution des équations aux dérivées partielles.....	21
III.2.1	Méthodes analytiques	21
III.2.2	Méthodes numériques	21
III.2.2.1	Méthodes des volumes finis (MVF)	22
III.2.2.2	Méthode des intégrales de frontières (MIF)	22
III.2.2.3	Méthodes des différences finies (MDF)	22
III.2.2.3.1	Avantages de la méthode.....	23
III.2.2.3.2	Inconvénients de la méthode.....	23
III.2.2.4	Méthodes des éléments finies (MEF)	23
III.2.2.4.1	principe de la méthode éléments finis	23
III.2.2.4.2	Avantages et inconvénients de la méthode.....	24
III.3	Le logiciel COMSOL	24
III.3.1	Aperçu sur le logiciel Comsol	24
III.3.2	Comsol Multi-physiques	25
III.3.3	Avantages de conception avec COMSOL-Multiphysics.....	25
III.3.4	Méthodologie de conception avec COMSOL-Multiphysics	25
III.4	Conclusion.....	26

Chapitre IV : Applications

IV.1	Introduction :	27
IV.2	machine a courant continu	27
IV.2.1	La géométrie de la machine	27
IV.2.2	L'interface de COMSOL- Multiphysics	28
IV.3	Les étapes de modélisation par COMSOL- Multiphysics	29
IV.3.1	Les paramètres	29
IV.3.2	La géométrie	30
IV.3.3	Matériaux	31
IV.3.4	Maillage de la génératrice	31
IV.4	Résultats de simulation	32
IV.4.1	Machine a courant continu avec circuit magnétique en Steel AISI 4340	32
IV.4.1.1	Influence de courant d'excitation	32
IV.4.1.2	Interprétation	39
IV.4.1.3	Influence de la vitesse de rotation	39
IV.4.1.4	Interprétation	39
IV.4.2	Génératrice à courant continu avec circuit magnétique en soft Iron (without losses)	42
IV.4.2.1	Influence de courant d'excitation	42
IV.4.2.2	Interprétation	49
IV.4.2.3	Influence de la vitesse de rotation	49
IV.4.2.4	Interprétation	49
IV.4.3	Génératrice à courant continu avec circuit magnétique en soft Iron (with losses)	52
IV.4.3.1	Influence de courant d'excitation	52
IV.4.3.2	Interprétation	59
IV.4.3.3	Influence de la vitesse de rotation	59
IV.4.3.4	Interprétation	59
IV.5	Conclusion	62
	Conclusion générale	63

Introduction générale

Introduction générale

Les moteurs et les générateurs (dynamos) à courant continu furent les premières machines électriques utilisées par les ingénieurs au milieu du 19^{ème} siècle pour produire de la puissance motrice particulièrement dans le transport ferroviaire (tramways, TGV). Edison éclaira New York au moyen du courant continu, alors que Westinghouse proposait le courant alternatif vers le dernier quart du siècle en cause. Même si le moteur à courant continu est en voie d'être remplacé par des moteurs asynchrones contrôlés par de l'électronique de puissance, les installations utilisant des moteurs à courant continu seront avec nous pour des décennies et les ingénieurs en électrotechnique doivent au minimum comprendre les principes et les modèles qui régissent son fonctionnement.

La modélisation des phénomènes électromagnétiques sont à l'origine qui exprime le comportement des machines électriques, il y a plusieurs méthode numérique utilisé pour la modélisation des machines électriques où l'utilisation de la méthode de calcul par éléments finis a fait ses preuves comme outil efficace afin de trouver des résultats approches à l'expérimental.

L'écriture des équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent les phénomènes électromagnétiques, s'obtient à partir des équations fondamentales de la physique et des propriétés des matériaux qui composent les systèmes à étudier. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) en des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points du milieu. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode des différences finis, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, ainsi que la méthode des intégrales de frontières.

L'objectif de notre travail est de faire la modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine à courant continu. Une modélisation visant le comportement général de la machine en régime dynamique et permanent, mais qui peut servir plus particulièrement le domaine de commande des machines. Dans ce contexte, nous étudions l'influence des différents paramètres sur la force électromotrice induite tels que la valeur du courant d'excitation, la vitesse de rotation et le matériau ferromagnétique utilisé.

Pour modéliser notre machine, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique étudié.

Ainsi notre travail sera organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à une généralité sur la machine à courant continu. Après une brève introduction sur les constitutions de la machine et leurs principes de fonctionnement. Nous présentons les différents types du moteur à courant continu ainsi que leurs utilisations. Dans deuxième chapitre, nous présentons les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques qui sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques de milieu.

Le troisième chapitre on s'intéresse dans la première partie à une présentation des méthodes numériques utilisé pour la résolution des équations aux dérivées partielles que nous avons mentionnées dans le chapitre précédent. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation de la machine.

Le quatrième chapitre présentera les résultats des simulations de la modélisation des phénomènes magnétodynamique dans un machine à courant continu, en tient compte l'effet ou l'influence des différents paramètres sur la force électromotrice induite.

Enfin, nous tirons une conclusion générale résumant notre travail et nous proposons quelques suggestions futures.

CHAPITRE I

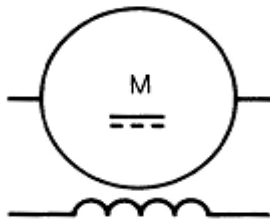
Généralités sur la machine à courant continu

I. 1. Introduction

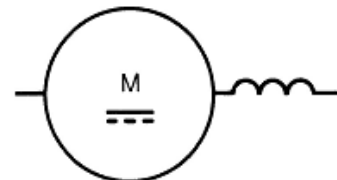
La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique. [1]

I. 2. Symboles

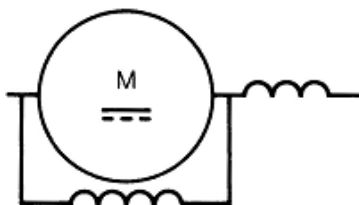
Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice (dynamo) ou en moteur et selon le type d'excitation employée.



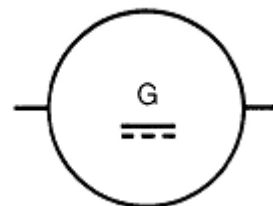
(a) Moteur à courant continu à excitation indépendante.



(b) Moteur à courant à Continu à excitation série.



(c) Moteur à courant Continu à excitation composée.



(d) Symbole d'une dynamo, machine à courant continu. Fonctionnant en génératrice.

Figure I.1 : Symboles de la machine à courant continu. [2]

I. 3. Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales : [2]

- l'inducteur.
- l'induit.
- le collecteur.
- les balais également appelés charbons.

I. 3. 1. L'inducteur

Son rôle est de créer le champ magnétique inducteur dans la machine. Il est constitué

Par [3] :

I. 3. 1. 1. Une culasse (ou bâti) en fonte ou en acier coulé

C'est la carcasse de la machine, elle supporte toutes les parties fixes et aux extrémités les deux paliers dans lesquels tourne l'induit. Elle ferme le circuit magnétique de la machine.

3. 1. 2. Pôles principaux

Ils sont le plus souvent, pour des raisons économiques, formés de tôles épaisses de 1,5 mm découpées puis assemblées.

Les noyaux polaires en acier coulé sont vissés à la culasse. Ils sont en nombre pair, et servent de support aux bobines inductrices. La présence d'encoches destinées à l'enroulement compensateur. Les trous sert à l'assemblage.

Parfois le noyau polaire est en acier doux plein et l'épanouissement polaire, ou pièce polaire est feuilletée pour réduire les pertes par courants de Foucault.

Les épanouissements polaires sont destinés à augmenter la section de passage du flux de l'inducteur à l'induit.

I. 3. 1. 3. Les bobines inductrices

Sont placées autour des pôles. Leurs ampères-tours produisent le flux. Ces bobines sont en série et bobinées de façon que l'un des épanouissements polaires soit un pôle Nord et l'autre Sud. La disposition des bobines est telle que, lorsqu'elles sont alimentées par un courant continu, l'inducteur forme un électroaimant comportant un nombre pair de pôles, successivement Nord, Sud.[3]

I. 3. 1. 4. Les pôles auxiliaires

Ou pôles de commutation. Ce sont des pièces polaires étroites en série avec l'induit destinés à réduire les étincelles aux balais. Le champ produit une fem de valeur égale et de sens contraire à la FEM de commutation (self induction) due à l'inversion du courant. Dans une machine leur nombre est égal à celui des noyaux polaires. [3]



Figure I.2 : L'inducteur d'une machine à courante continu. [4]

I.3.2. L'induit

I.3.2.1. Rôle

Il est le siège d'une f.é.m. induite et est soumis à l'action d'un couple électromagnétique. Il tourne dans un champ magnétique fixe, il sera donc le siège de pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Ces derniers interdiraient pratiquement la rotation d'un cylindre plein. L'induit est donc feuilleté. Les tôles de 0,2 mm d'épaisseur qui le constituent sont découpées à la presse, isolées les unes des autres par une mince pellicule de vernis et assemblées. Pour réduire les pertes par hystérésis ces tôles sont en acier au silicium. L'ensemble des pertes dans le fer y est de l'ordre de 2,5 watts par kilogramme pour une induction de 1,4 T et une fréquence de 50 Hz.[3]

I.3.2.2. Encoches

Sur la périphérie de l'induit on a découpé des encoches dans lesquelles viendront se loger les conducteurs de l'induit. Le morceau de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent.

I.3.2.3. Entrefers

Le diamètre extérieur de l'induit est à peine inférieur au diamètre intérieur de l'inducteur : quelques millimètres seulement qui constituent les entrefers.

I.3.2.4. Distribution du flux

Le flux sort du pôle N, s'épanouit un peu dans l'entrefer, traverse l'induit et entre dans le pôle S. Il retourne au pôle N par les deux demi-culasses. Le flux dans la culasse est donc égal

à la moitié du flux sous un pôle. La perpendiculaire à l'axe des pôles est appelée ligne neutre (In), Dans l'entrefer, les épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, l'entrefer est plus large sous les cornes polaires les lignes de force y sont moins serrées et l'induction décroît quand on va de l'axe des pôles vers les extrémités. Elle est nulle sur la ligne neutre. Papillotement des lignes de force – Lors du défilé alterné des dents et des encoches les lignes de force, qui ont tendance à se concentrer dans les dents, se déplacent autour d'une position moyenne, c'est le papillotement. L'épanouissement polaire est donc le siège de courants de Foucault, c'est pourquoi il est quelquefois feuilleté.[4]



Figure I.3 : L'induit d'une machine à courant continu. [4]

I. 3. 2. 5. Bobinage

Chaque fil pris isolément s'appelle un conducteur, deux conducteurs forment une spire, les spires sont groupées par section et les sections par bobine avant la mise en place dans les encoches. Les fils sont isolés au vernis. Disposition d'une section sur le rotor : Les deux moitiés se trouvent dans des encoches presque diamétralement opposées. Les fils de sortie de la section sont soudés à deux lames de collecteur voisines.[3]

I. 3. 2. 5. a. Frettage – Lors de la rotation les fils sortiraient des encoches à cause de l'inertie centrifuge. Il est nécessaire de placer autour des têtes de bobines du rotor des frettes en fil ou en ruban d'acier pour maintenir les conducteurs.

I. 3. 2. 5. b. Collecteur : Placé à l'extrémité de l'induit et calé sur le même arbre, il est formé de lames de cuivre isolées entre elles par du mica. A l'arrière de la lame se trouve une ailette, usinée ou rapportée, dans laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie d'une autre. Il y a donc autant de lames que de sections.

I. 3. 2. 5. c. Balais : Fixés sur l'inducteur par l'intermédiaire de porte-balais, ils sont en carbone et frottent sur le collecteur grâce à des ressorts. Puisque le collecteur tourne, le contact avec les balais est glissant et la densité de courant admise est relativement faible : 10 A/cm^2 environ.[5]

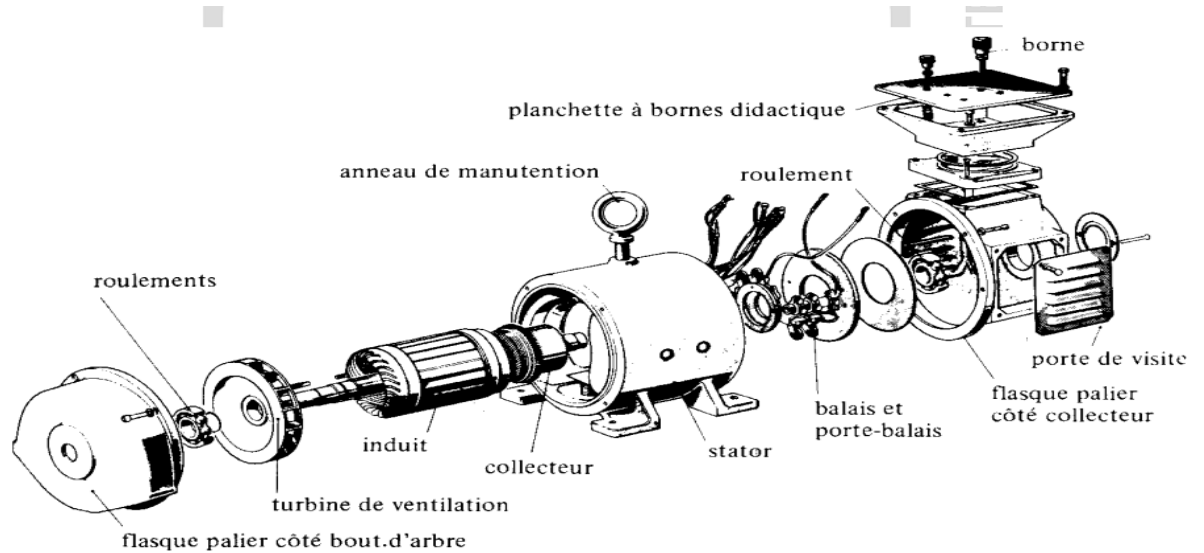


Figure I.4 : Eléments d'une machine à courant continu. [4]

I. 4. Principe de fonctionnement

I. 4. 1. Cas Générateur

Dans un repère, un conducteur de longueur L est en mouvement à vitesse constante \vec{V} dans un champ \vec{B} uniforme et orthogonal au plan de mouvement du conducteur. [1]

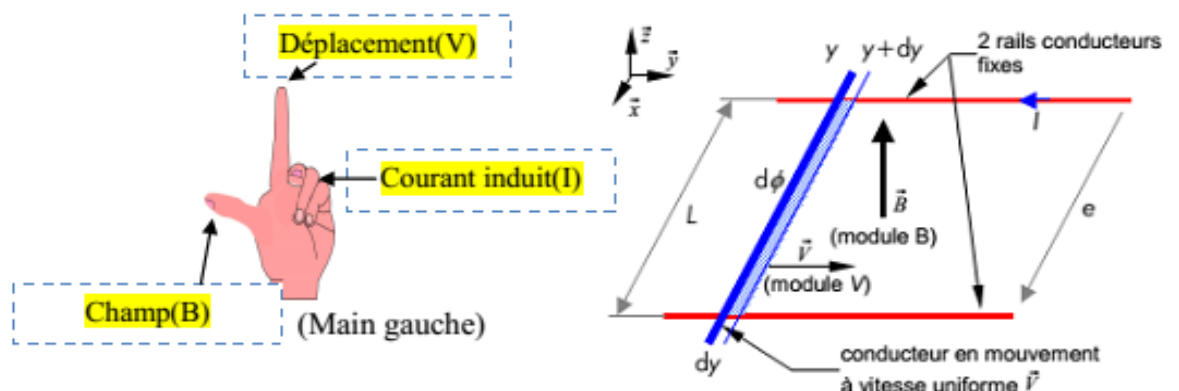


Figure I.5 : Barre en translation dans le champ B. [1]

Entre t et dt , la barre parcourt la distance élémentaire

$$dy = v. dt \quad (\text{I.1})$$

Le flux coupé par le conducteur est alors :

$$d\phi = B. L. dy \quad (\text{I.2})$$

Avec :

En appliquant (en module) la loi de Faraday, on obtient l'expression de la f.é.m. induite :

$$e = \frac{d\phi}{dt} = b.l.v \quad (\text{I.3})$$

Si l'induction ou la vitesse changent de sens, le sens du flux change et la f.e.m. change de signe

I. 4. 2. Cas Moteur

Un conducteur (une barre) de longueur L qui est placé dans un champ magnétique B et est parcouru par un courant I ; est alors soumis à une force électromagnétique de Laplace dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite. La figure suivante montre le conducteur placé dans un champ magnétique et la force F à laquelle il est soumis. [6]

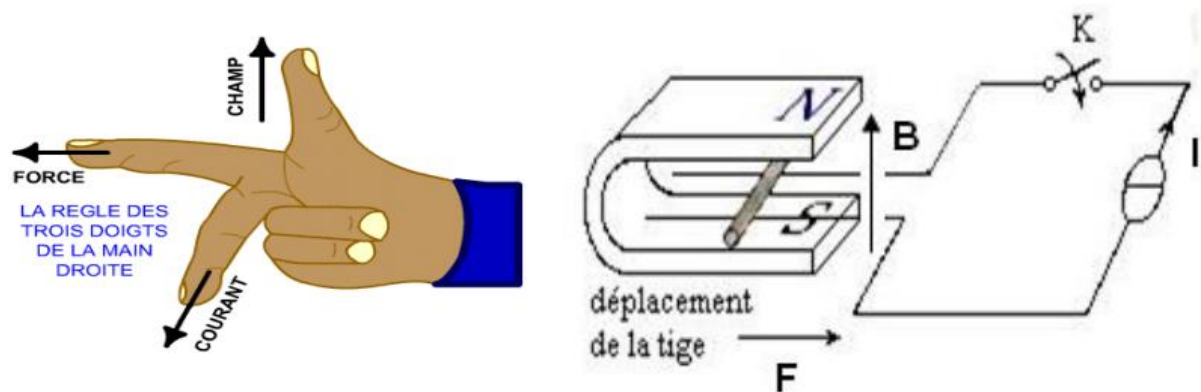


Figure I.6 : Barre place dans un champ B. [1]

I. 5. Les matériaux utilisés dans la machine à courant continu

I. 5. 1. Les matériaux ferromagnétiques doux

Parmi les matériaux employés dans les machines électriques, on peut citer la fonte, l'acier coulé, l'acier au silicium (1%) pour faire des tôles isolées de haute perméabilité. On peut aussi Utiliser de nouveaux matériaux de type composite (fer-résine) pour remplacer les tôles. Ces matériaux sont réalisés à base de poudre de fer et de résine. Ils ont une faible perméabilité relative ($\mu_r=300$), une faible valeur d'induction de saturation (1.4 T) par rapport aux autres

matériaux laminés. Ils sont faciles à usiner et on peut réaliser des formes très complexes avec les moules. Ce type de matériau permet de réaliser le rotor en une seule opération par moulage ou pressage ce qui conduit à un gain de temps dans la production de masse, par rapport aux autres types de matériaux. [6]

I. 5. 2. Les aimants permanents (matériau ferromagnétique dur)

Le choix d'un type d'aimant permanent pour une machine à courant continu dépend principalement de la valeur du champ coercitif, du champ rémanent et de son prix. Le but d'utilisation de ces aimants est d'avoir un niveau d'induction élevé dans l'entrefer et donc de réduire les dimensions et l'encombrement du moteur.

De nos jours, il existe une grande variété de matériaux pour aimants permanents dont les propriétés et les applications sont très diverses. On distingue:

Les ferrites durs, matériaux céramiques bon marché, très stable, mais peu puissant et fragile. Ce sont les aimants les plus compétitifs au niveau de leur prix et les plus utilisés. Les alliages à base d'éléments de terre rare, très stable et très puissants. Mais ces aimants sont chers et difficiles à usiner. Ils sont aussi sensibles à la corrosion. Les aimants permanents sont des matériaux à large cycle d'hystérésis. Ils sont caractérisés par une courbe de démagnétisation qui correspond au deuxième cadran du cycle communément appelé courbe de désaimantation.[5]

I. 6. Les différents types de moteur à courant continu

I. 6.1. Moteur série

La construction d'un moteur série est identique à celle d'un moteur shunt, sauf en ce qui concerne l'inducteur. L'inducteur est connecté en série avec l'induit.

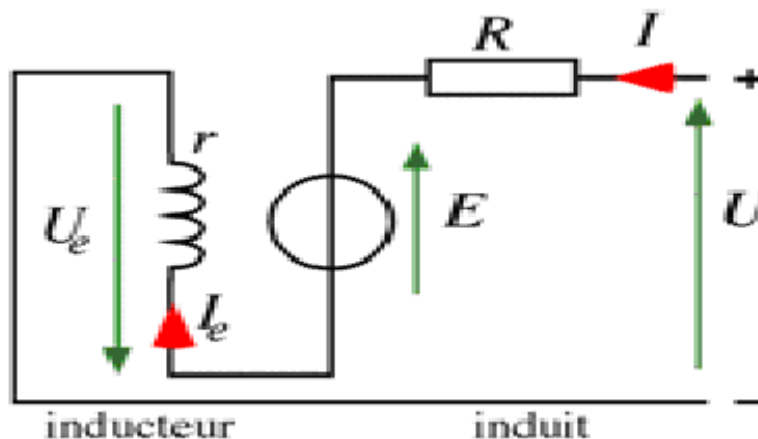


Figure I.7 : Moteur série. [4]

1.6.1. a. Caractéristiques de moteur série

Les caractéristiques d'un moteur série sont complètement différentes. Dans un moteur shunt le flux Φ par pôle est constant pour toute charge normale. Et le flux dépend du courant qui circule dans l'induit.

Lorsqu'un moteur série fonctionne à pleine charge. Le flux par pôle est le même.

$$\Phi = k \cdot I \text{ avec } k = \text{cte.} \quad [4]$$

Le flux utile sous un pôle est proportionnel au courant d'excitation I (circuit magnétique non saturé).

I. 6. 1. b. Démarrage de moteur série

Il faut mettre un rhéostat en série avec le moteur à l'arrêt avant de lui appliquer la tension U .

$$R + Rh_t = \frac{U - e_B}{I_M} \quad (I.4)$$

Le rhéostat aura une résistance totale Rh_t tel que.

On doit éliminer progressivement le rhéostat au fur et à mesure que la vitesse N du moteur augmente.

I. 6. 1. c. Couple de démarrage

Le couple de démarrage étant donné par

$$C_{dém} = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} n \Phi_M I_M \quad (I.5)$$

Lors du démarrage. Le courant d'induit est supérieur au courant nominal, le flux est donc supérieur au flux obtenu à pleine charge. Par conséquent, le couple de démarrage d'un moteur série excède celui d'un moteur shunt. [4]

I. 6. 2. Moteur shunt

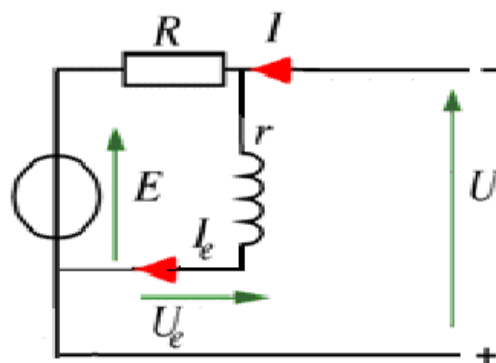


Figure I .8: Moteur shunt. [1]

I. 6. 2. a. Démarrage de moteur shunt

On a vu que si la pleine tension est appliquée à un moteur au repos, l'appel de courant énorme. On risque alors de faire sauter les fusibles, de brûler l'induit et d'endommager le

collecteur. Pour tout moteur shunt à courant continu. Il faut donc prendre des précautions appropriées pour limiter le courant de démarrage à une valeur raisonnable, de l'ordre de 1.5 à 2 fois le courant nominale. Alors pour la phase de démarrage des moteurs on doit prendre les précautions suivantes :[4]

Soit introduire une résistance variable ou rhéostat de démarrage en série avec l'induit, afin de réduire le courant dans ce dernier au moment du démarrage.

Soit à l'aide d'un variateur de tension (i.e) qu'on doit augmenter progressivement la tension jusqu'à ce que la machine développe une f.c.é.m. suffisante « E ». [4]

I. 6. 3. Moteur à aimant permanent

Nous avons vu que dans un moteur shunt le champ magnétique est produit par un courant d'excitation circulant dans les bobines excitatrices. L'énergie dépensée, la chaleur dégagée et l'espace relativement important occupé par ces bobines constituent parfois des inconvénients du moteur à courant continu conventionnel. On peut éviter ces inconvénients en remplaçant les bobines par des aimants permanents. Il en résulte un moteur plus petit et qui ne risque pas de s'emballer à cause d'une défaillance du champ. [4]

I. 7. Diagrammes des puissances

1. 7. 1. Cas générateur

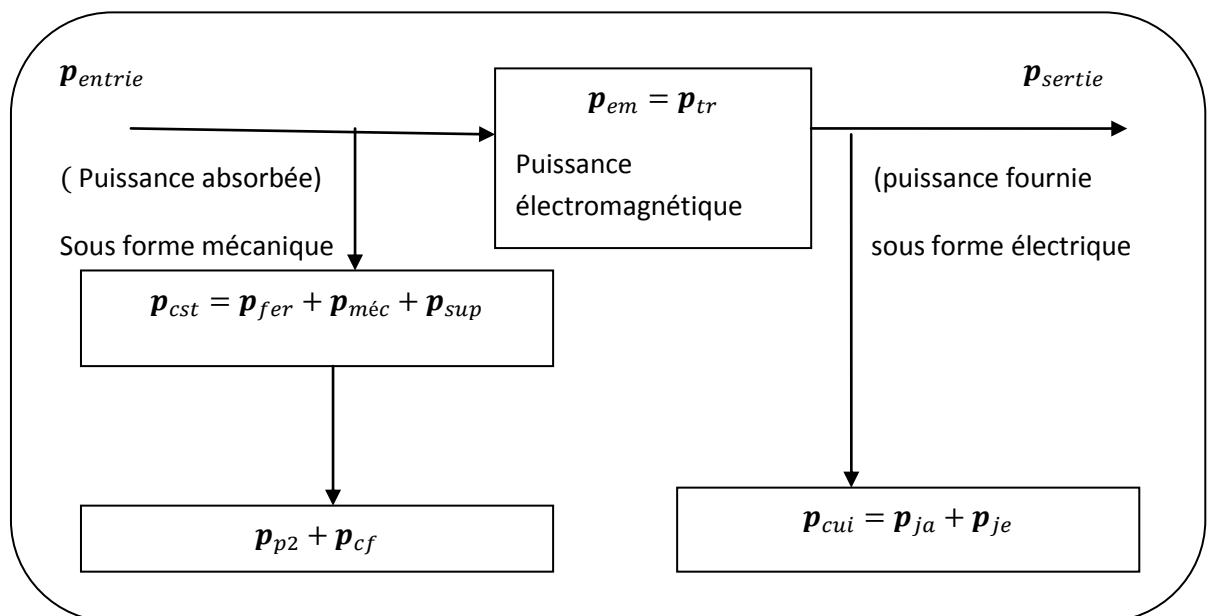


Figure I.9 : Diagramme des puissances pour les générateurs. [4]

$$p_{sortie} = PU = UI(\text{puissance aux bornes de la machine}) \quad (I.6)$$

$$p_{em} = p_{tr} = p_u = p_{cu} \quad (I.7)$$

$$P_{entree} = P_{abs} = P_{em} = P_{ctes} \quad (I.8)$$

Avec :

I. 7. 2. pour le fonctionnement dans le Cas moteur

$$P_{entree} = P_{sortie} + UI \quad (I.9)$$

$$P_{sortie} = P_{mec} = P_u - P_{em} = c_u \cdot w \quad (I.10)$$

I. 7.2 .a. Rendement

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{entree}} \quad (I.11)$$

I. 8. couple électromagnétique

La puissance qui est transformée de la forme électrique sous forme mécanique dans le cas moteur, ou la forme mécanique en forme électrique dans le cas générateur est donnée par la relation : [4]

$$P_{tr} = P_{em} + E_{ch} \cdot I_a \quad (I.12)$$

On déduit le couple électromagnétique correspondant à l'interaction entre la partie fixe et la partie tournante de la machine. Sachant :

$$P_{em} = E_{ch} \cdot I_a + C_{em} \cdot w \quad (I.13)$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{w} \rightarrow \frac{E_{ch} \cdot I_a}{w} = \frac{k \cdot n \cdot \Phi_{ch} \cdot I_a}{2\pi n} \quad (I.14)$$

I. 8. 1. fonctionnement moteur

Le couple est exprimé par l'équation suivante :

$$C_u = C_{em} - \frac{P_{em} + P_{fer}}{w} = C_{em} - C_p \quad (I.15)$$

I. 8. 2. fonctionnement Dans le cas générateur

$$C_u = \frac{C_{em} + P_{em} + P_{fer}}{w} = C_{em} = C_p \quad (I.16)$$

I. 9. Utilisation de la machine à courant continu

Pendant longtemps, le moteur à courant continu a été la machine à vitesse variable par excellence. De plus en plus remplacé dans ce rôle par des moteurs à courant alternatif dans les applications industrielles, il est encore bien présent dans les réalisations existantes et il le sera

encore pendant un certain nombre d'années, compte tenu de la durée de vie parfois assez longue des installations. Dans les applications industrielles, c'est le moteur à excitation séparé qui est de loin le plus courant : on le rencontre dans des domaines tels que le levage, le pompage, etc. l'application principale du moteur à excitation série est la traction ferroviaire. En France, la grande majorité des locomotives a utilisé cette solution pendant longtemps (jusqu'au TGV sud-est). Toutefois, les autres pays avaient souvent choisi des voies différentes. Le moteur à courant continu a mieux résisté dans diverses applications de faible puissance. Dans les jouets, les petits moteurs à aimant alimentés par pile ont sans doute encore de l'avenir devant eux. C'est alors le coût qui est le critère de choix. Dans le domaine de la robotique, les petites actionneurs à courant continu à aimant sont encore présents malgré le concurrence des moteurs à courant continu sans balais. Enfin, dans les accessoires automobiles, le moteur à courant continu est la solution traditionnelle, mais là aussi, d'autres solutions sont de plus en plus utilisées. [6]

I. 10. Avantages et inconvénients

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple Aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse. Voire leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc.

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Ainsi que le collecteur lui-même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation. De plus il faut signaler que :

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement.
- Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de cas moteur lorsque le rotor est bobiné, c'est le phénomène de « dé frettage », la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires « le frettage ». [4]

I. 11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré une étude générale sur les machines à courant continu (Constitution, Principe de fonctionnement, les matériaux utilisés dans la machine.....), en plus on a montré Les différents types de moteur et le procédé de démarrage.

Dans le chapitre suivant nous présentés dans les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques dans la machine à courant continu.

CHAPITRE II

Les formulations

Mathématiques des

Phénomènes

Électromagnétiques

II. 1. Introduction

Les phénomènes électromagnétiques étudiés au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu. La connaissance du champ électromagnétique permet d'avoir accès au calcul des performances globales et au détail des conditions de fonctionnement de tout appareil électromagnétique que ce soit en régime permanent ou transitoire. [7]

II. 2. Les équations électromagnétiques

Les quatre équations de Maxwell sont à la base de tout phénomène électrique et magnétique. Elles sont aussi fondamentales en électromagnétisme que les lois de Newton en mécanique. Les équations de Maxwell, complétés par la loi de la force de Lorentz permettent de faire une description complète de toutes les interactions électromagnétiques.

Nous disposons alors du système d'équations suivant : [9]

- Equation de Maxwell – Faraday

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

- Equation de Maxwell – Ampère

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}_c + \partial \vec{D} / \partial t \quad (\text{II. 2})$$

- Equation de Conservation du flux magnétique

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

- Equation de Maxwell – Gauss

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 4})$$

Lois constitutives de milieux

$$B = \mu \cdot H \text{ ou } H = v \cdot B \quad (\text{II. 5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II. 6})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{II. 7})$$

À ces équations doit être associé la loi d'ohm généralisée

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_s \quad (II. 8)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{U} \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \quad (II. 9)$$

Avec :

\vec{J}_{ind} : Densité de courant induit par variation du champ électrique [A/m²],

$\sigma \vec{E}$: Densité de courant induit dû au champ électrique E[A/m²],

$\sigma(\vec{U} \wedge \vec{B})$: Densité de courant induit dû au mouvement [A/m²],[8]

II. 3. Les modèles électromagnétiques

Les équations qui décrivent le couplage électromagnétique entre les effets magnétiques et électriques peuvent être dans certains cas découplés en donnant naissance à des modèles plus simples qui sont. [9] :

- ✓ Modèle électrostatique ;
- ✓ Modèle magnétostatique ;
- ✓ Modèle électrocinétique ;
- ✓ Modèle magnétodynamique.

II. 3. 1. Le modèle électrostatique

Dans ce modèle la répartition des charges électriques fixes ne dépend pas de temps de ce fait le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps: [8]

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (II. 10)$$

Les expressions des équations de ce modèle est comme suit :

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \quad (II. 11)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (II. 12)$$

$$D = \varepsilon \vec{E} \quad (II. 13)$$

La relation (II. 11) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V, tel que :

$$\vec{E} = -\text{grad } V \quad (II. 14)$$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div}(\overline{\varepsilon \text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II. 15})$$

II. 3. 2. Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\partial \vec{B} / \partial t$ de l'équation (II. 1) est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. [8]

II. 3. 2. 1. Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques soient nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps, on obtient alors les relations suivantes :

$$\overline{\text{rot}} \vec{H} = 0 \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 17})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II. 18})$$

La relation (II. 16), implique qu'il existe une fonction Φ potentiel scalaire magnétique tel que:

$$\vec{H} = \overline{\text{grad}} \Phi \quad (\text{II. 19})$$

Les équations de ce modèle sont regroupées pour former l'équation globale suivante :

$$\text{div}(\mu \overline{\text{grad}} \Phi) = \text{Div } B_r \quad (\text{II. 20})$$

Ce modèle pose peu de problèmes particuliers et la technique actuelle le permet de traiter même dans les cas tridimensionnels complexes.

II. 3. 2. 2. Modèle magnétostatique vectorielle

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique soit produit par des sources indépendantes du temps le terme $\partial \vec{B} / \partial t = 0$ et les champs électrique E et magnétique B sont découplés, par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls. On obtient alors les équations suivantes :

$$\overline{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II. 21})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (II. 22)$$

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

La relation $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ permet de définir une fonction vectoriel \vec{A} appelé potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{A} \quad (II. 24)$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (II. 25)$$

II. 3. 3. Modèle électrocinétique

Il est utilisable lorsque l'on veut étudier la répartition du courant électrique dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues, ce modèle est défini par les équations suivantes [7] :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = 0 \quad (II. 26)$$

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0 \quad (II. 27)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (II. 28)$$

L'équation (II. 26) implique que le champ électrique dérive d'un potentiel scalaire V :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (II. 29)$$

Et en tenant compte de l'équation (II. 28) on trouve :

$$\vec{J} = -\sigma \overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (II. 30)$$

Ce potentiel est appelé la tension électrique, on aura donc à résoudre :

$$\operatorname{Div}(\sigma \overrightarrow{\operatorname{grad}} V) = 0 \quad (II. 31)$$

II. 3.4. Modèle magnétodynamique

Dans ce cas, les sources du courant sont dépendantes du temps, ainsi les champs électrique et magnétique seront alors couplés par la présence des courants induits. Le potentiel vecteur \vec{A} joue un rôle primordial, dont la connaissance de \vec{A} implique la connaissance de tous les grandeurs physiques où [8] :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II. 32)$$

En termes d'équation, nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j}t \quad (II. 33)$$

$$\text{Or } \vec{j}t = \vec{j}s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (II. 34)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j}s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$$

$$\overrightarrow{rot}(v \overrightarrow{rot} \vec{A}) = -v \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - v \overrightarrow{grad} V + \vec{j}s \quad (II. 35)$$

Pour que la solution soit unique, on doit fixer la divergence de \vec{A} .

On obtient :

$$\overrightarrow{rot}(v \overrightarrow{rot} \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \overrightarrow{grad} V - \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \vec{j}s \quad (II. 36)$$

$$Div \vec{A} = 0$$

$$(II. 37)$$

Dans le cas où les courants induits par mouvement sont nuls et aussi le $\overrightarrow{grad} V$ en axisymétrique est nul l'équation du système devient:

$$\overrightarrow{rot}(v \overrightarrow{rot} \vec{A}) + -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}s \quad (II. 38)$$

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs,...etc. [7]

II. 4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, les formulations mathématiques ainsi que les différents modèles régissant les phénomènes électromagnétiques.

Dans le chapitre suivant nous présentons les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP).

CHAPITRE III

Méthodes numériques

III. 1. Introduction

Les principales méthodes de résolution des EDP dans les milieux linéaires sont : la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis(MEF), la méthode des volumes finis(MVF), la méthode des intégrales de frontières (MIF), la méthode des circuits Couplés (MCC). L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équation algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques, déplacement, induction moy,f.e.m.....etc.[8]

III. 2. Méthode de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisent les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes sont connues à l'avance. Ces méthodes sont : méthodes analytiques et numériques.

III. 2. 1. Méthodes analytiques

La résolution analytique de l'équation de Laplace n'est pas simple sauf si la géométrie du système est symétrique. Parmi les méthodes analytiques utilisées pour le calcul du champ électrique on trouve, La méthode de séparation des variables. [12]

III. 2. 2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques de discrétisation utilisable pour la résolution des équations mathématiques établies, consistent à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs (potentiel vecteur magnétique), mécanique des fluides (vitesse, pression,...). [10]

III. 2. 2. 1. Méthodes des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis (MVF) est très appliquée pour les problèmes de la mécanique des fluides. La discrétisation des équations aux dérivées partielles s'opère à partir d'une forme conservative pour chaque volume de contrôle par une technique qui ressemble à la méthode des différences finies. Donc le principe de conservation est imposé au niveau de chaque volume de contrôle contrairement à la méthode des éléments finis où les principes de conservation sont vérifiés uniquement de manière globale. Cette méthode est simple à développer et moins coûteuse que la méthode des éléments finis. Le domaine d'étude dans cette méthode est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage. L'équation est intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Cela conduit à une solution plus précise que la méthode des différences finies. [10]

III. 2. 2. 2. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogorski - Green. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure en 3D ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. [11]

III. 2. 2. 3. Méthodes des différences finies (MDF)

La MDF est basée sur la discrétisation du domaine d'étude et le développement limité en séries de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nœuds du maillage. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds. L'écriture de cette transformation pour tous les nœuds du maillage conduit à un système algébrique dont la solution permet d'obtenir la distribution de l'inconnue dans le domaine d'étude. Cette méthode s'adapte mal aux objets de géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage. D'autre part, la prise en compte des conditions de symétrie, de passage d'un milieu physique à un autre (fer, air, etc.,...) et des non linéarité (saturation) nécessite un traitement spécifique. [9]

III. 2. 2. 3. 1. Avantages de la méthode :

- Mise en œuvre relativement simple.
- Prise en considération des non linéarités.
- Préparation et introduction des données relativement simple. [12]

III. 2. 2. 3. 2. Inconvénients de la méthode :

- Considération des géométries complexes (c'est ce qui explique en partie qu'elle ait été supplantée par la méthode des éléments finis).
- Taille des systèmes algébriques importante.
- Temps de calcul relativement important.
- Précision des calculs coûteuse. [12]

III. 2. 2. 4. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour la résolution des équations différentielles dans le domaine des sciences des ingénieurs. Le principe de la méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en régions élémentaires (éléments finis) et à représenter l'inconnue par une approximation polynomiale dans chacune de ces régions, ensuite, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée. La MEF est une méthode très puissante pour la résolution des équations différentielles surtout dans les géométries complexes. Sa mise en œuvre par contre, est assez compliquée et demande une place mémoire assez importante. [11]

III. 2. 2. 4. 1. Principe de la Méthode éléments finis

La méthode de résolution par éléments finis permet de calculer des grandeurs physiques pour tous les points d'une structure donnée. Pour obtenir un résultat sur un domaine continu, il est nécessaire de discrétiser le volume ou la surface d'étude par un maillage, en la subdivisant en sous éléments : les éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds. Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel. [12]

III. 2. 2. 4. 2. Avantages et inconvénients de la méthode

La méthode des éléments finis est la plus utilisée car : [12]

- Elle peut traiter des problèmes géométriques complexes.
- Elle couvre de nombreux domaines de la physique.
- Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation) la rende facile de mise en œuvre
- De nombreux logiciels généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché.
- Le temps de calcul est relativement avantageux. L'avantage majeur de la méthode des éléments finis, par rapport aux autres méthodes provient du fait que dans cette méthode, chaque élément peut avoir des caractéristiques électriques et géométriques particulières et indépendantes des autres éléments. Ainsi il est possible de résoudre de manière relativement efficace des cas de géométrie complexe présentant des propriétés différentes.

III. 3. Le logiciel COMSOL

III. 3. 1. Aperçu sur le logiciel Comsol

Dans ce travail, modélisons une machine à courant continu par l'utilisation du logiciel COMSOL-Multiphysics qui est bas sur la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre le EDP est Carrillo du problème travaillé. L'exploitation du logiciel commence par le dessin de la géométrie de la machine. Nous devons ensuite introduire les propriétés physiques de chaque milieu ou domaine qui sont au nombre de quatre : air, fer, cuivre. Après cette opération on introduit les conditions aux limites relatives à la structure et le maillage. Comme le nombre d'éléments du maillage pour ce genre de structure est très grand à cause de la largeur de l'entrefer faible, le temps de calcul est relativement élevé. En effet, pour simuler un fonctionnement donné, avec prise en compte du mouvement rotorique, il faut attendre parfois plus de 24H. Lorsque on choisit le temps de calcul nécessaire on exécute le calcul en question pour sortir, une fois le calcul achevé, tous les paramètres et données possibles et offerts par la plate-forme du logiciel (couple, courant, FEM...). [13]

III. 3. 2. Comsol Multi-physiques

COMSOL Multi-physiques est un environnement de simulation et de modélisation de presque toutes les physiques. Son point fort: le couplage entre différents phénomènes. Des modules optionnels offre des interfaces spécialisées en acoustique, génie chimique, géophysique, électromagnétisme, transfert de chaleur, MEMS, Plasma, Batteries&Piles à combustible, CFD et mécanique des structures ect.

COMSOL Multi-physiques Propose des outils de maillage automatique et semi-automatique, dont le maillage tétraédrique libre et le maillage extrudé. L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage tétraédrique pour les solides, et une combinaison maillage tétraédrique-maillage extrudé pour les fluides. L'utilisateur peut également définir une séquence de maillage pour contrôler la séquence de création du maillage. [13]

III. 3. 3. Avantages de conception avec COMSOL-Multiphysics :

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multiphysiques. Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles. Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [14]

III. 3. 4. Méthodologie de conception avec COMSOL-Multiphysics :

Dans notre projet on va passer étape par étape commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir. Après avoir dessiné notre modèle on doit définir les propriétés physique et les caractéristique du chaque matériau utilisé dans la construction des machine à courant continu Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont précisé. [14]

La modélisation avec COMSOL Multiphysics se résume en 5 étapes :

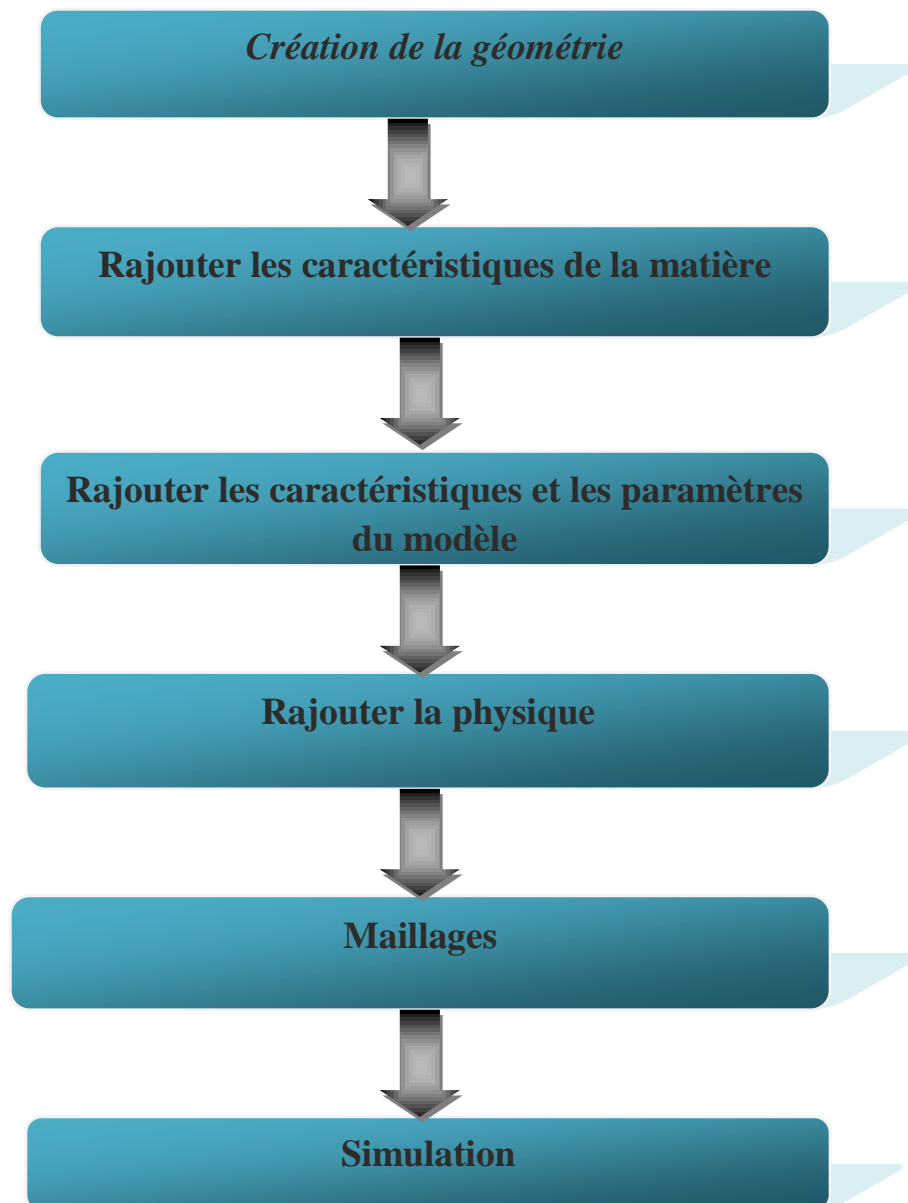


Figure III .1 : Diagramme des étapes de conception avec COMSOL. [14]

III. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles. Ensuite, nous donnons une introduction sur le logiciel COMSOL-Multiphysics. Par ailleurs, le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la machine à courant continu et les résultats de simulation.

CHAPITRE IV

Applications

IV.1 Introduction

Le chapitre suivant a pour objectif de modéliser le comportement magnétique et mécanique d'une génératrice à courant continu. On s'intéresse à étudier la force électromotrice induite (f.e.m). Dans ce contexte, nous avons proposé d'étudier trois modèles de génératrice où nous modifions le matériau qui constitue le circuit magnétique statorique et rotorique. Pour chaque modèle, nous étudions l'influence de deux paramètres sur la force électromotrice, il s'agit de courant d'excitation et la vitesse de rotation. Les résultats de simulations obtenus à caractère électrique et magnétique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir de logiciel COMSOL-Multiphysics. L'exploitation du logiciel commence par le dessin de la géométrie de la machine. Nous devons ensuite introduire les propriétés physiques de chaque milieu ou domaine qui sont au nombre de quatre : air et fer. Après cette opération on introduit les conditions aux limites relatives à la structure et le maillage, une fois le calcul achevé, tous les paramètres et données possibles et offerts par la plate-forme du logiciel (couple, courant, f.e.m...).

IV.2 Machine à courant continu

IV.2.1 Description du problème

Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution de l'équation du modèle magnétodynamique dans une machine à courant continu. Les dimensions de cette machine sont données dans le tableau VI. 1 et la géométrie est illustrée dans la figure IV.1.

Paramètres de la machine	Dimensions
Diamètre de l'inducteur	0.4(m)
Diamètre de l'induit	0.195(m)
Nombre d'encoches d'induit	10
Nombre de pôles	4 pôles

Tableau IV.1 : Dimensions de la machine.

IV.2.2 La géométrie de la machine

Une fois que les paramètres sont définis, nous dessinons la géométrie de la machine, on commence en premier lieu par le dessin du stator puis on entame le dessin du rotor. Il y a plusieurs façons qui permettent d'arriver au dessin de la géométrie. Le concepteur utilise son

savoir-faire et ces techniques de dessin, avec la possibilité qu'offre la plate-forme de dessin du COMSOL-Multiphysics, pour ressortir la géométrie recherchée.

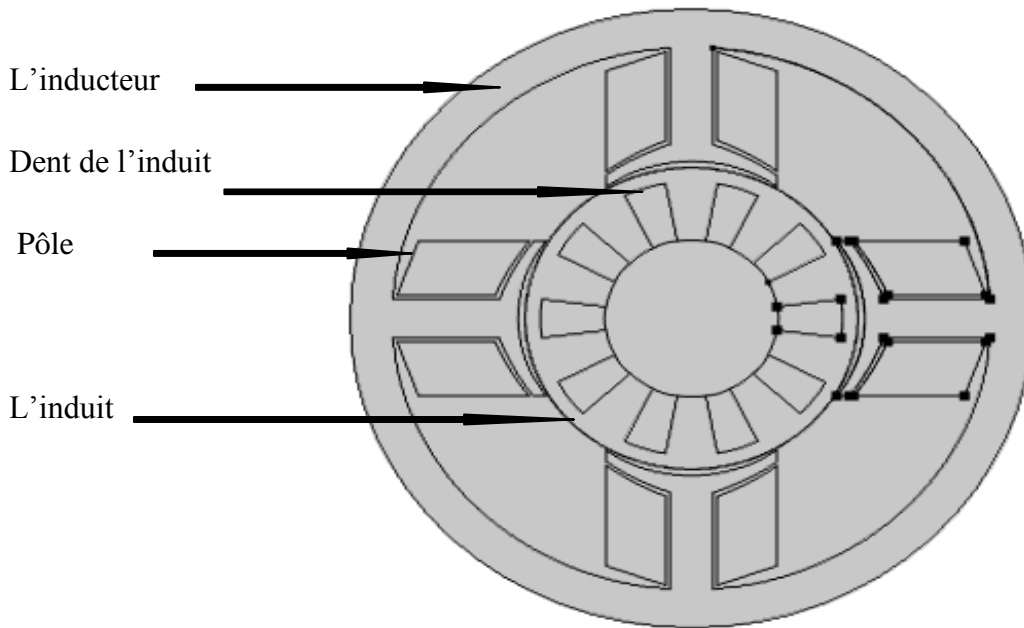


Figure IV.1 : La géométrie de la machine.

IV.2 .3 L'interface de COMSOL- Multiphysics

Dans la première étape, nous dessinons la géométrie de la machine étudiée par l'utilisation de l'interface graphique du logiciel qui offre plusieurs formes de dessin (point, droite, cercle, rectangle...). La figure IV. 2 illustre l'interface graphique du COMSOL-Multiphysics.

Fenêtre d'affichage graphique

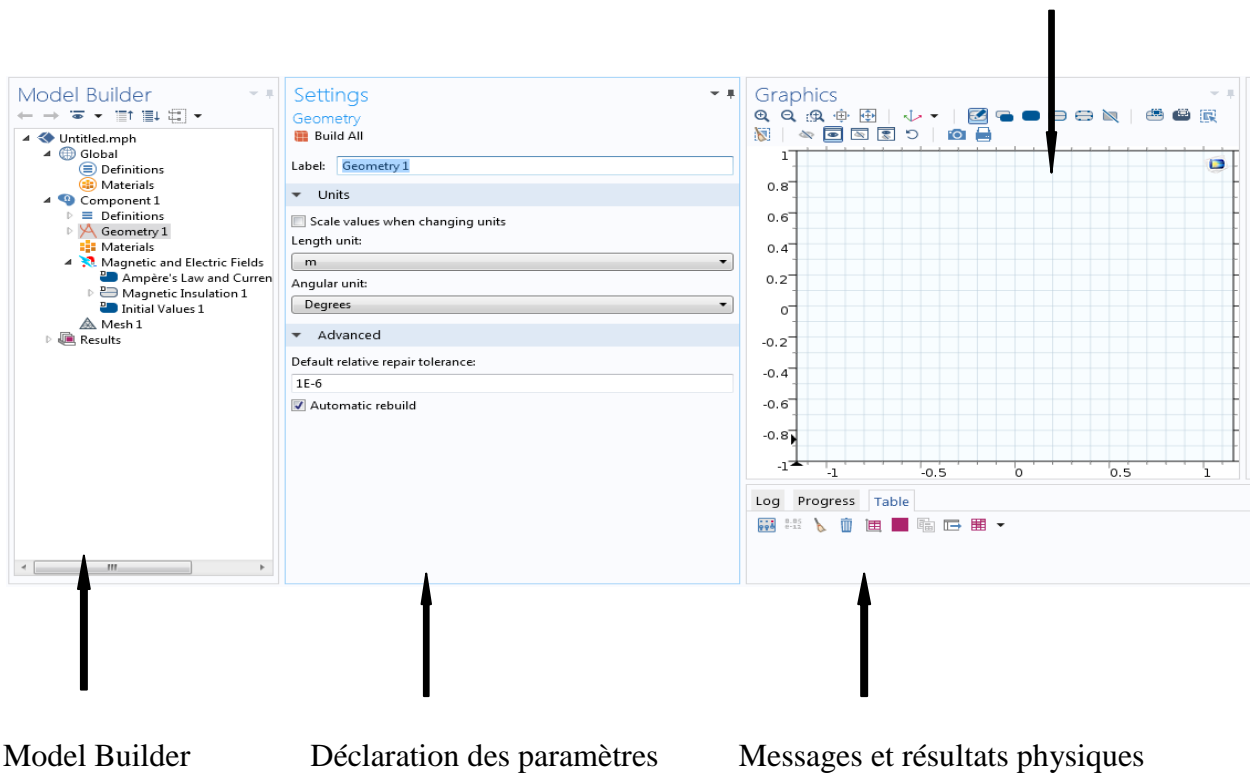


Figure IV.2 : L'interface de COMSOL- Multiphysics

IV. 3. Les étapes de modélisation par COMSOL- Multiphysics

IV. 3. 1. Les paramètres

Premièrement, il faut définir les paramètres physiques qui définissent le domaine d'étude : longueur de la génératrice, la vitesse de rotation qui entraîne la génératrice, etc (figure IV. 3).

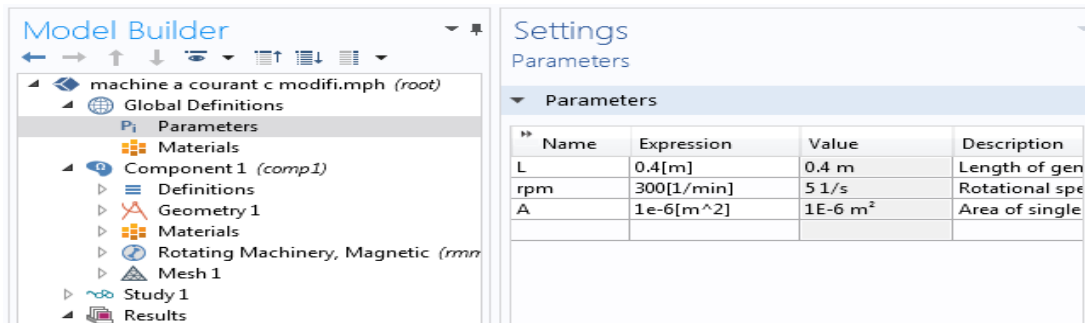


Figure IV.3 : Fenêtre de paramètres

IV. 3. 2. La géométrie

Dans la deuxième étape, nous dessinons la géométrie de la génératrice à courant continu étudiée par l'utilisation de plusieurs formes géométriques qui proposent l'interface du COMSOL-Multiphysics (figure IV. 4).

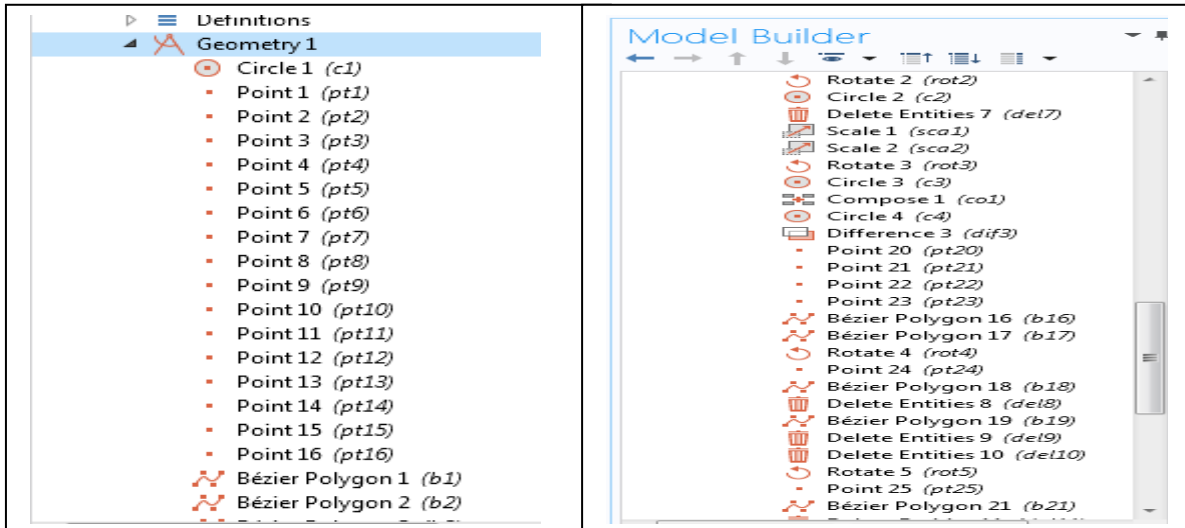


Figure IV.4 : Fenêtre de la géométrie

IV. 3. 3. Matériaux

Dans la troisième étape, nous définissons, les matériaux et les propriétés physiques de chaque région de la génératrice étudiée. Il s'agit du circuit magnétique de stator et rotor, bobines de l'inducteur et l'induit et l'entrefer (figure IV. 5).

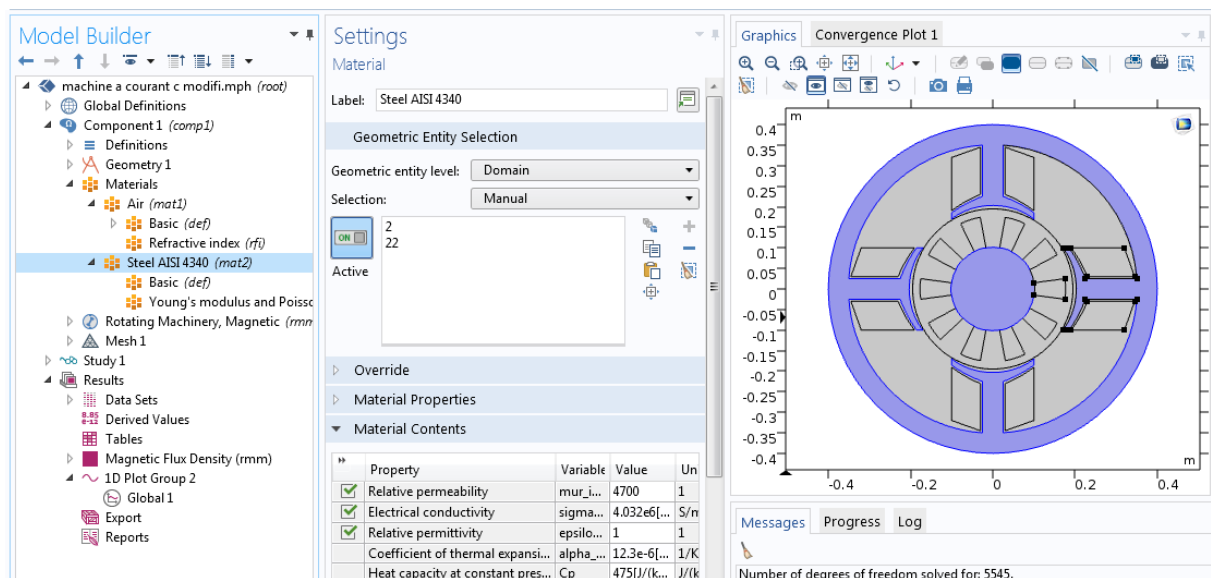


Figure IV.5 : Fenêtre de matériaux

IV. 3. 4. Maillage de la génératrice

Le logiciel COMSOL Multiphysics propose des outils de maillage automatique (figure IV. 6). On peut également définir une séquence de maillage, c'est-à-dire on peut raffiner le maillage dans une région bien défini pour la précision de calcul. La figure IV. 7 représente le maillage réalisé de la génératrice étudié.

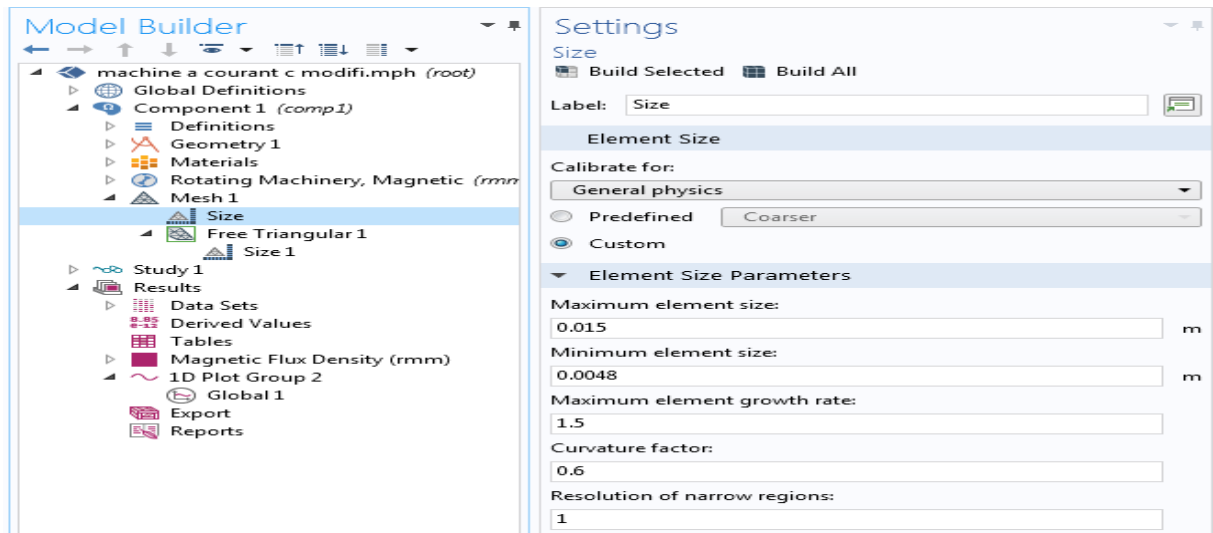


Figure IV.6: Fenêtre de maillage

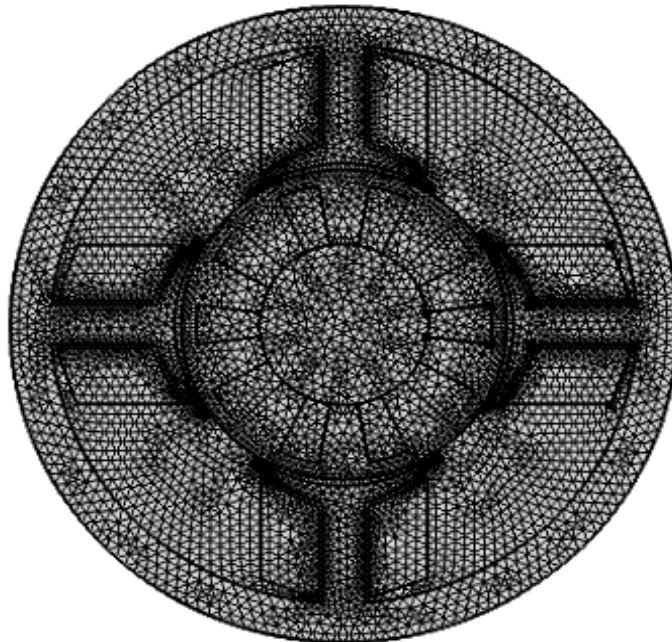


Figure IV.7 : Maillage de la génératrice étudié.

IV .4 Résultats de simulation

Le logiciel COMSOL-Multiphysics est dédié principalement à la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les machines électriques. Ce logiciel est basé sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution de système d'équations aux dérivées partielles. Le post processeur du COMSOL Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs électriques et magnétiques.

Dans notre étude, nous proposons d'étudier trois modèles de la génératrice à courant continu avec différents matériaux constituant le circuit magnétique. Afin de montrer l'influence de courant d'excitation et la vitesse de rotation sur la répartition du champ magnétique dans la machine autrement dit sur la force électromotrice induite.

IV .4 .1 Machine a courant continu avec circuit magnétique en Steel AISI 4340

IV .4 .1 .1 Influence de courant d'excitation :

La figure IV.8 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

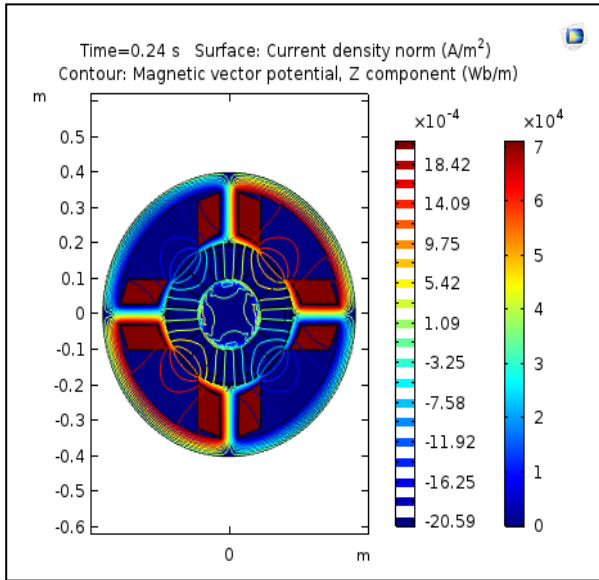
La figure IV.9 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.10 (a-d) représente l'induction magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

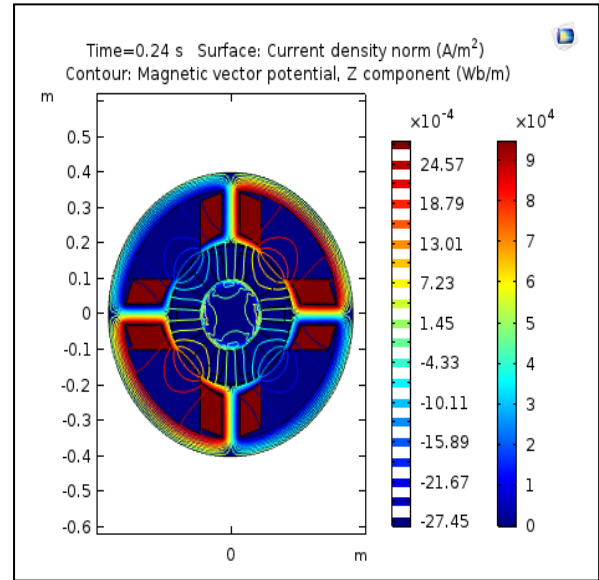
La figure IV.11 (a-d) représente l'induction magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.12 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

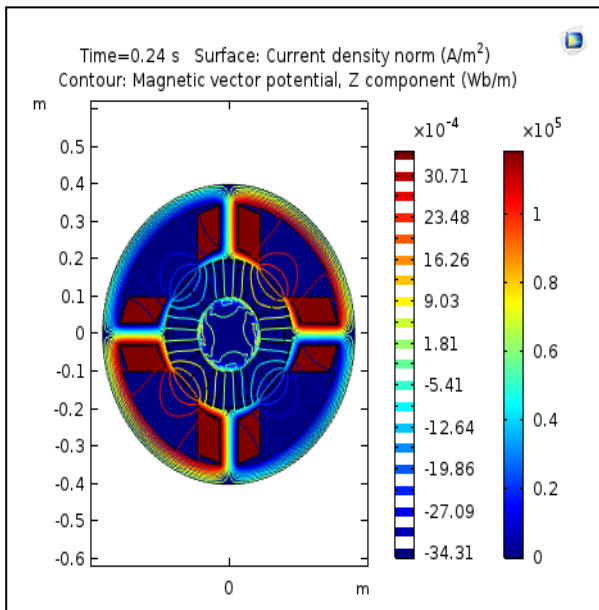
La figure IV.13 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



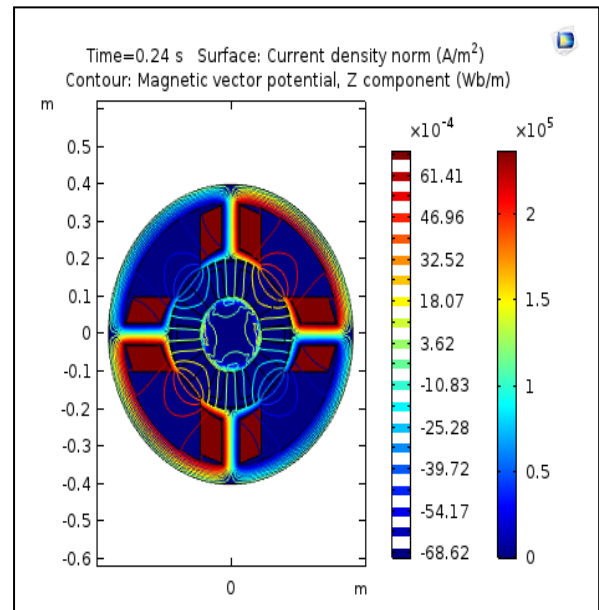
(a)



(b)

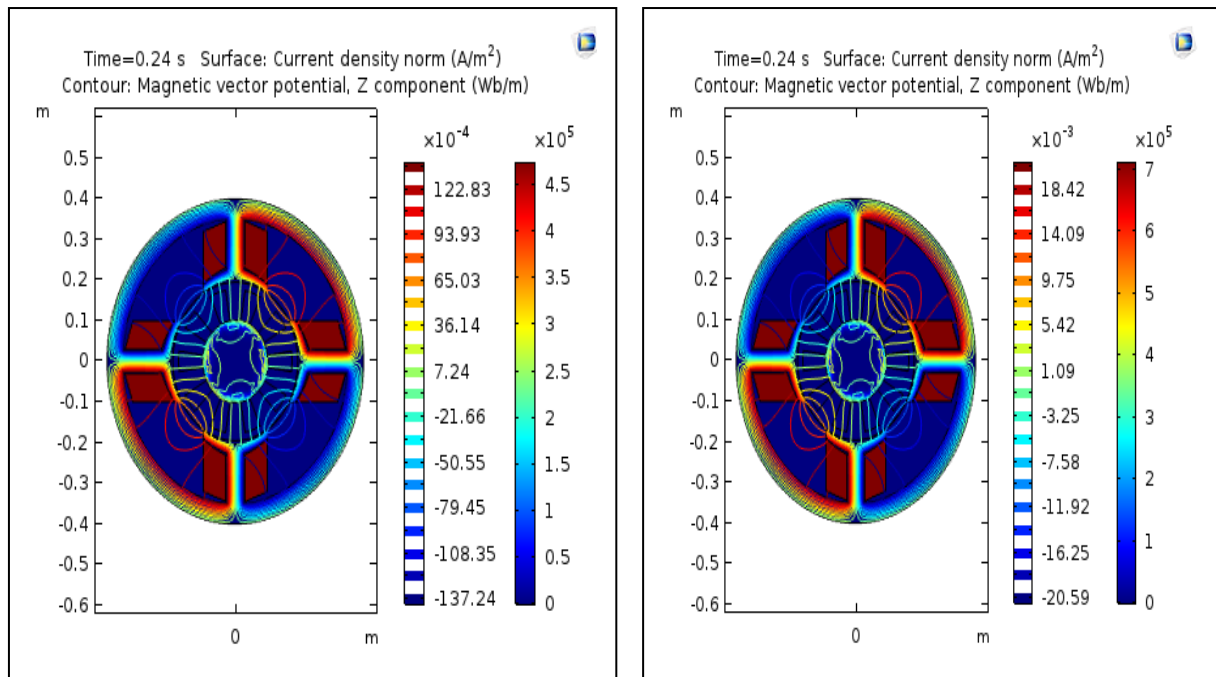


(c)



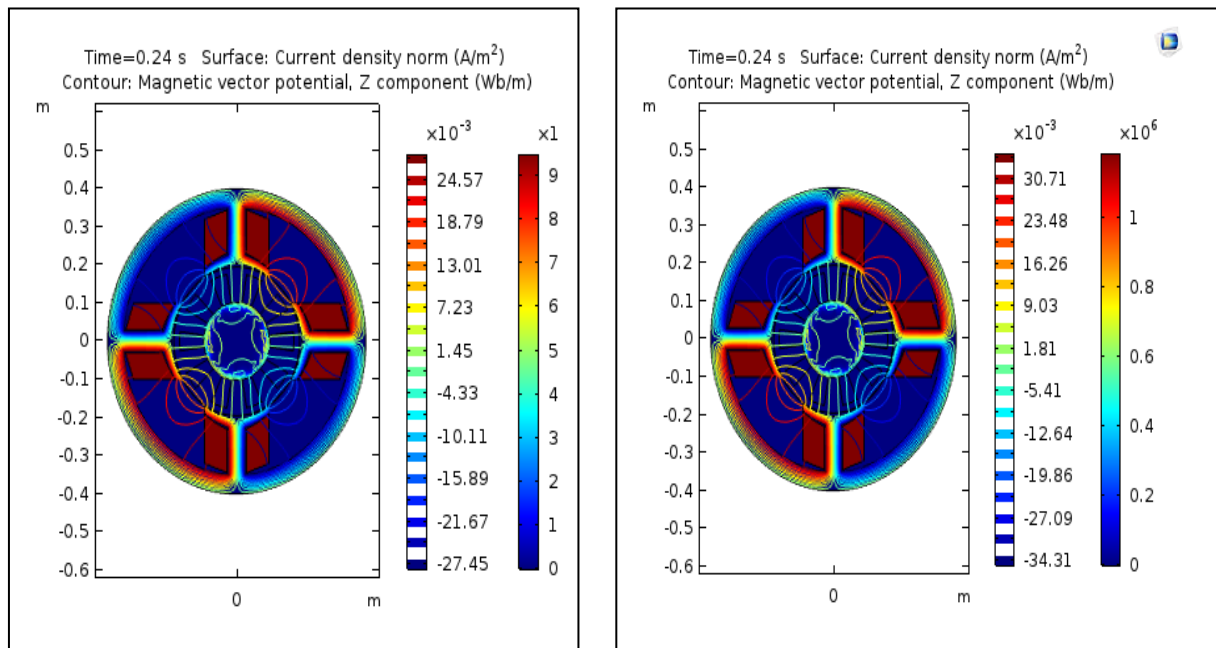
(d)

Figure IV.8 (a-d) : Densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure IV.9 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

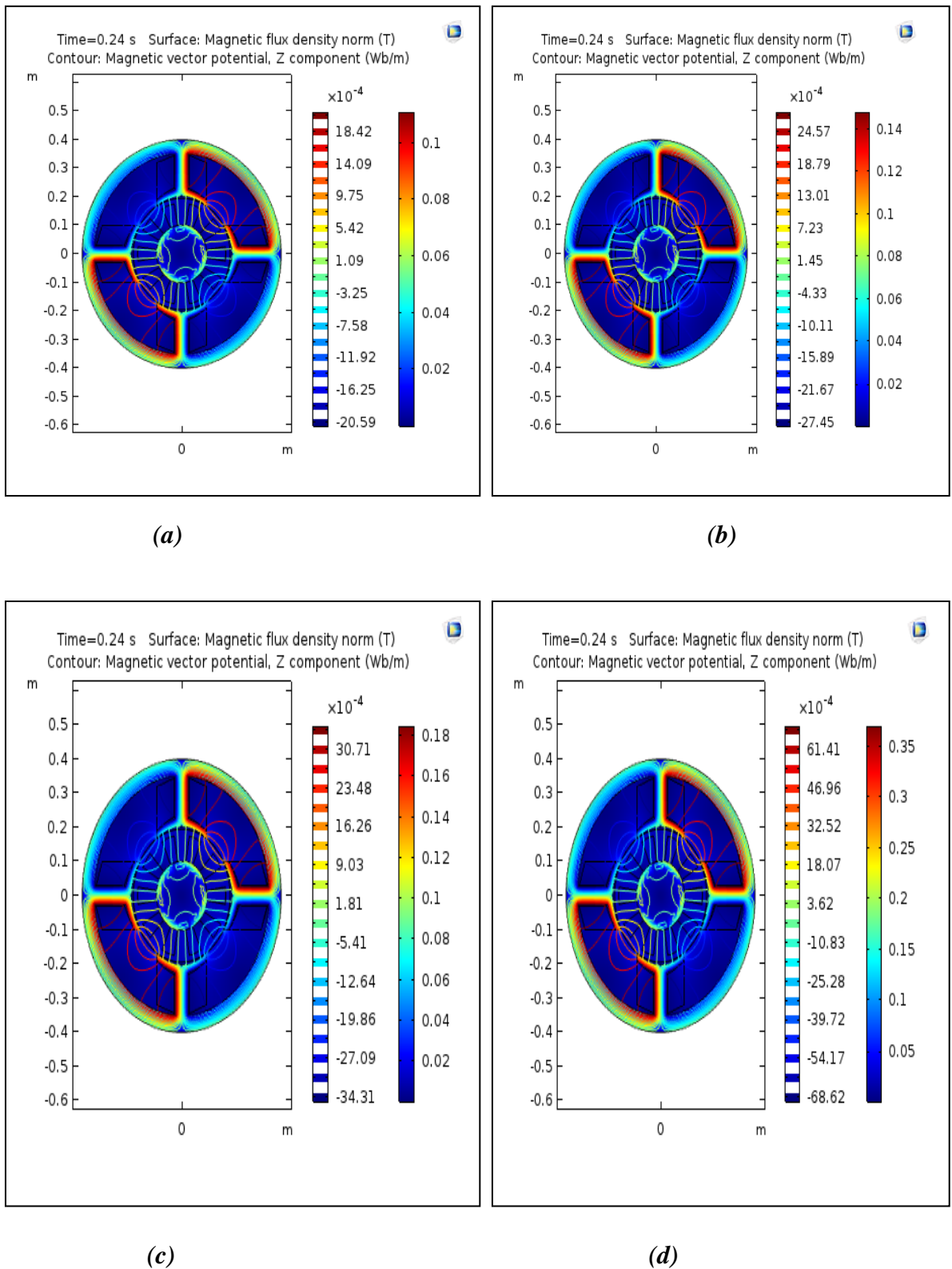
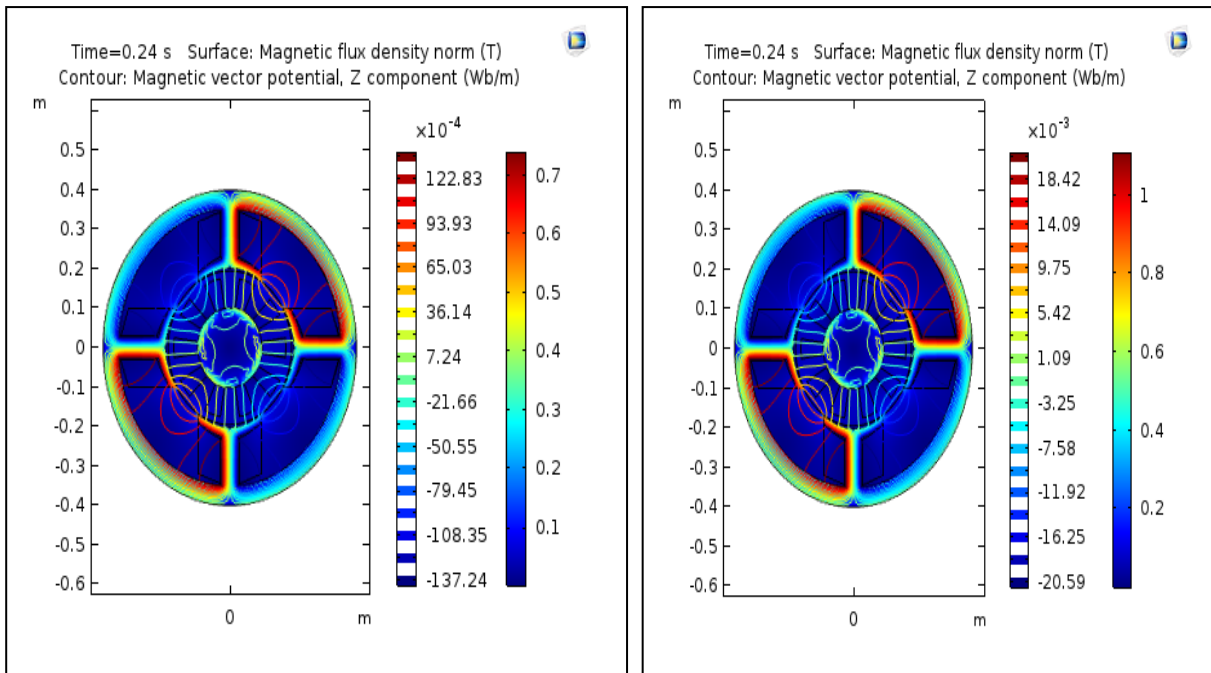
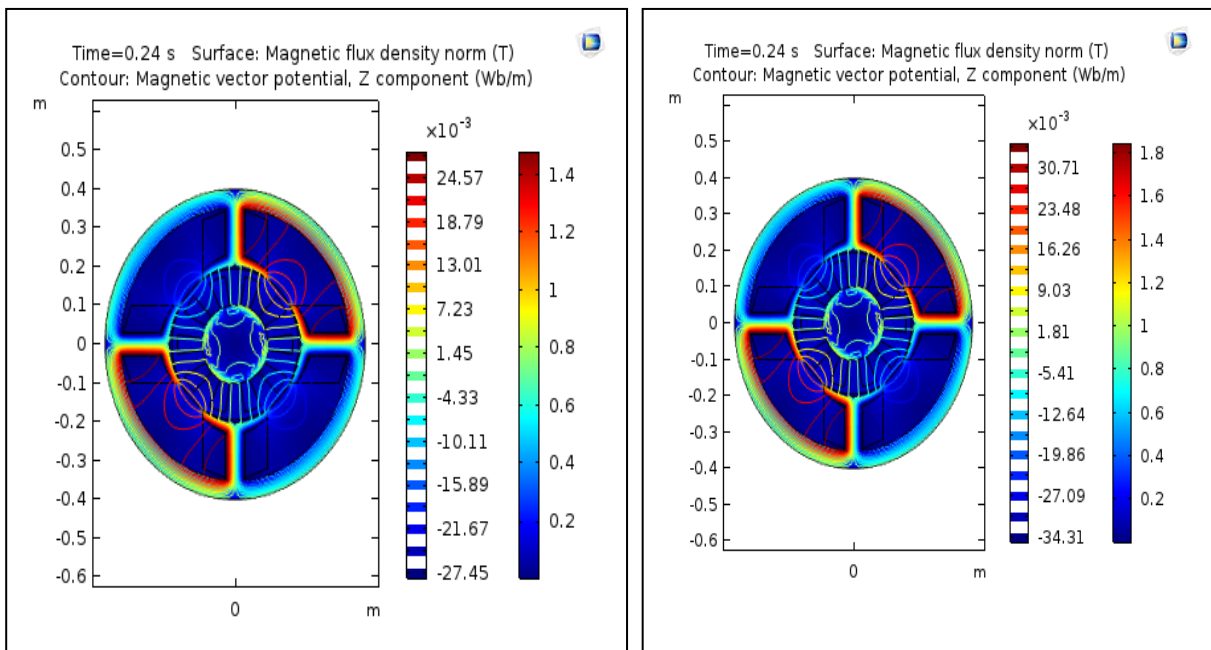


Figure IV.10 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et 2 A respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



(a)

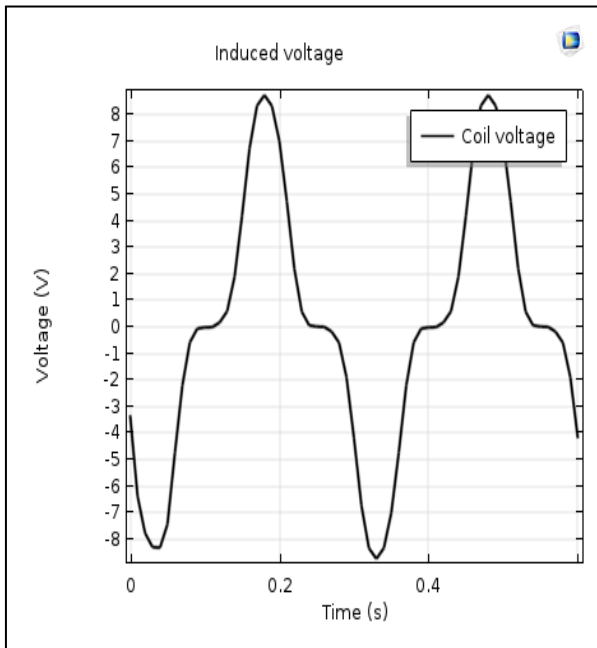
(b)



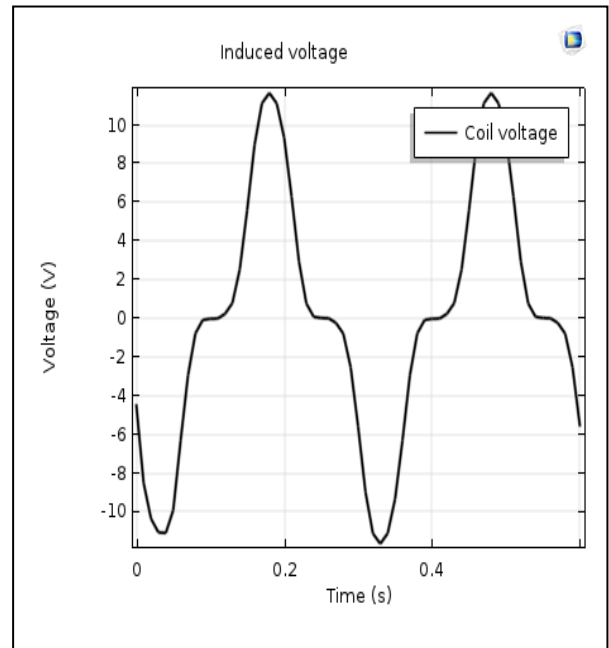
(c)

(d)

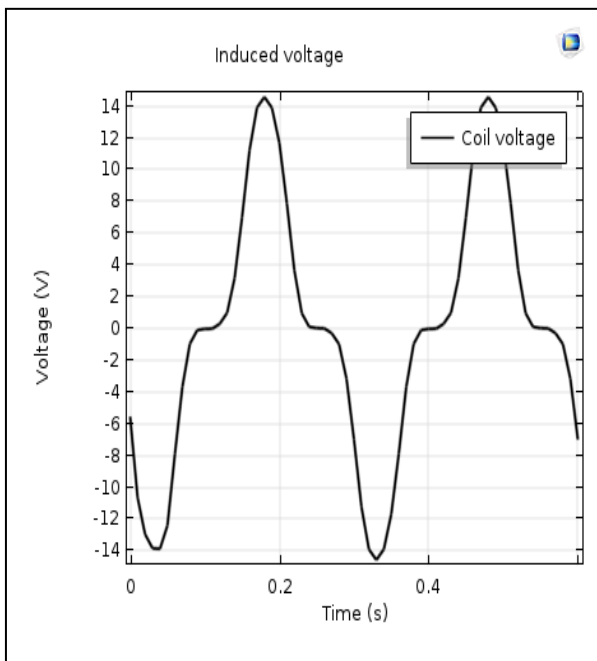
Figure IV.11 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



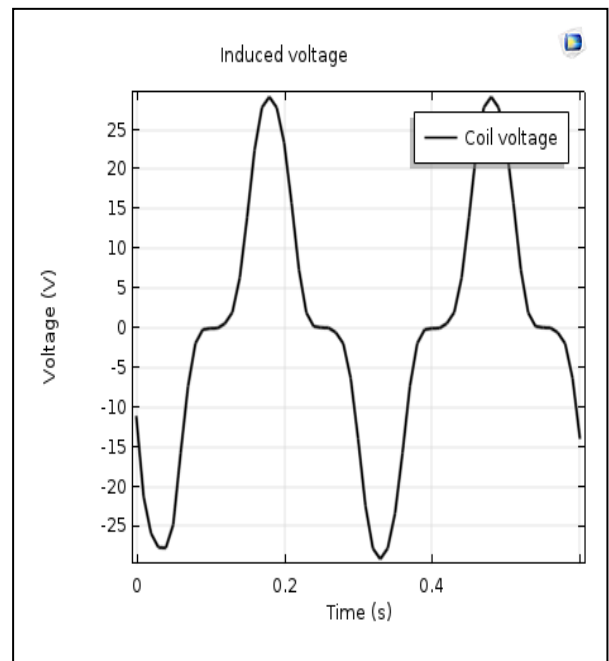
(a)



(b)

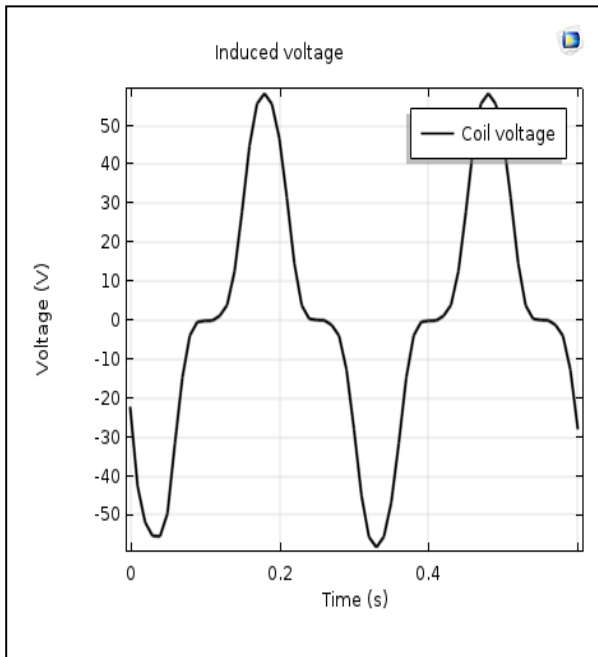


(c)

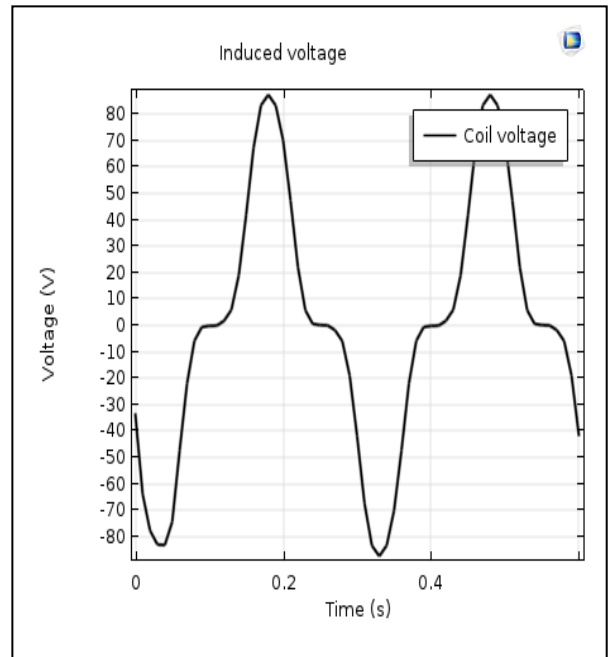


(d)

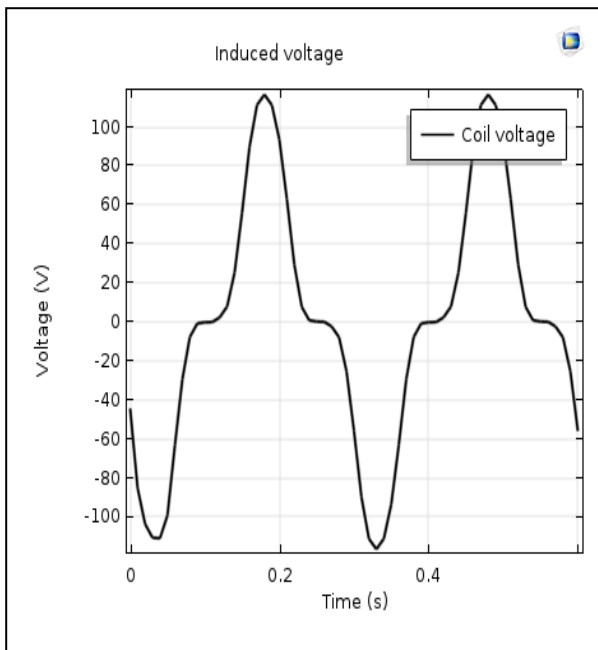
Figure IV.12 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.6, 0.8, 1$ et $2A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



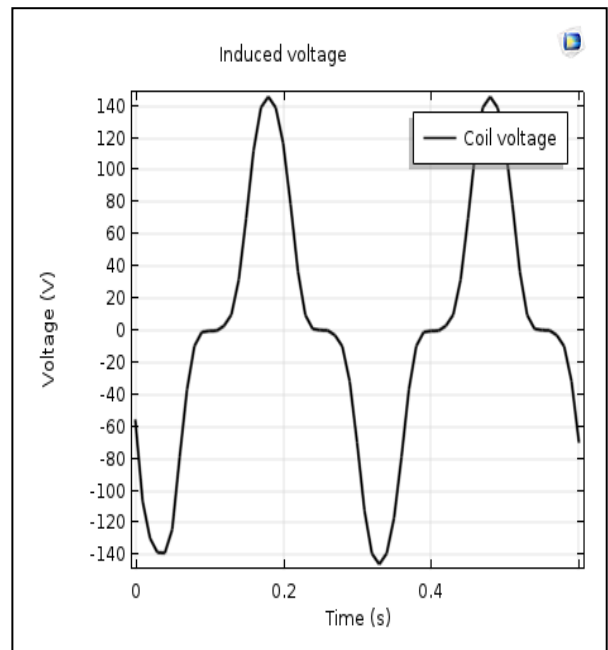
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.13 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 4, 6, 8$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

IV .4 .1 .2 Interprétation :

D'après ces résultats, nous remarquons que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales à cause de la présence du courant dans ces bobines. Par contre la distribution de potentiel vecteur magnétique dans l'air est faible. L'augmentation du courant d'excitation provoque une augmentation du potentiel vecteur magnétique c'est-à-dire il existe une relation proportionnelle entre ces deux grandeurs. On voit bien que les vecteurs de l'induction magnétique sont canalisés dans le circuit magnétique du stator à cause de la perméabilité magnétique importante du matériau. Il existe aussi une relation proportionnelle entre l'induction magnétique et le courant d'excitation, il aboutit à un maximum de 1.8T pour un courant d'excitation égal à 10A. Nous remarquons aussi d'après la figure IV.12 et IV. 13 que l'allure de la force électromotrice induite (f.e.m) est de forme semi alternatif, cette allure est conforme avec la réalité. En pratique, le collecteur assure le redressement mécanique de cette f.e.m alternatif et lui rend sous forme continu. La f.e.m induite est proportionnelle au courant d'excitation, elle atteint un maximum de 140V pour un courant de 10A.

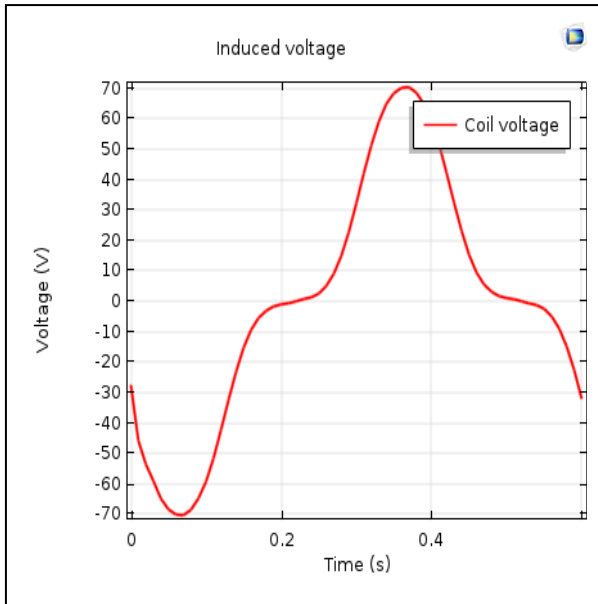
IV .4 .1 .3 Influence de la vitesse de rotation :

La figure IV.14 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de vitesse de rotation $n = 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

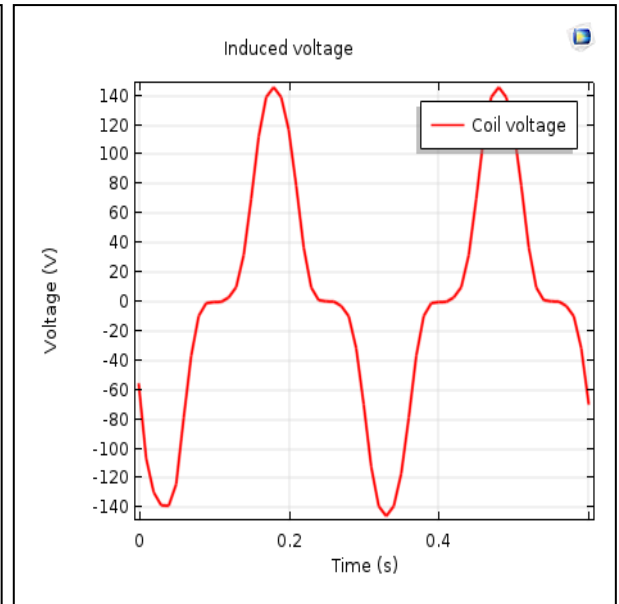
La figure IV.15 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de vitesse de rotation $n = 200, 225, 250$ et 300 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

IV .4 .1 .4 Interprétation :

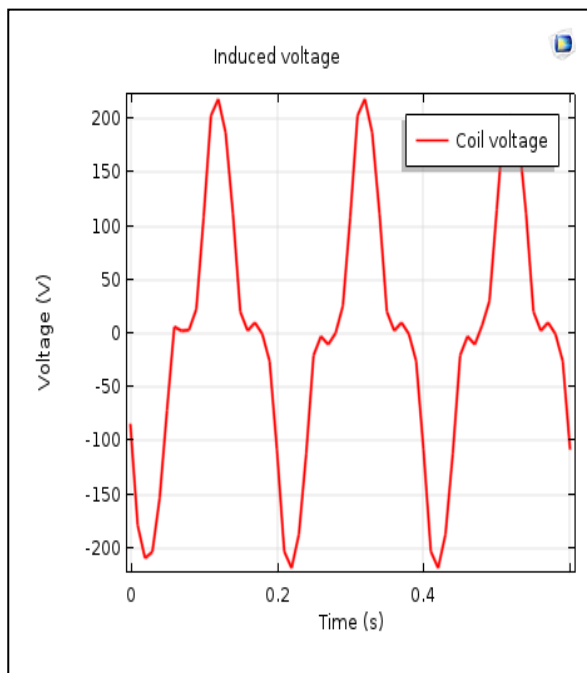
A partir de ces résultats, nous remarquons que l'allure de f.e.m induite est de forme semi alternatif pour une vitesse de rotation de valeurs 50, 75, 100, 150 et 200 tr/min. Par contre pour les valeurs de 225, 250 et 300 tr/min, l'allure de f.e.m contient un peu des harmoniques. On voit bien aussi que la f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation.



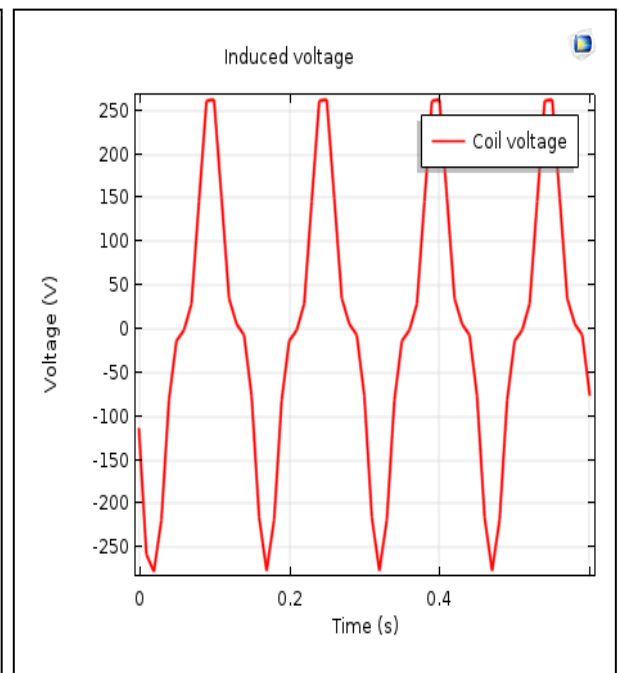
(a)



(b)



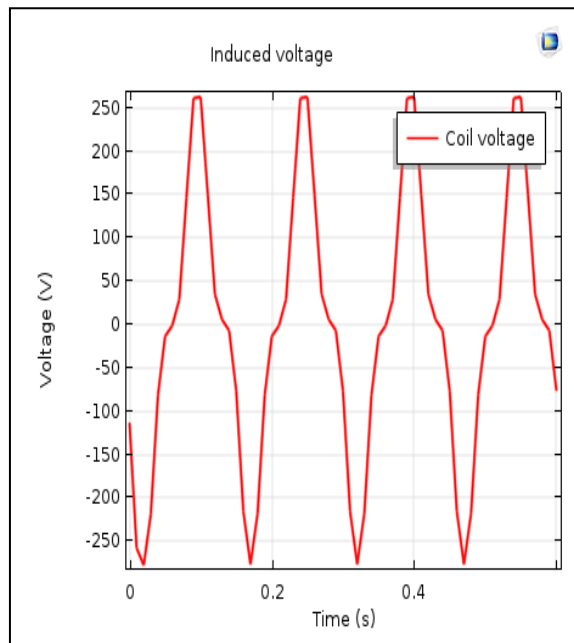
(c)



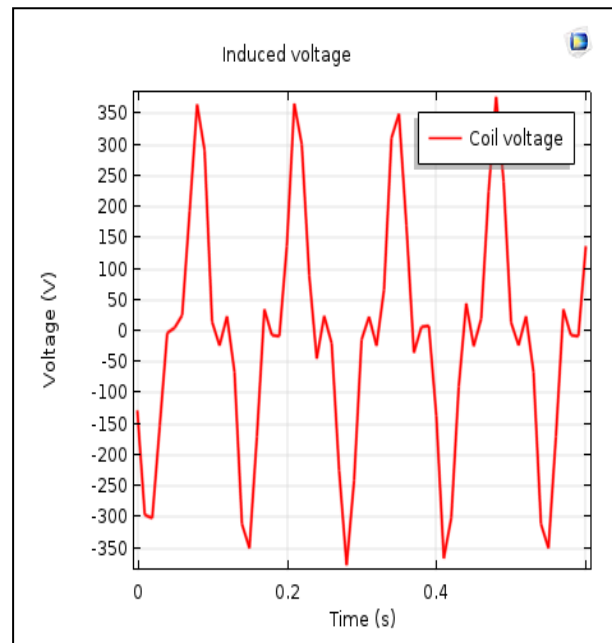
(d)

Figure IV.14 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n = 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant

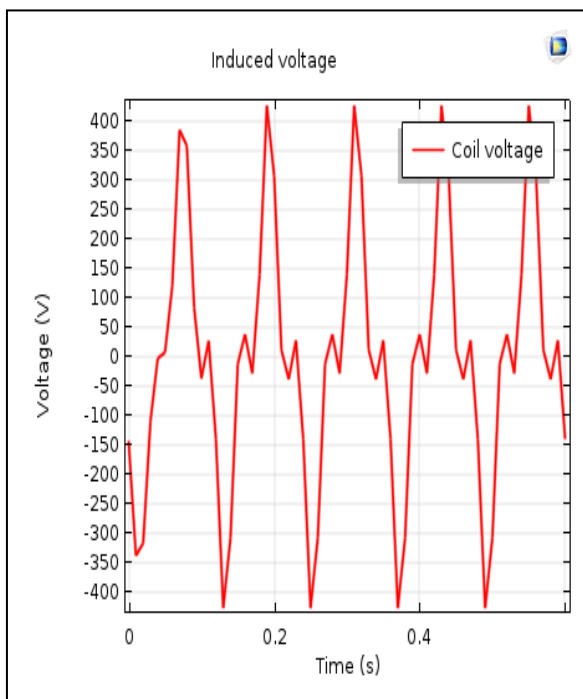
$$i_{exc} = 5A.$$



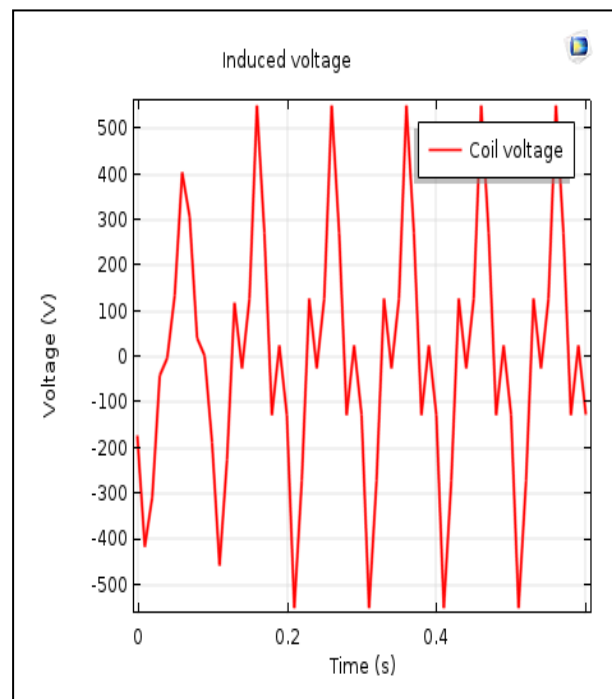
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.15 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n = 200, 225, 250$ et 300 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

IV .4 .2 Génératrice à courant continu avec circuit magnétique en Soft Iron (without losses)

IV .4 .2 .1 Influence de courant d'excitation :

La figure IV.16 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

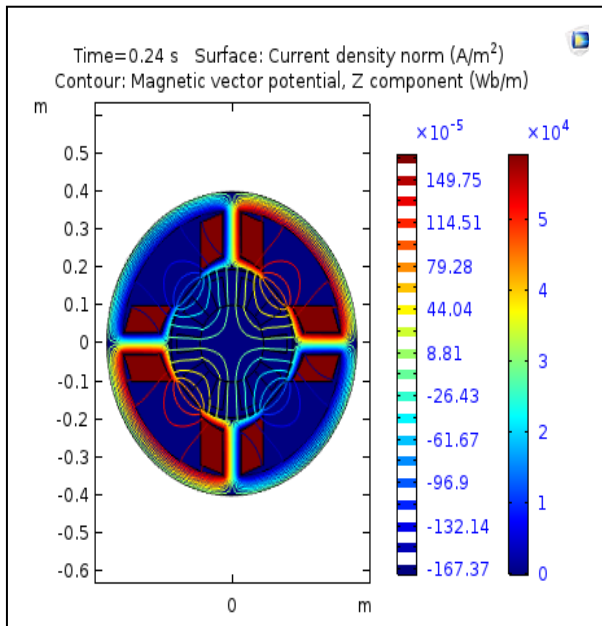
La figure IV.17 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.18 (a-d) représente l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

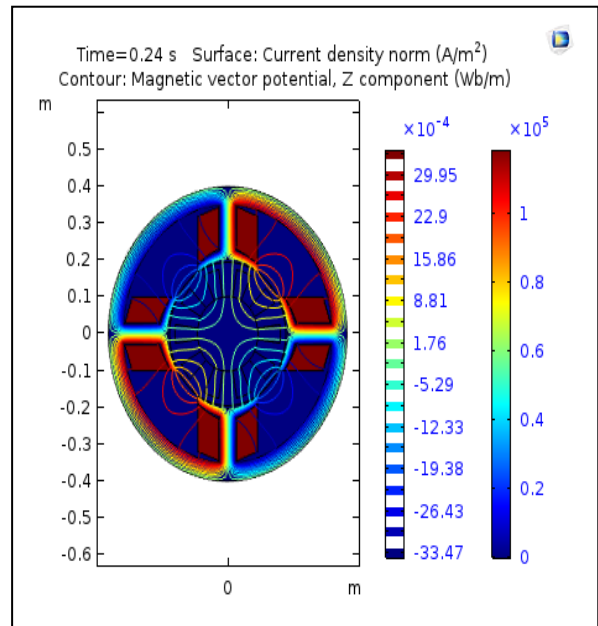
La figure IV.19 (a-d) représente l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.20 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

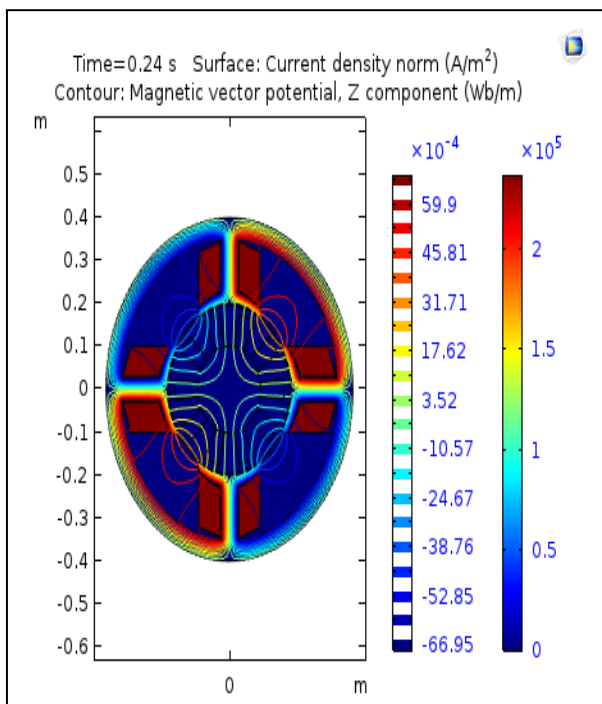
La figure IV.21 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



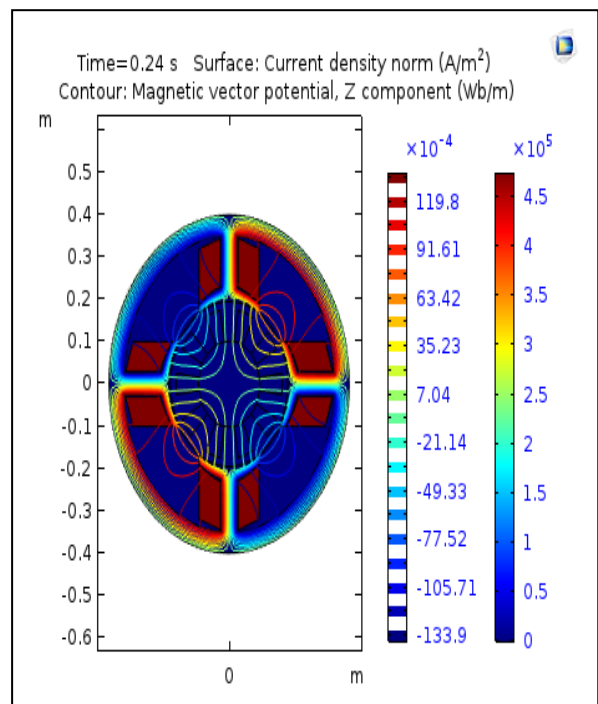
(a)



(b)



(b)



(d)

Figure IV.16 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

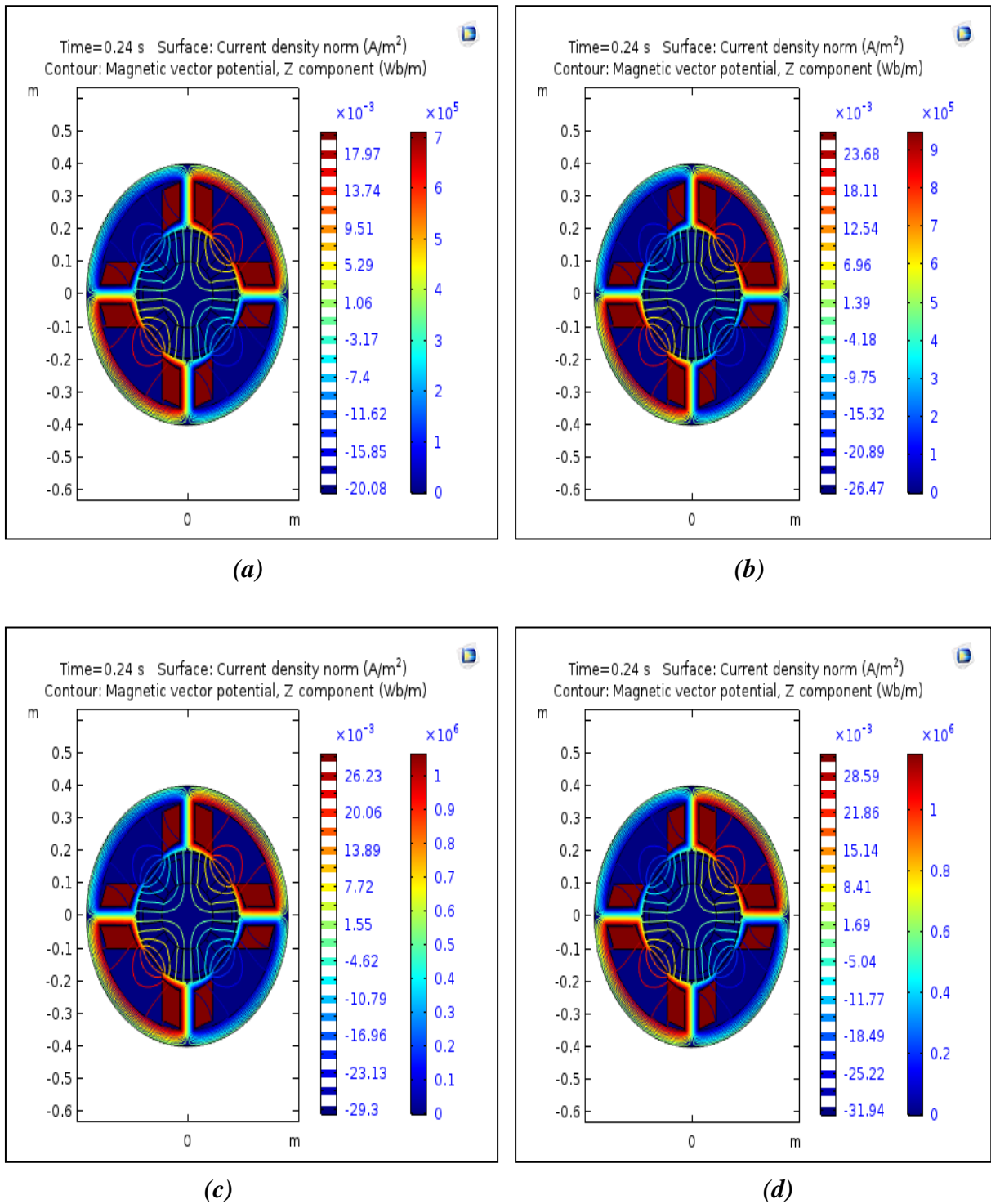
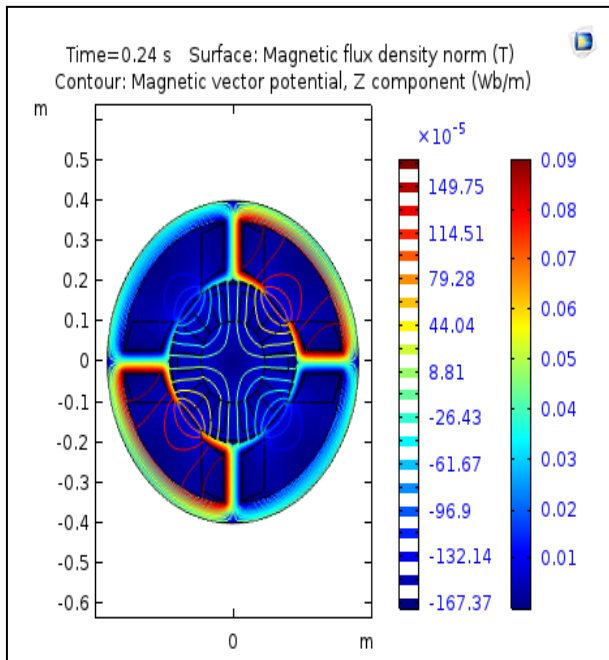
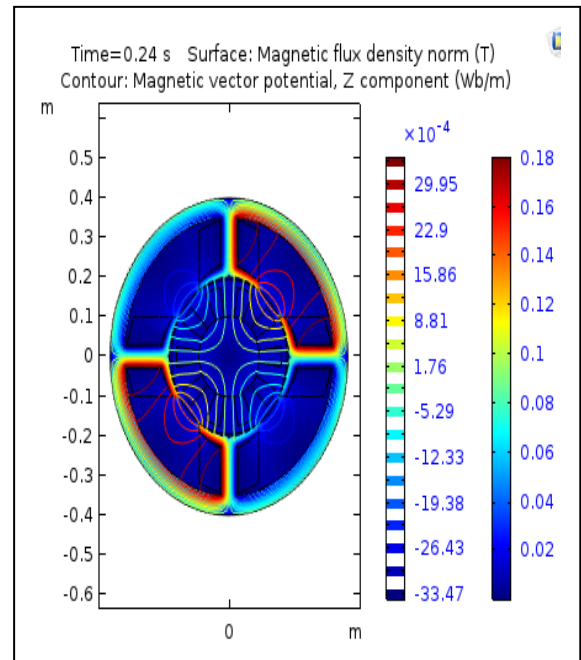


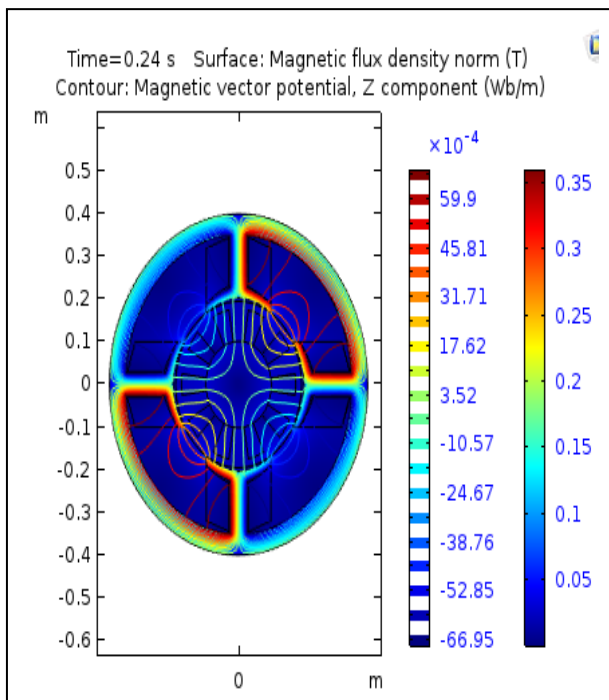
Figure IV.17 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n = 100tr/min$.



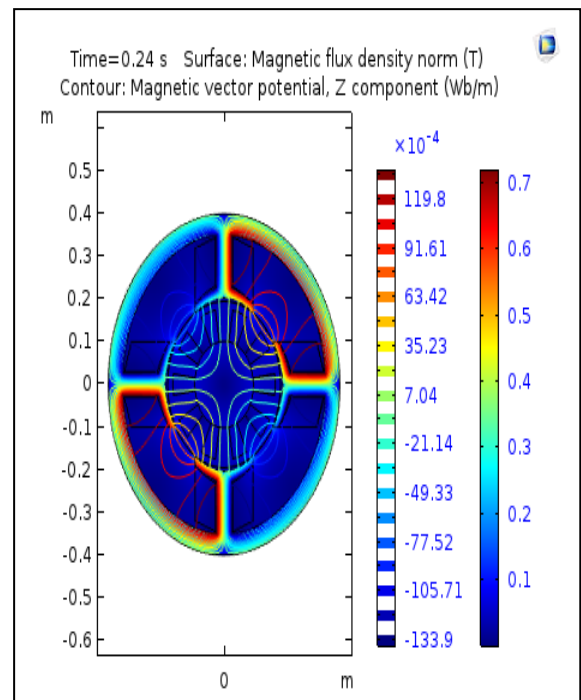
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.18 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

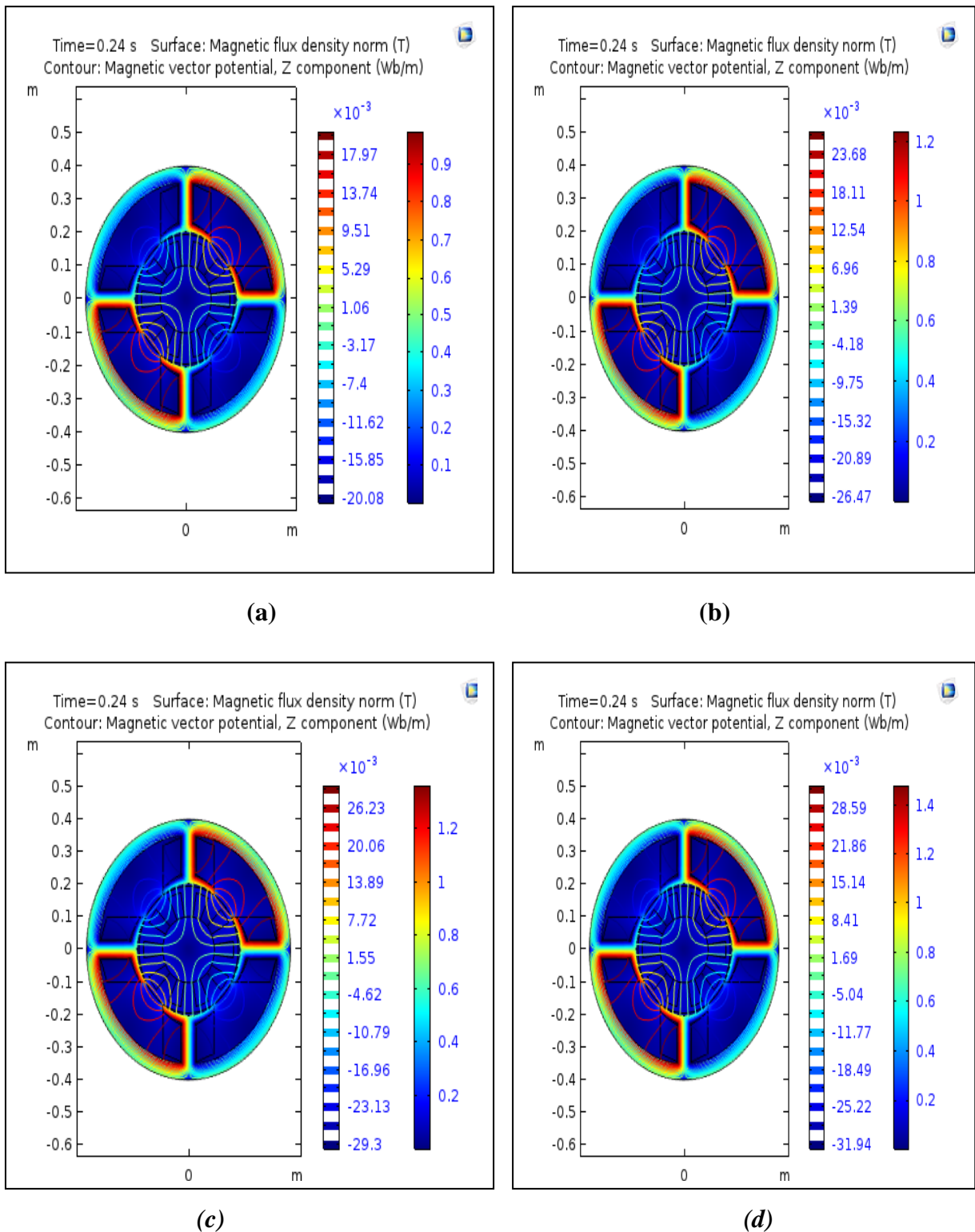
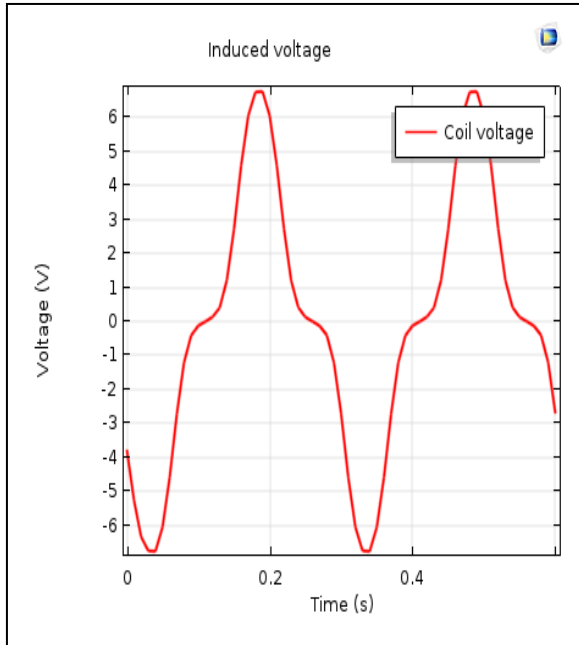
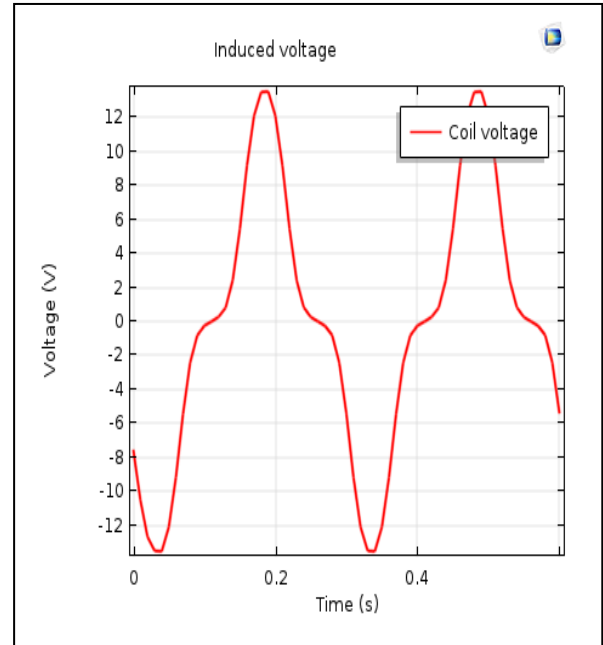


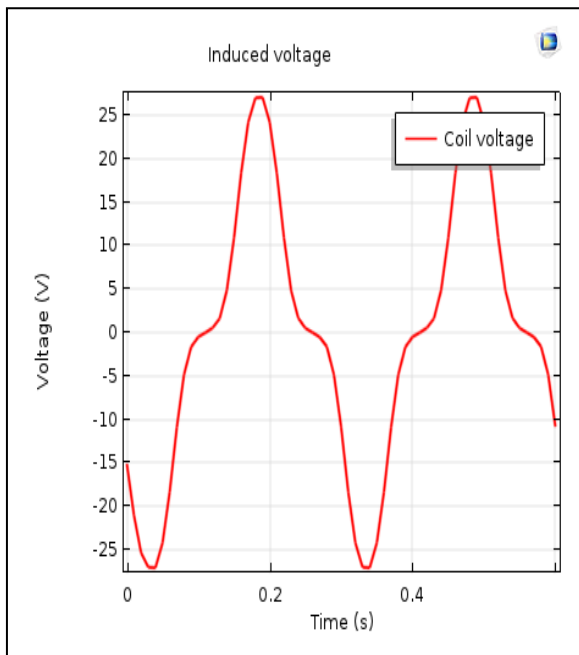
Figure IV.19 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



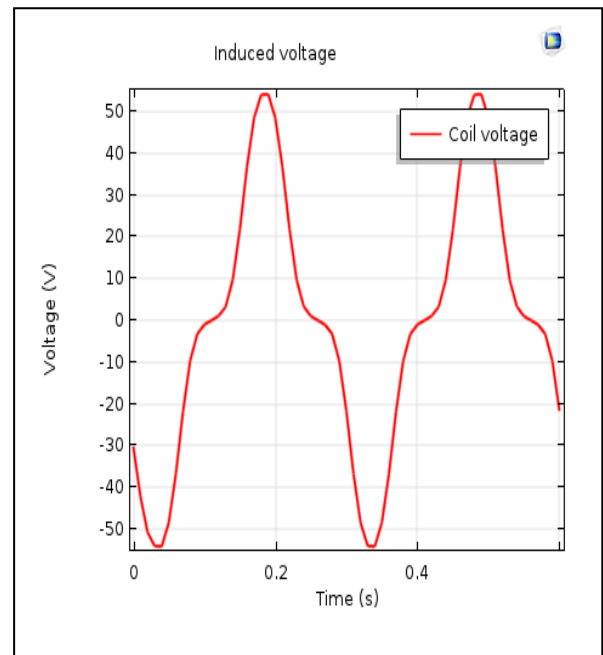
(a)



(b)

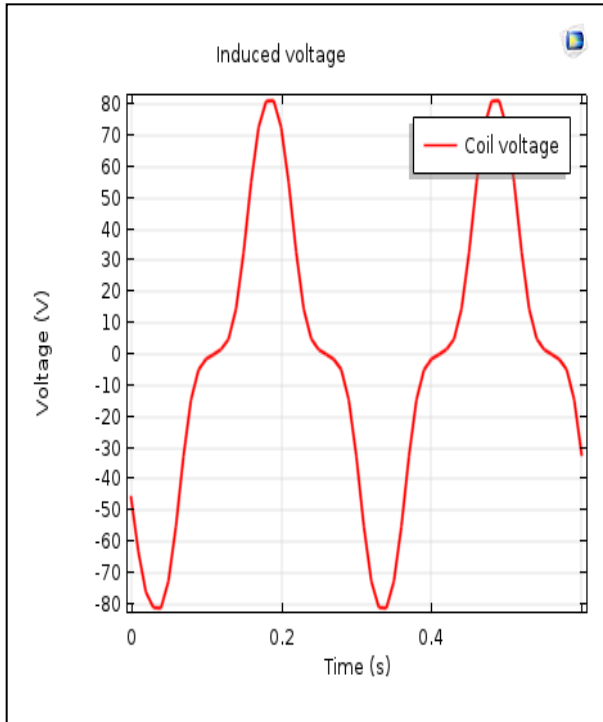


(c)

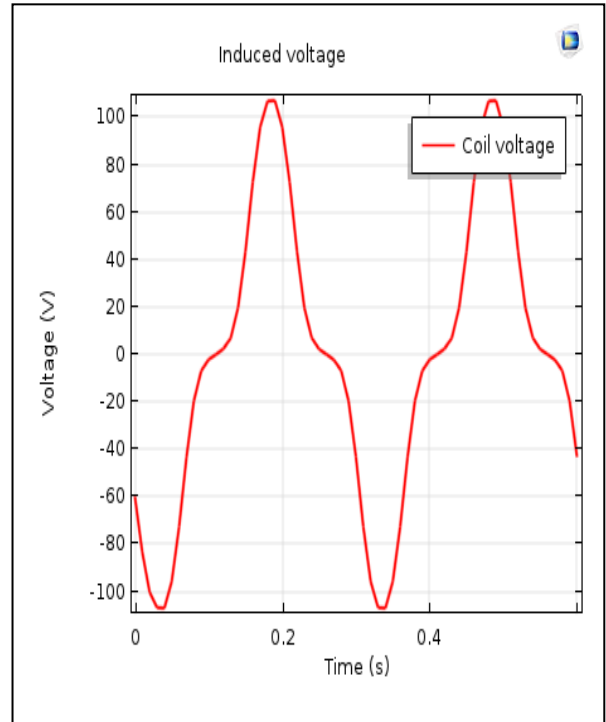


(d)

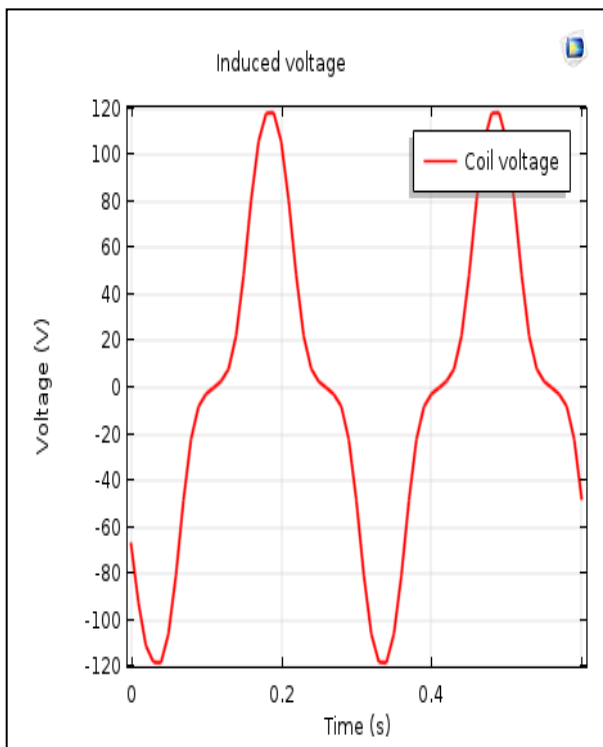
Figure IV.20 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 0.5, 1, 2$ et $4A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



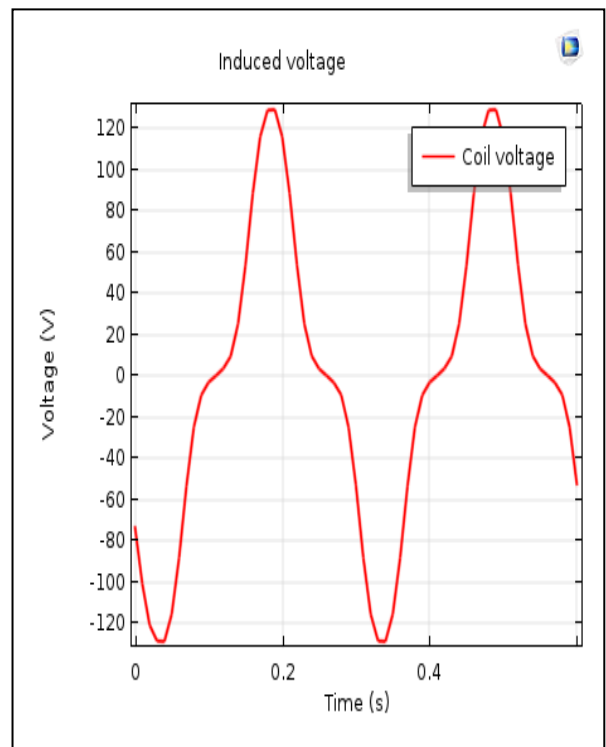
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.21 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d’excitation $i_{exc} = 6, 8, 9$ et $10A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

IV .4 .2 .2 Interprétation :

D'après ces résultats, nous constatons que la distribution de potentiel vecteur magnétique devient plus en plus intense avec l'augmentation du courant d'excitation. On peut dire que le potentiel vecteur magnétique est proportionnel au courant d'excitation, il atteint des valeurs maximales pour un $i_{exc} = 10A$. L'augmentation du courant d'excitation provoque une augmentation de l'induction magnétique, jusqu'à atteindre une valeur quasiment constante entre $1.2T$ et $1.4T$ pour un courant d'excitation varie de $9A$ à $10A$. Cette remarque est expliquée par la saturation du circuit magnétique c'est-à-dire la perméabilité magnétique est une fonction du champ magnétique. La valeur quasiment constante de l'induction magnétique est expliqué par l'utilisation du matériau (Iron soft) pour conçu le circuit magnétique de génératrice étudié. Ce matériau ne tient pas en compte les pertes par courant de Foucault. Pour la force électromotrice induite, elle est influencée par la variation de l'induction magnétique. La f.e.m augmente avec l'accroissement du courant d'excitation jusqu'à atteindre une valeur quasiment constante pour induction quasiment constant aussi (Figure IV. 21 c-d).

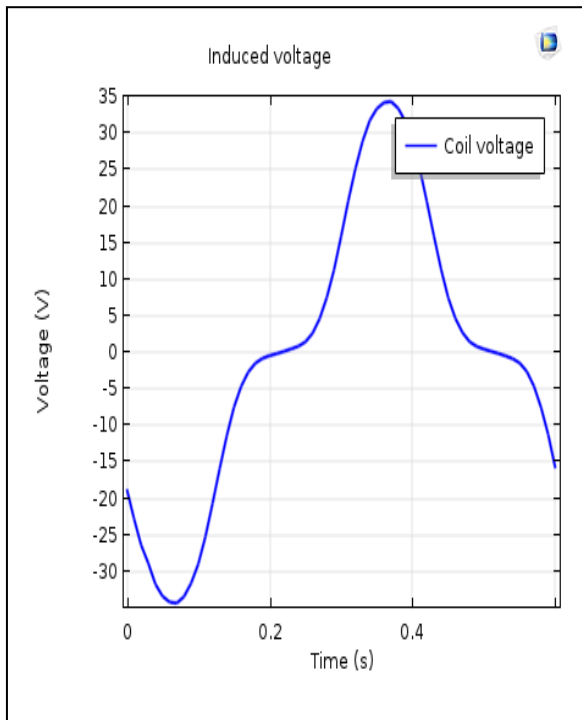
IV .4 .2 .3 Influence de la vitesse de rotation :

La figure IV.22 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

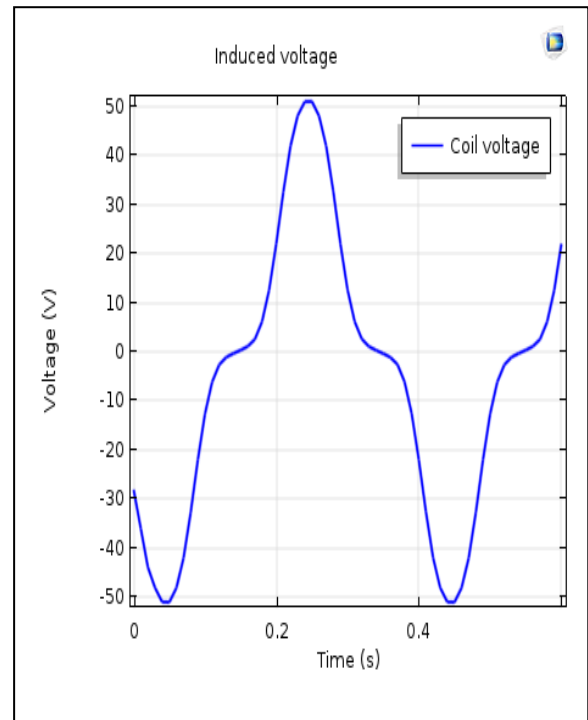
La figure IV.23 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et 300 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

IV .4 .2 .4 Interprétation :

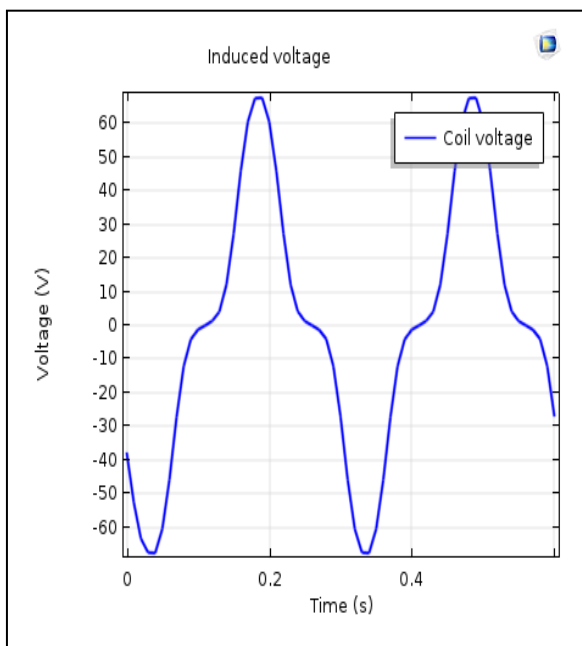
A partir de ces résultats, nous remarquons que l'allure de f.e.m induite est de forme semi alternatif notamment pour une vitesse de rotation de valeurs $50, 75, 100, 150, 200$ et 225 tr/min . Par contre pour les valeurs de 250 et 300 tr/min , il y a une modification dans l'allure de f.e.m. On voit bien aussi que la f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation. Elle atteint un maximum de $170V$ pour une vitesse de 300 tr/min .



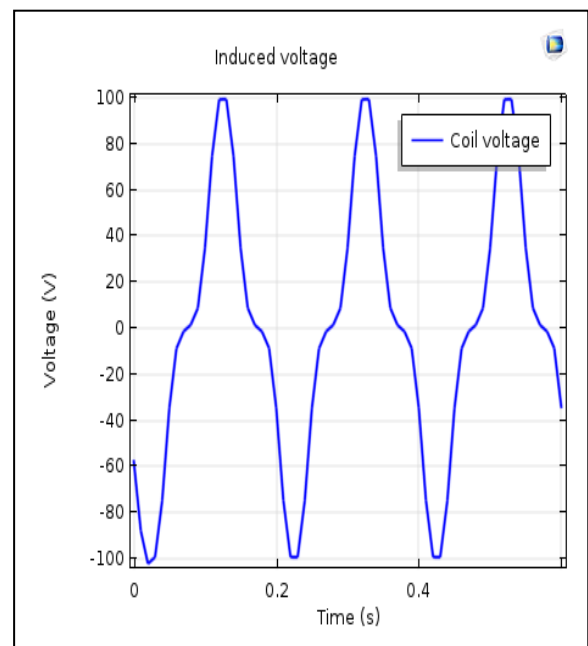
(a)



(b)

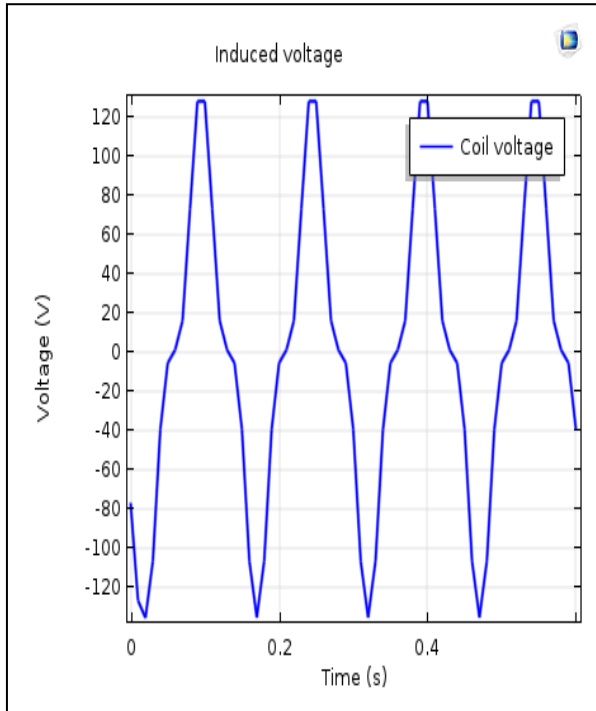


(c)

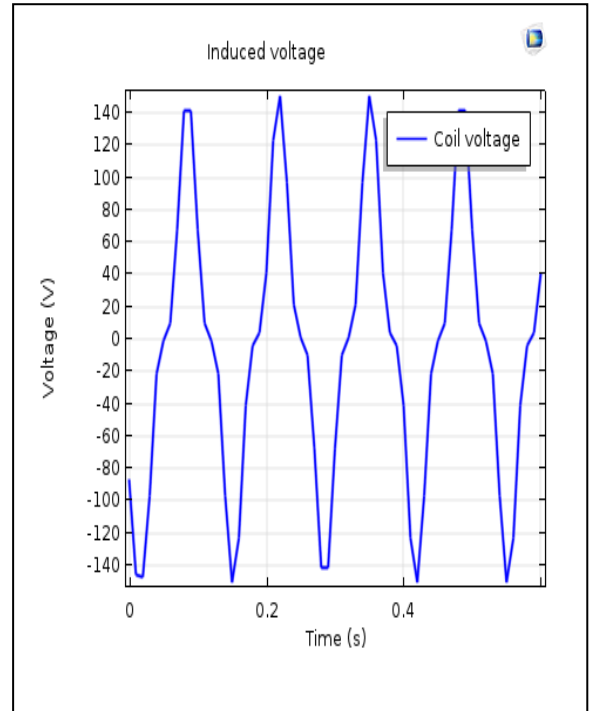


(d)

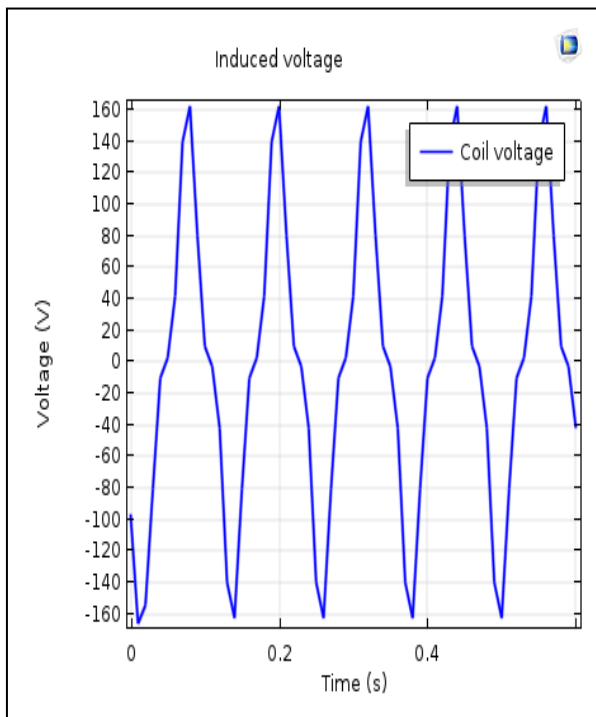
Figure IV.22 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différentes valeurs de vitesse de rotation $n = 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.



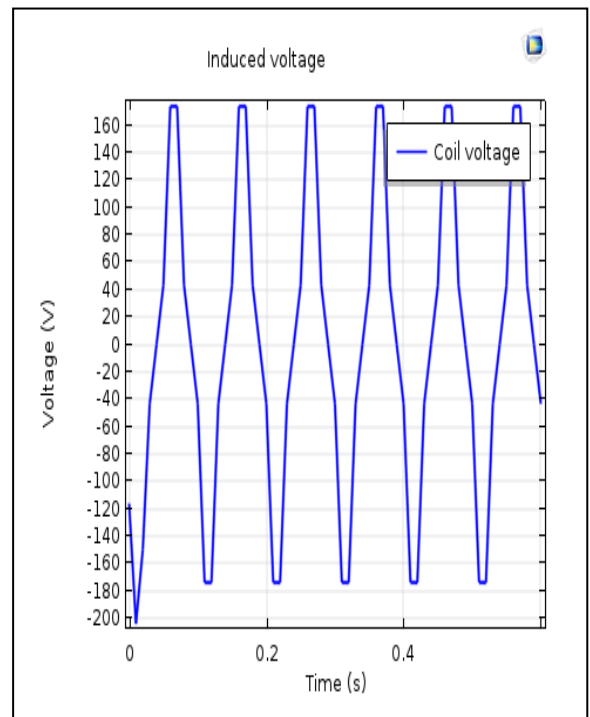
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.23 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et 300 *tr/min* respectivement avec un courant d’excitation constant $i_{exc} = 5A$.

IV .4 .3 Génératrice à courant continu avec circuit magnétique en Soft Iron (with losses)

IV .4 .3 .1 Influence de courant d'excitation :

La figure IV.24 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.25 (a-d) représente la densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.26 (a-d) représente l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.27 (a-d) représente l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.28 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

La figure IV.29 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

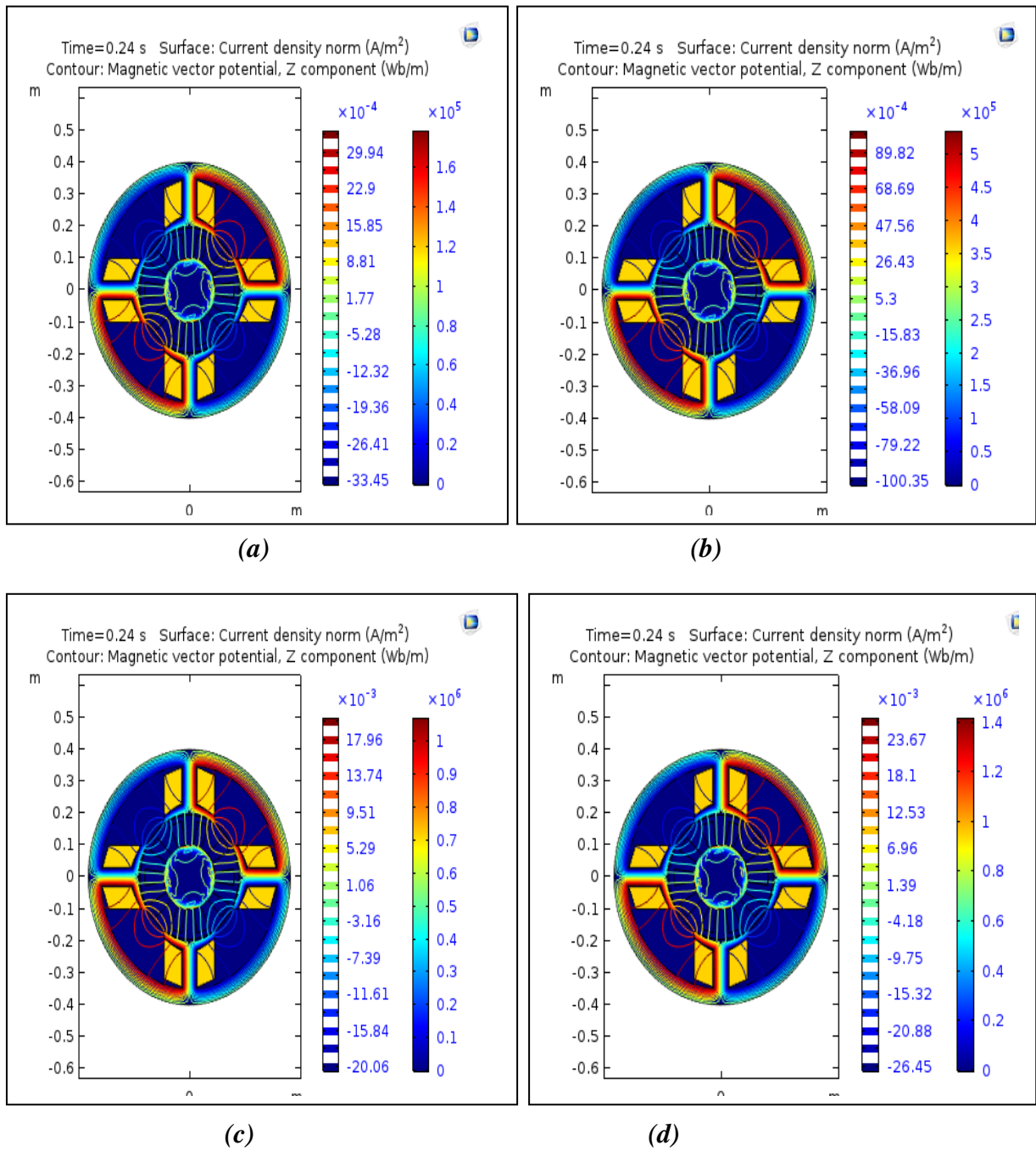
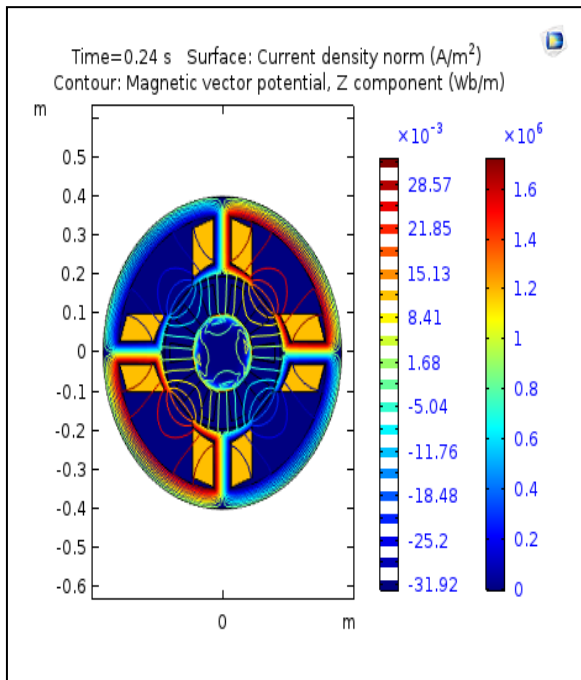
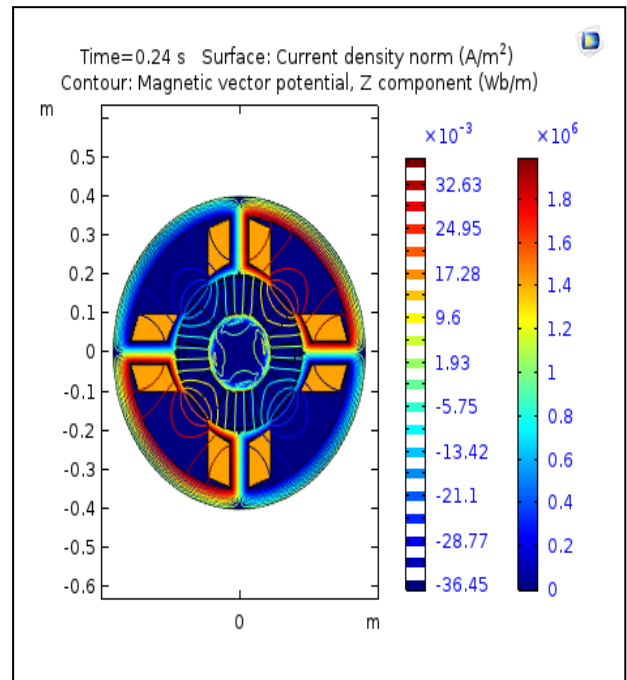


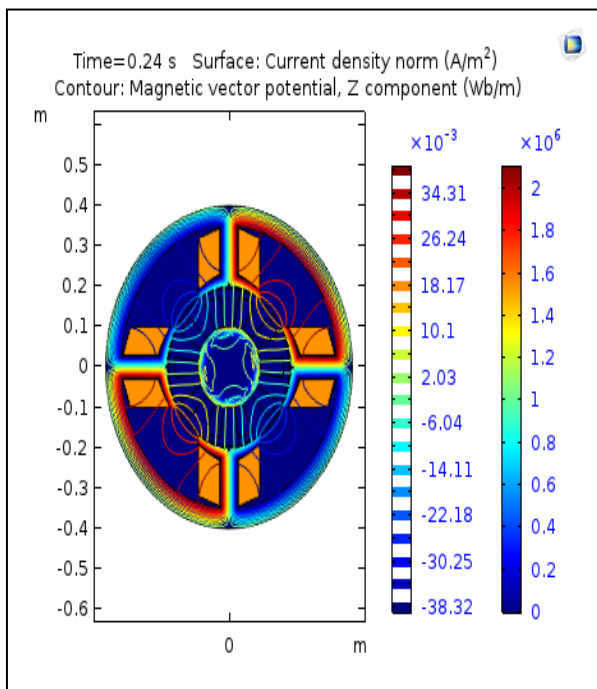
Figure IV.24 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour différentes valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et 8 A respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100$ tr/min.



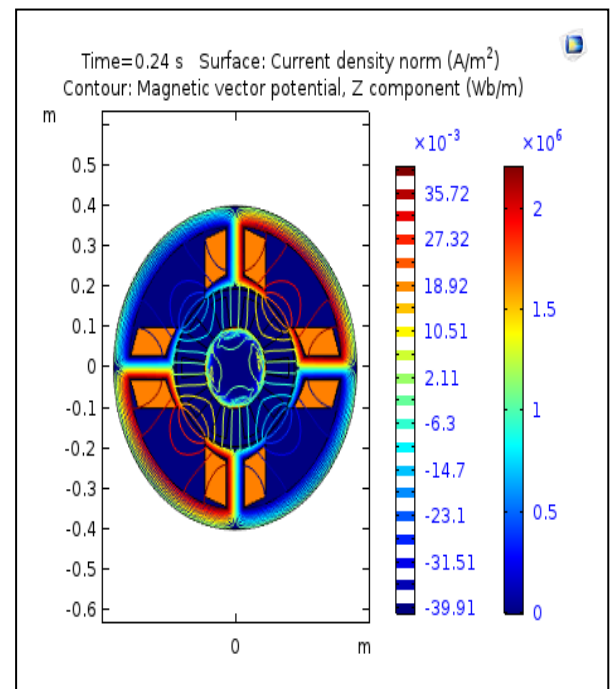
(a)



(b)

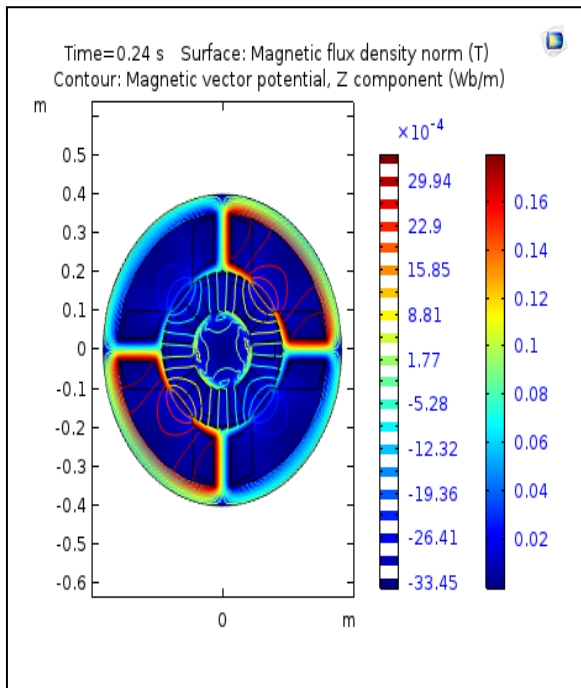


(c)

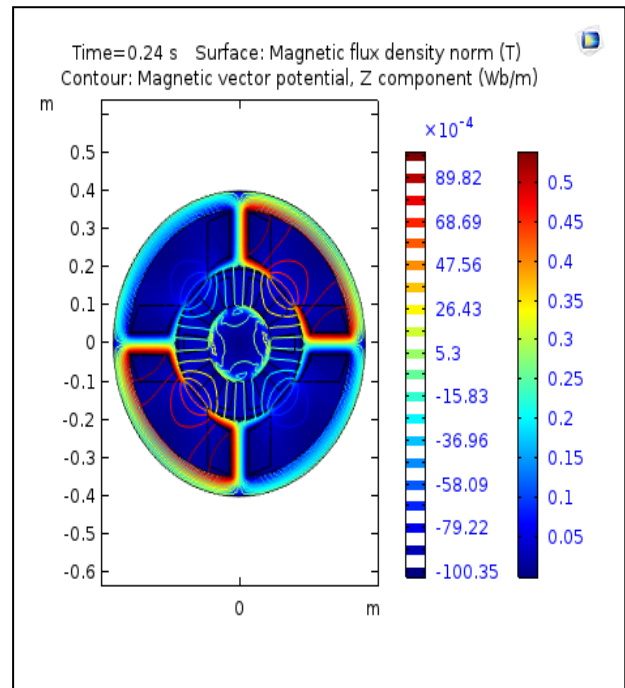


(d)

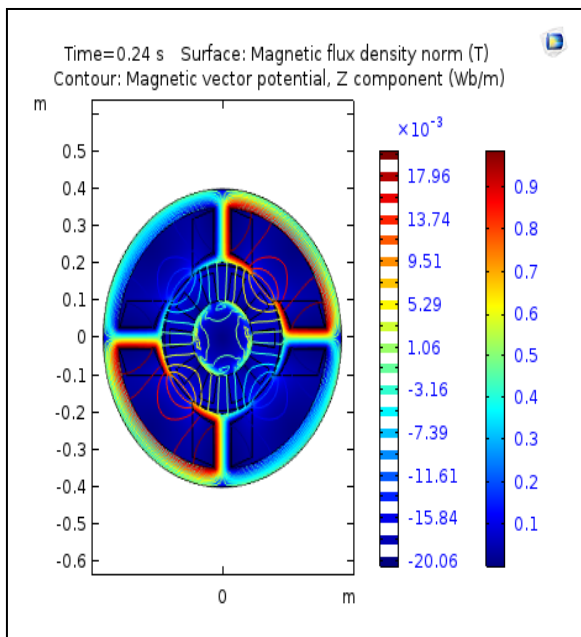
Figure IV.25 (a-d) : densité de courant calculé avec le potentiel vecteur magnétique pour Différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



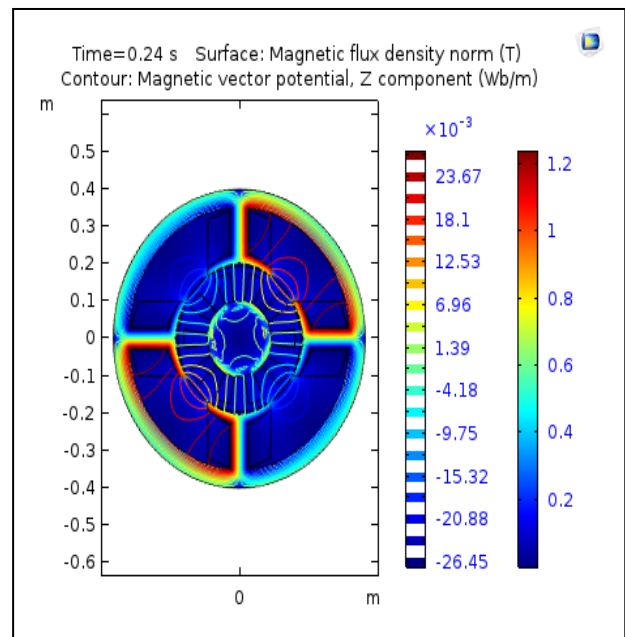
(a)



(b)

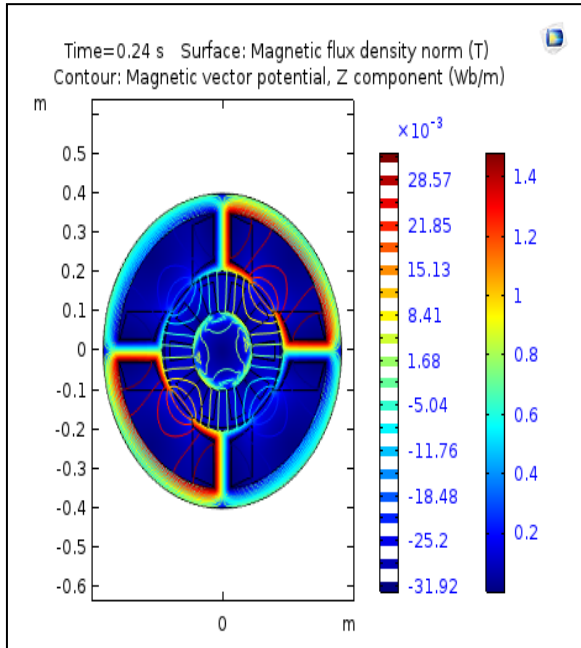


(c)

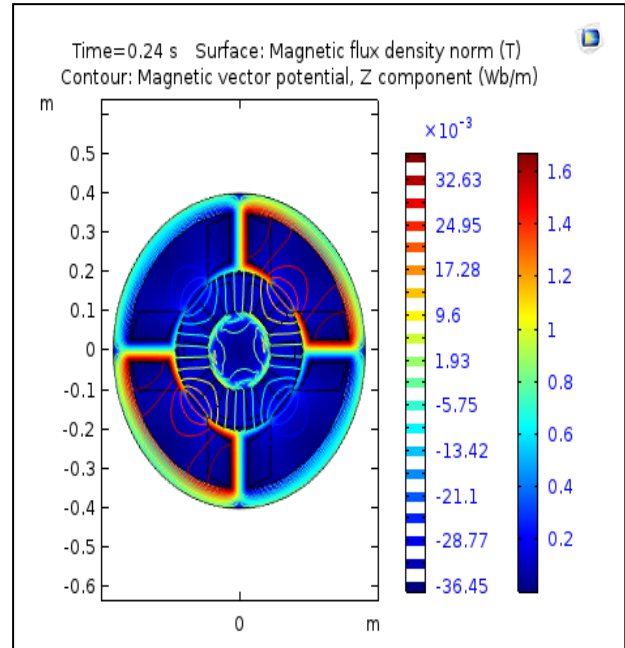


(d)

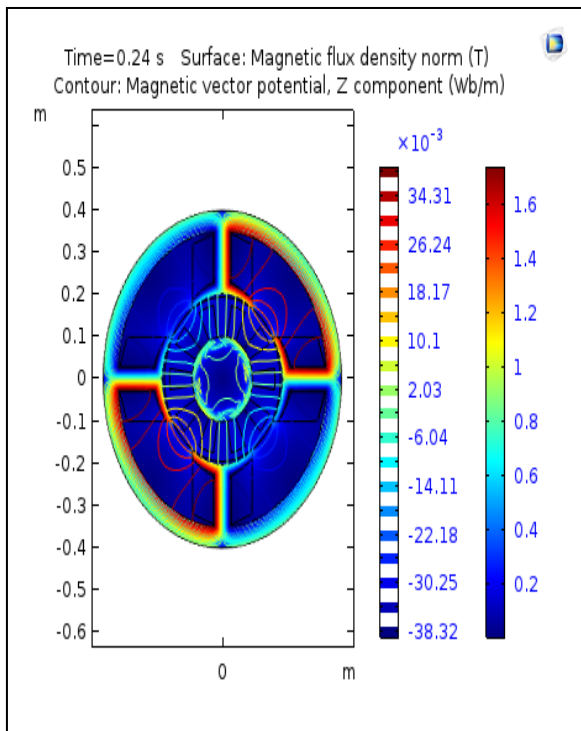
Figure IV.26 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



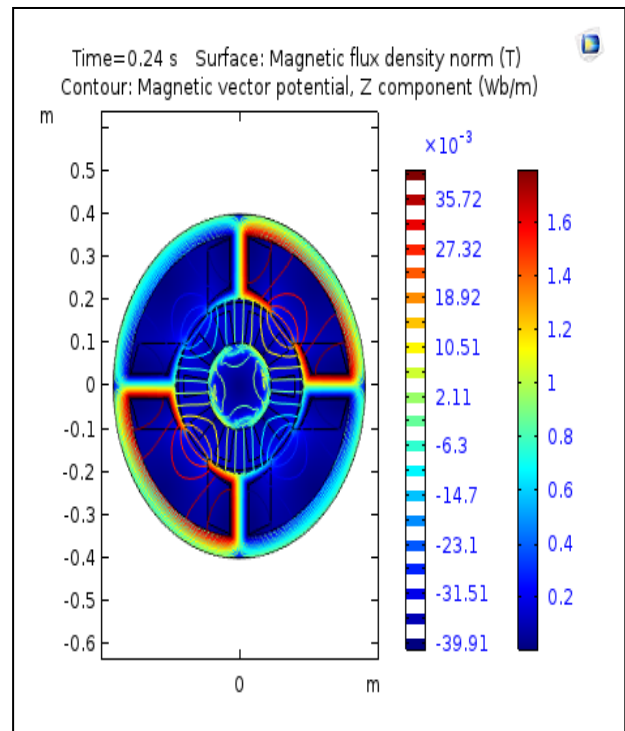
(a)



(b)

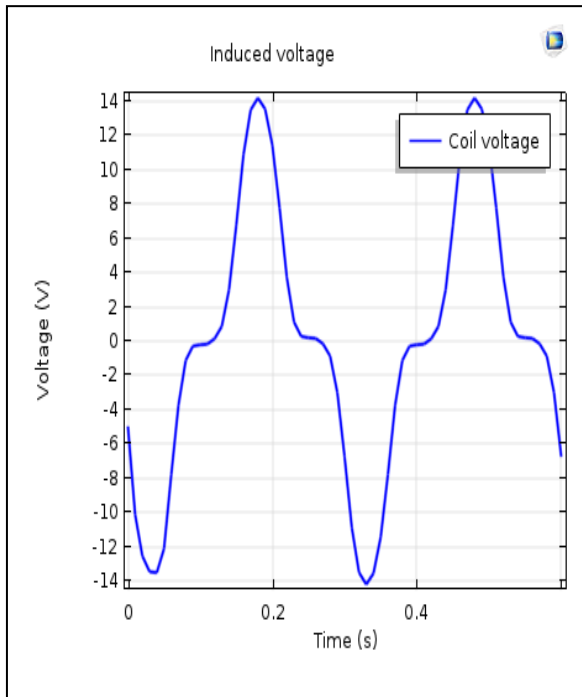


(c)

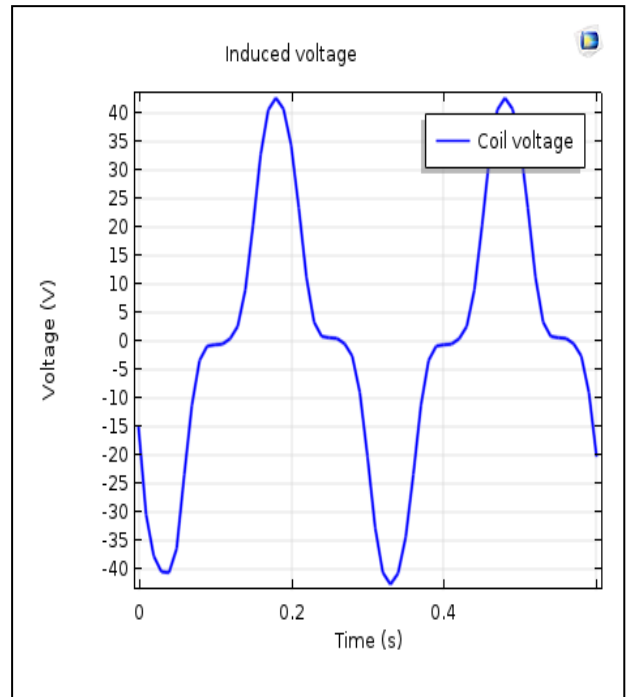


(d)

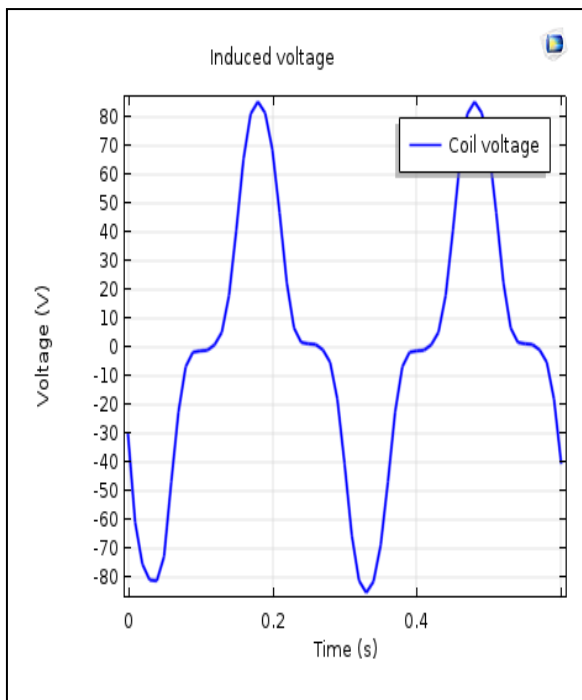
Figure IV.27 (a-d) : l'induction magnétique pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



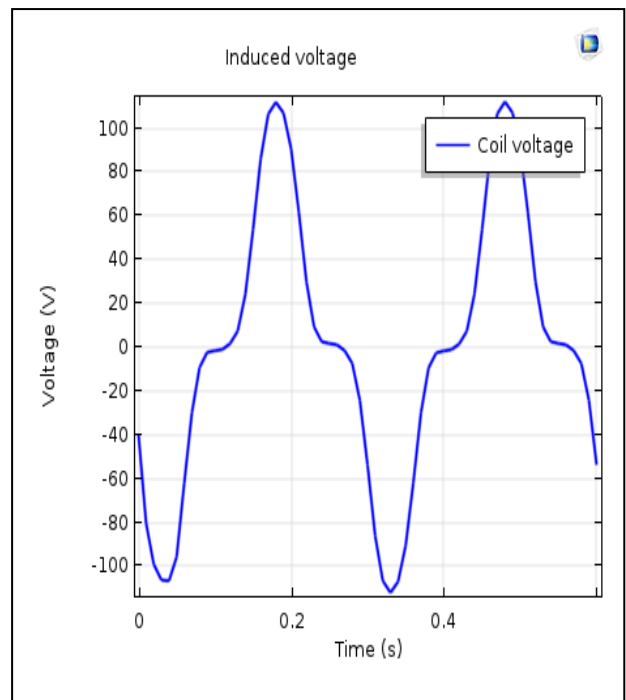
(a)



(b)

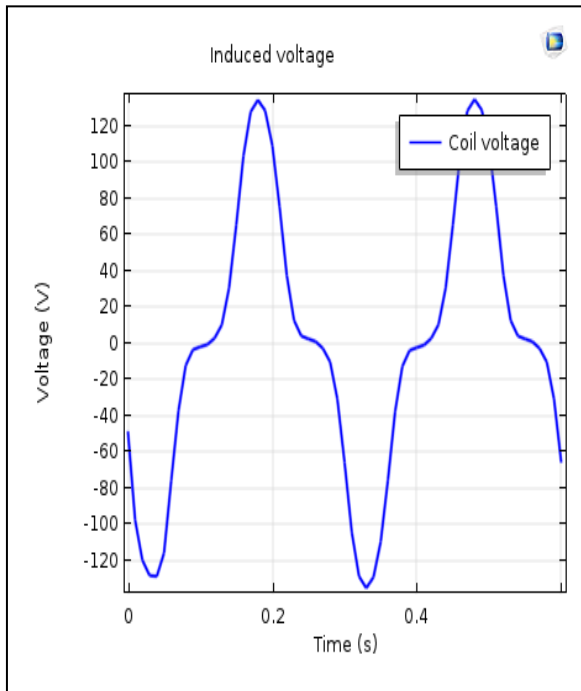


(c)

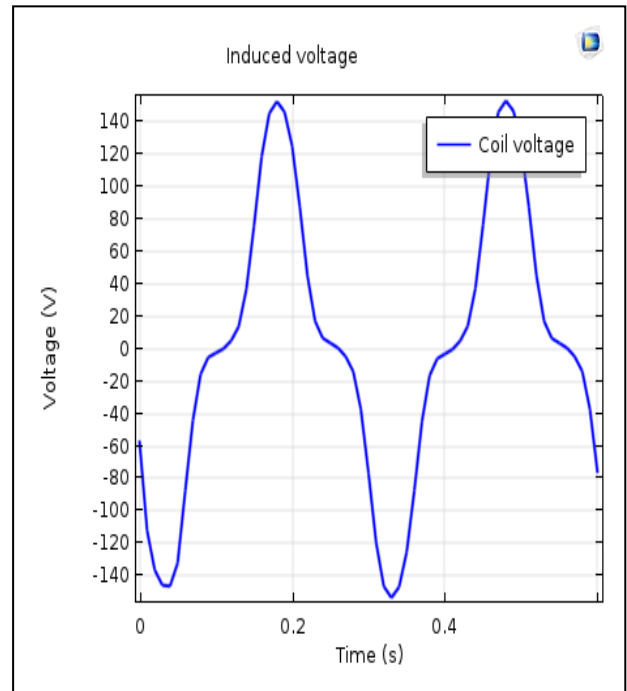


(d)

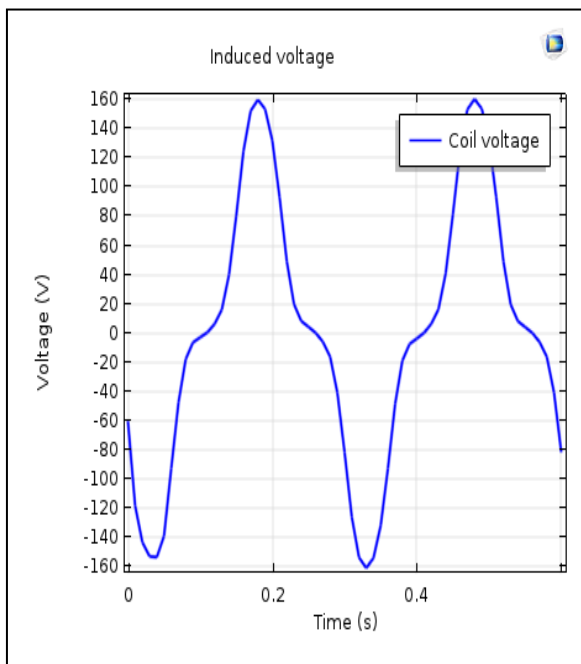
Figure IV.28 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 1, 3, 6$ et $8A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.



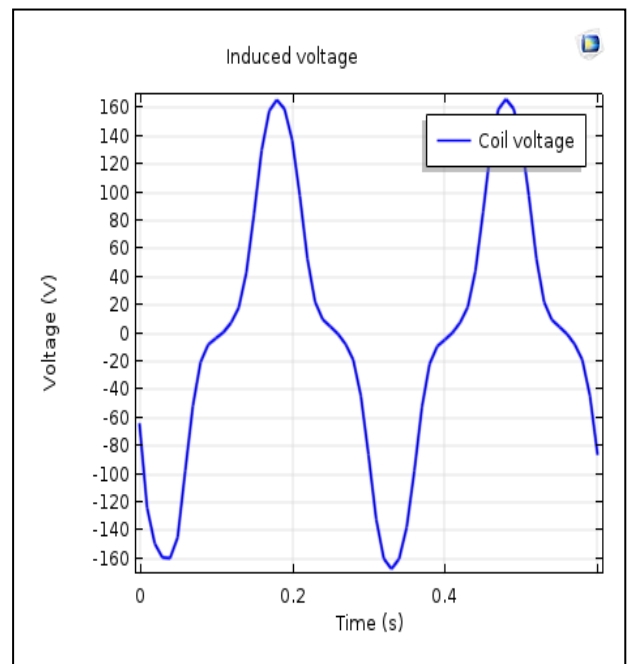
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.29 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de courant d'excitation $i_{exc} = 10, 12, 13$ et $14A$ respectivement avec une vitesse de rotation constante $n=100tr/min$.

IV .4 .3 .2 Interprétation :

D'après ces résultats, nous constatons que le potentiel vecteur magnétique est proportionnel au courant d'excitation, il atteint des valeurs maximales pour un $i_{exc} = 14A$. L'augmentation du courant d'excitation provoque une augmentation de l'induction magnétique, jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à $1.6T$ pour un courant d'excitation varie de $12A$. A partir de cette valeur, l'induction magnétique reste constante avec l'accroissement du courant ($i_{exc} = 13$ et $14 A$), c'est-à-dire le circuit magnétique est saturé. La valeur constante de l'induction magnétique est expliquée aussi par l'utilisation du matériau (Iron soft) dans la conception de circuit magnétique de la génératrice étudié. Ce matériau tient compte les pertes par courant de Foucault. Pour la force électromotrice induite, elle est influencée par la variation de l'induction magnétique. La f.e.m augmente avec l'accroissement du courant d'excitation jusqu'à atteindre une valeur constante pour induction magnétique constant aussi (Figure IV. 29 b-d).

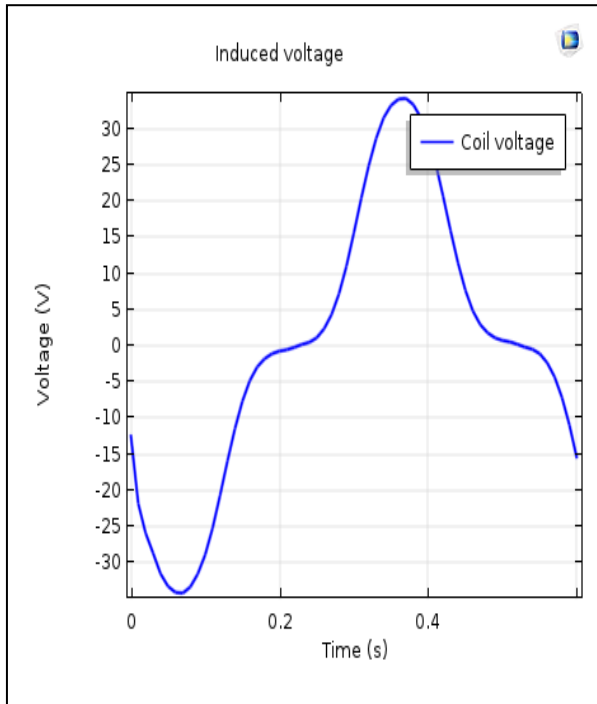
IV .4 .3 .3 Influence de la vitesse de rotation :

La figure IV.30 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 50, 75, 100$ et 150 *tr/min* respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

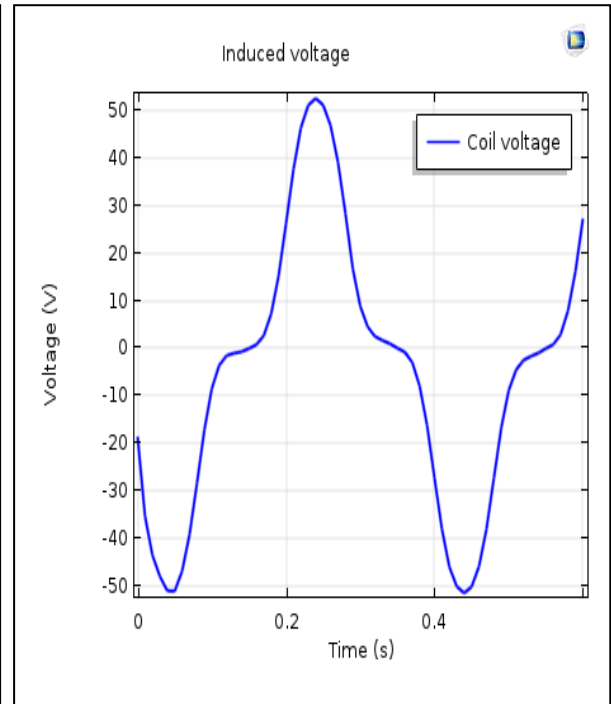
La figure IV.31 (a-d) représente la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et 300 *tr/min* respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

IV .4 .3 .4 Interprétation :

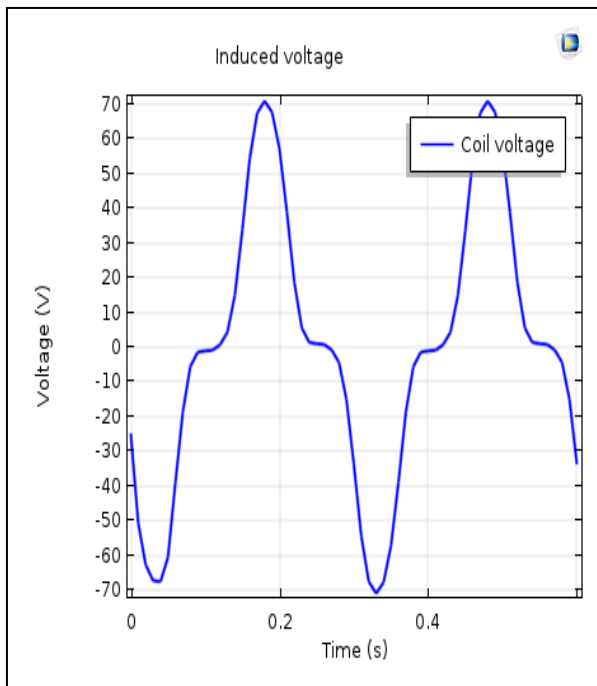
A partir de ces résultats, nous remarquons que l'allure de f.e.m induite est de forme semi alternatif pour une vitesse de rotation de valeurs $50, 75, 100, 150$ et 200 *tr/min*. Par contre pour les valeurs de $225, 250$ et 300 *tr/min*, l'allure de f.e.m contient un peu des harmoniques. On voit bien aussi que la f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation.



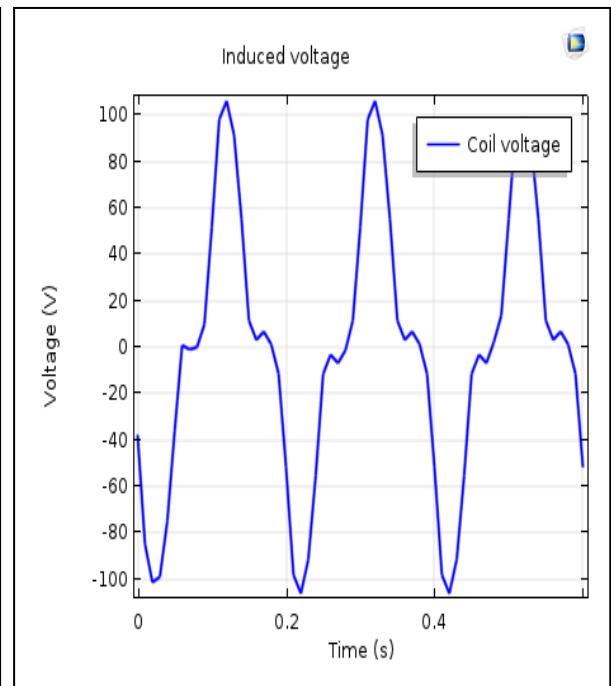
(a)



(b)



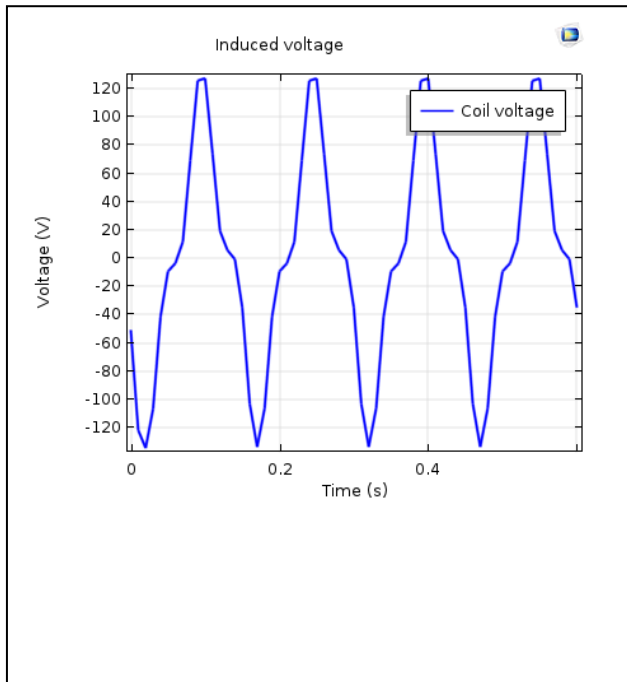
(c)



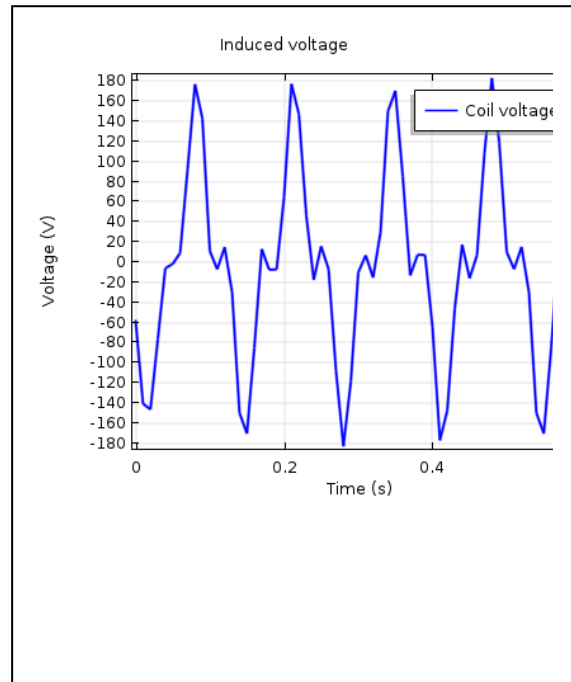
(d)

Figure IV.30 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n = 50, 75, 100$ et 150 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant

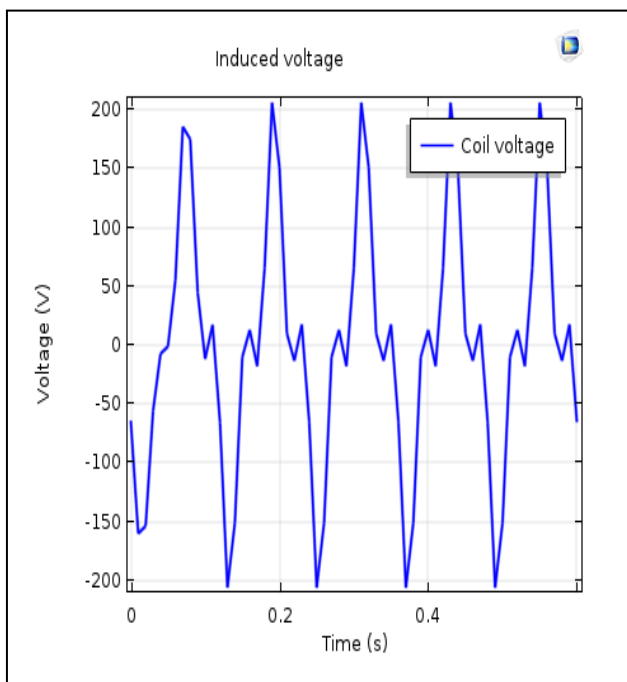
$$i_{exc} = 5A.$$



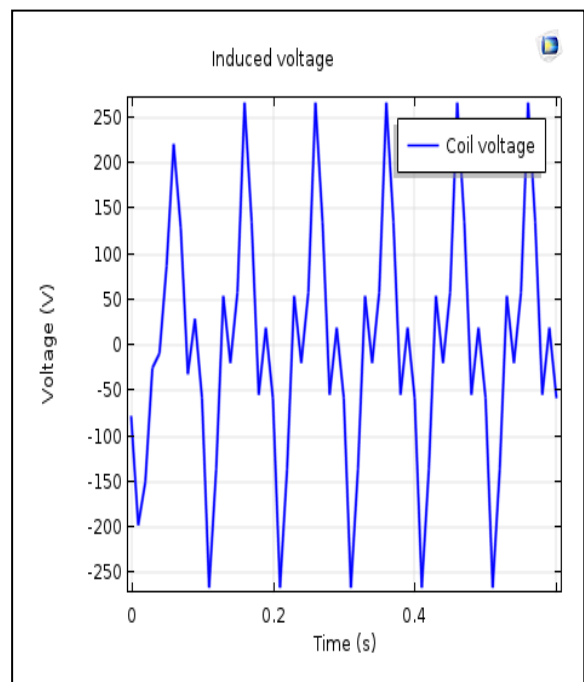
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.31 (a-d) : la force électromotrice induite (f.e.m) pour différent valeurs de vitesse de rotation $n= 200, 225, 250$ et 300 tr/min respectivement avec un courant d'excitation constant $i_{exc} = 5A$.

VI. .5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une génératrice à courant continu. Dans notre étude, nous avons modélisé trois types de génératrice, la première avec un circuit magnétique en 'Steel AISI 4340', la deuxième en ferromagnétique doux (sans pertes) et la troisième en ferromagnétique doux (avec pertes). Pour chaque type de machine, nous avons étudié l'influence de deux paramètres sur la force électromotrice induite, il s'agit de courant d'excitation et la vitesse de rotation. Ces résultats sont obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis. Notre résultats de simulation montre que la force électromotrice augmente avec l'accroissement de courant d'excitation jusqu'à atteindre une valeur constante à cause de la saturation du circuit magnétique. La force électromotrice augmente aussi avec l'accroissement de vitesse de rotation mais l'allure contient un peu des harmoniques. Ceci peut être expliqué par la méthode des éléments finis qui provoque des oscillations dans la modélisation des problèmes avec des vitesses élevés,

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail consiste à modéliser les phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine à courant continu par le logiciel COMSOL Multiphysics, qui est basé sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution de système d'équations aux dérivées partielles caractéristique au problème traité. L'utilisation des machines à courant continu dans plusieurs applications industriel, nous a incités à étudier plus particulièrement la force électromotrice induite. L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine à courant continu par les équations de Maxwell et de couple.
- Les différents résultats obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis pour les trois cas de la machine étudiée.
- La comparaison entre la force électromotrice obtenue pour les trois modèles proposées de la machine étudiée. Pour chaque modèles, nous avons étudié l'influence de deux paramètres sur la force électromotrice, il s'agit de courant d'excitation et la vitesse de rotation

D'après les résultats obtenus, on a remarqué que la force électromotrice augmente avec l'accroissement de courant d'excitation jusqu'à atteindre une valeur constante à cause de la saturation du circuit magnétique. La force électromotrice augmente aussi avec l'accroissement de vitesse de rotation mais l'allure contient un peu des harmoniques. Ceci peut être expliqué par la méthode des éléments finis qui provoque des oscillations dans la modélisation des problèmes avec des vitesses élevés, L'analyse des résultats montre que le bon choix de ces paramètres est d'une importance essentielle, si on veut assurer une meilleure concordance avec les résultats expérimentés.

En perspective, et enfin d'obtenir une vision entière sur la modélisation des machine à courant continu, il serait intéressant de :

- Modéliser un moteur à courant continu par COMSOL-Multiphysics avec l'utilisation des matériaux supraconducteur dans les circuits d'excitation et induit afin d'augmenter la vitesse du moteur.

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Dr. BELHAMDI SAAD : Machines Electriques à Courant Continu et Transformateur
Univ MOHAMED BOUDIAF de M'sila.
- [2] C. CHEVASSU : MACHINES À COURANT CONTINU.Cours et Problèmes, 21
septembre 2014
- [3] B.BAYALA : machines à courant continu, par Edition 2010
- [4] N. DJelid : Modélisation et Commande d'une machine à courant continu, UNIV DE
BATNA, 2012.
- [5] A.HALILA : étude des machines à courant continu, UNIV LAVAL, mai 2001
- [6] P. Maye : Aide-mémoire Électrotechnique, illustrations : Alain et boue veille dunod,
Paris, 2006
- [7] Ch. LABIOD : Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à
Reluctance variable, Univ Mohamed Khider – Biskra, 12/05/2014.
- [8] Y. BELKHIRI : Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques
Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM), UNIV BATNA,
- [9] S. NACEUR : Contribution à la Modélisation 2D d'un Convertisseur
Magnétohydrodynamique (MHD) à Conduction, Univ Batna, 08 /04 /2015.
- [10] D Bouakiz, R Boudjemaa : Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques
D'une Pompe (MHD) A Induction, Univ Ouargla, 2016/2017.
- [11] M Amoumene, I Benras : Modélisation des phénomènes électromagnétiques d'une
Micro pompe magnétohydrodynamique à conduction, Univ Ouargla, 02/06/2016.

[12] M. ADEL Kara : Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement

D'un isolateur pollué, Univ Sétif, 18/12/2013.

[13] S BEN FEDILA : Modélisation par le Logiciel Comsol 5.1 d'une MRV Vernier

Excitée par des Aimants Permanents, Univ Batna, Juin 2017.

[14] M BEN HAMOUDA : étude, conception et modélisation de la diffusion de la

Chaleur dans les tissus biologiques, UNIV QUÉBEC, mars 2015.