

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées  
d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

**Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Traction électrique**

**Thème :**

**Dimensionnement d'une Machine Synchrone à Aimant  
Permanent MSAP pour éolienne domestique de faible puissance**

Présenté par : Hita Yassine  
Et par : Lakehal Amor

Encadré (e) par : Benkraouda Souleyman  
Co-encadré(e) par : Djelloul-khedda Zakarya

Soutenu publiquement, le : 20/06/2023,

Devant le Jury composé de :

M Teffahi Abdelkader  
M Deboucha Abdelhakim  
M Benkraouda Souleyman  
M Djelloul-khedda Zakarya

Président  
Examineur  
Encadreur  
Co-Encadreur

Binôme N° : 02/PFE. /TR/2023

*Dédicaces*

*A la mémoire de mon père*

*A ma mère, que dieu la protégé*

*A mes chers frères et mes chères sœurs*

*A tous mes amis*

*Yassine et Amour*

# REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, on tient à remercier en premier lieu Dieu miséricordieux qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers Mr BENKRAOUDA Souleyman, Docteur de l'Ecole supérieure des sciences Appliquées Alger, pour la confiance qu'il nous a témoignée en acceptant de diriger ce travail. Nous aimerions également lui dire à quel point nous avons apprécié sa grande disponibilité ainsi que ses idées et conseils judicieux apportés tout au long de ce travail. Enfin, nous avons été extrêmement sensibles à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à Mr DJELLOUL KHEDDA Zakarya, co-encadreurs de cette thèse. Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour leur aide, leur disponibilité, leurs encouragements ainsi que leur apport scientifique tout au long de ce travail.

Un grand merci aussi à tous nos camarades, nos amis et toutes les personnes qui ont été à nos côtés et nous ont soutenus d'une façon ou d'une autre. Vous êtes tellement nombreux que vous citer tous serait un trop grand défi. Sachez toutefois que vous êtes tous dans nos pensées.

Nous terminons ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner notre travail.

.

## ملخص

يعرض هذا العمل أبعاد آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم مع مغنطة شعاعية ، بناءً على نهج تحليلي ونهج رقمي باستخدام طريقة العناصر المحدودة. تتكون عملية تحديد الأبعاد من الحصول على جميع الخصائص الهندسية والكهربائية والمغناطيسية اللازمة للآلة بناءً على عدد قليل من معلمات الإدخال. تم تصميم جهازين لنفس المعلمات (طاقة الإخراج ، السرعة ، الكفاءة) ، تم تصميم الجهاز الأول بدون شروط ، والآلة ، والحصول على النماذج الأولية المطلوبة في وقت MATLAB الثانية مصممة بشروط محددة. تم تنفيذ هذا الإجراء بأكمله باستخدام برنامج حساب ومقارنة خصائص الجهازين والتحقق "COMSOL Multiphysics" قصير جداً. يتم استخدام برنامج طريقة العناصر المحدودة كما يسلط الضوء على MSAPS من صحة التصميم. . يسلط هذا العمل الضوء على أهمية تقنيات التصميم والتحجيم المناسبة لتحسين أداء أهمية استخدام أدوات البرمجيات المتقدمة والأساليب العددية لتصميم هذه الآلات بدقة وكفاءة والتحقق من صحتها

## كلمات مفتاحية

طاقة رياح، الآلة ذات المغناطيس الدائمة، تحجيم، طريقة العناصر المحددة، مولد متزامن، خسائر الحديد، قياس حجم ألتنين (واحدة بدون شروط والأخرى بشروط)

## Résumé

Ce mémoire présente le dimensionnement d'une machine synchrone à aimants permanents à aimantation radiale, basée sur une approche analytique et une approche numérique utilisant la méthode des éléments finis. Le processus de dimensionnement consiste à obtenir toutes les caractéristiques géométriques, électriques et magnétiques nécessaires de la machine sur la base de quelques paramètres d'entrée. Deux machines sont conçues pour les mêmes paramètres (puissance de sortie, vitesse, rendement), la première machine est conçue sans condition, et la deuxième machine est conçue avec des conditions spécifiques. Toute cette procédure a été mise en œuvre à l'aide du logiciel MATLAB®, obtenant les prototypes souhaités en très peu de temps. Un logiciel de méthode des éléments finis « COMSOL Multiphysics » est utilisé pour calculer et comparer les caractéristiques des deux machines et valider la conception. . Ce travail souligne l'importance de techniques de conception et de dimensionnement appropriées pour améliorer les performances des MSAP. Il souligne également l'importance d'utiliser des outils logiciels avancés et des méthodes numériques pour concevoir et valider avec précision et efficacité de telles machines.

## Mots clés

L'énergie éolienne, Machine à aimant permanent, dimensionnement, méthode des éléments finis, générateur synchrone, pertes Fer, dimensionnement de deux machines (une sans condition et l'autre avec condition).

## Abstract

This work presents the dimensioning of a permanent magnet synchronous machine with radial magnetization, based on an analytical approach and a numerical approach using the finite element method. The dimensioning process consists of obtaining all the necessary geometric, electrical and magnetic characteristics of the machine based on a few input

parameters. Two machines are designed for the same parameters (output power, speed, efficiency), the first machine is designed without conditions, and the second machine is designed with specific conditions. This whole procedure was implemented using MATLAB® software, obtaining the desired prototypes in a very short time. Finite element method software « COMSOL Multiphysics » is used to calculate and compare the characteristics of the two machines and validate the design. This work highlights the importance of proper design and sizing techniques to improve the performance of MSAPs. It also highlights the importance of using advanced software tools and numerical methods to accurately and efficiently design and validate such machines.

### **Key words**

Wind energy, permanent Magnet synchronous Machine, sizing, finite element method, synchronous generator, iron losses, we did the sizing of two machine (one without condition and the other with condition).

# Liste des figures

## Chapitre 1: Revue de littérature

Figure.1. 1 Evolution de la puissance totale du parc éolien installée dans le monde 2001-2020.....	4
Figure.1. 2 (a) Nouvelles installations éolienne en 2020 (b) Répartition de la nouvelle capacité de production éolienne ajoutée en 2020 .....	4
Figure.1. 3 Nouvelle capacité installée des éoliennes par type (année 2020) .....	5
Figure.1. 4 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne par type (Onshore/ Offshore)	5
Figure.1. 5 Prévision globale de la capacité installée d'énergie éolienne entre 2020-2025.....	7
Figure.1. 6 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie .	8
Figure.1. 7 Eolienne installée en Algérie (Grand Vent) en 1957 [13].	8
Figure.1. 8 Éolienne installée en Algérie en 1953 .....	9
Figure.1. 9 La 1ère ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) .	10
Figure.1. 10 Classification des machines synchrones.	14
Figure.1. 11 machine à aimant permanent.	15
Figure.1. 12 photographie d'un stator.	15
Figure.1. 13 photographie d'un Rotor avec des aimants.	16
Figure.1. 14 courbe de désaimantation.....	16
Figure.1. 15 les alnico.	17
Figure.1. 16 les ferrites.....	18
Figure.1. 17 les Néodyme-Fer-Bore.....	18
Figure.1. 18 les classes d'isolants les plus utilisées .	23
Figure.1. 19 Influence de la température sur la conductivité thermique.....	25

## Chapitre 2: Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents

Figure.2. 1 Dimensions de l'encoche statorique [35].	36
--	----

## Chapitre3 : Résultats et Analyse par la Méthode des Éléments Finis de Générateur Synchrone

Figure.3. 1 Géométrie réduite d'une machine.....	41
Figure.3. 2 Maillage triangulaire de la machine.....	43
Figure.3. 3 Condition aux limites de la géométrie. ....	44
Figure.3.4 Schématisation de la technique d'intégration pour le calcul du couple électromagnétique. ....	45
Figure.3. 6 Caractéristiques de la courbe de perméabilité $\mu_r/B$ du matériau M270-35A. ....	48
Figure.3. 7 Résultats d inductions dans les parties ferromagnétiques rotor et stator des deux machines.....	49
Figure.3. 8 Résultats des lignes du champ dans les parties ferromagnétiques rotor et stator des deux machines. ....	51
Figure.3. 9 Densité de flux radial dans l'entrefer.....	51
Figure.3. 10 Densité de flux tangentielle dans l'entrefer.....	52
Figure.3. 11 Densité de flux radial dans l'entrefer en charge.....	53

Figure.3. 12 Densité de flux tangentielle dans l'entrefer en charge. ....	53
Figure.3. 13 Résultats du flux magnétique pour les deux machines. ....	54
Figure.3. 14 Résultats de la f.é.m. à vide pour les deux machines; (a) : Forme d'onde de la f.é.m. (b) : Espace harmoniques de la f.é.m. induite. ....	56
Figure.3. 15 Résultats du couple de détente pour les deux machines. ....	57
Figure.3. 16 Résultats du couple électromagnétique pour les deux machines. ....	58
Figure.3. 17 Résultats des inductances selfs pour les deux machines. ....	59
Figure.3. 18 Résultats des inductances mutuelles pour les deux machines. ....	59

# Liste des tableaux

## Chapitre 1: Revue de littérature

Tableau.1. 1 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne [W02].	6
Tableau.1. 2 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [19,21].	19
Tableau.1. 3 Températures caractéristiques pour différents types d'aimants [26].	22

## Chapitre 2: Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents

Tableau.2. 1 Valeurs possibles de la pression magnétique tangentielle selon le type de machines.	28
Tableau.2. 2 Caractéristiques de l'aimant utilisé.	32
Tableau.2. 3 Dimensions initiales de l'encoche statorique.	36
Tableau.2. 4 Données initiales des deux machines.	37
Tableau.2. 5 les paramètres et résultats du dimensionnement.	38

## Chapitre3 : Résultats et Analyse par la Méthode des Éléments Finis de Générateur Synchrone

Tableau.3. 1 Résultats du couple électromagnétique pour les deux machines.	58
--	----

# Liste des symboles et acronymes

$\alpha_{PM}$  : Ouverture d'aimant par rapport au pas polaire

$\sigma_{Ftan}$  : Pression magnétique tangentielle

$\alpha_{si}$  : Position angulaire des éléments du stator

$\alpha_{ri}$  : Position angulaire des éléments du rotor

$\delta_{r0}$  : Position angulaire initiale des éléments du rotor

$\delta_{s0}$  : Position angulaire initiale des éléments du stator

$A_{RMS}$  Valeur maximale de la densité du courant linéaire [A/m]

$B_{e1,max}$  Valeur maximale de la densité de flux dans l'entrefer [T]

$\vec{B} (T)$  : Induction magnétique

$B_d$  : Largeur de la dent

$b_1$  : Ouverture de l'encoche statorique

$B_{dapp}$  : Densité de flux dans la dent statorique

$B_\delta$  : Densité de flux dans l'entrefer

$B_r$  : Densité de flux rémanente

$B_{yr}$  : Densité de flux dans la culasse rotorique

$B_{ys}$  : Densité de flux dans la Culasse statorique

$B_{max}$  : Densité de flux rectangulaire dans l'entrefer

$\cos \varphi$  : Facteur de puissance

$\vec{D} (C/m^2)$  : Induction électrique

$D_{ar}$  : Diamètre de l'arbre

$D_s$  : Le diamètre interne du stator

$D_r$  : Diamètre du rotor.

$D_{ri}$  : Diamètre externe du rotor

$D_{se}$  : Diamètre externe du stator

$\vec{E}(V/m)$ : Champ électrique

$e$ : Largeur de l'entrefer

$\rho$ : Densité volumique de charges [ $C/m^3$ ]

$\vec{H}(A/m)$  : Champ magnétique

$h_r$ : Coefficient de convection à l'intérieur du rotor

$h_s$  : Coefficient de convection à l'extérieur du stator

$h_a$  : L'épaisseur de l'aimant

$h_{yr}$ : La hauteur de la culasse rotorique

$h_{tot}$  : Hauteur totale de l'encoche statorique

$h_{ys}$  : Hauteur de la culasse statorique

$\vec{J}(A/m)$  : Densité de courant

$K_{bob}$ : Coefficient de bobinage

$K_d$ : Facteur de distribution

$K_r$ : Facteur de raccourcissement

$K_{cus}$ : Facteur de remplissage en cuivre

$K_c$ : Coefficient de Carter

$l$  : Longueur du rotor.

$m$  : Nombre de phases

$N$  : Nombre de spire en série par phase

$\Omega$  : Vitesse de la machine

$\theta_{PM}$ : Largeur de l'aimant

$\Phi_m$ : Flux créé dans l'entrefer par les aimants permanents

$p$  : Nombre de paires des pôles

$q$  : Le nombre d'encoches par pôle et par phase

$Q$  : Le nombre d'encoches

$S_{cus}$ : Surface totale de la section transversale de cuivre de l'encoche

$S_{cs}$ : Surface d'un conducteur

$S_{slot}$ : Section totale de l'encoche

$\tau_u$ : Pas dentaire

$\tau_p$ : Pas polaire

$\mu_r$ : Perméabilité relative de l'aimant

$\mu_0$ : La perméabilité électrique de l'air

$V_r$ : Volume du rotor

$Z_Q$ : Nombre de conducteurs par encoche

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau (W/m/K).

$A_j$  : Les coefficients sont inconnus.

$V_j$  : sont les fonctions de base.

$B^{(k)}$  : La densité de flux moyenne dans élément triangulaire k.

$n_s$  : est le nombre de secteurs de symétrie de la machine.

$T_{max}$ , respectivement le couple électromagnétique maximum.

$T_{min}$ , respectivement le couple électromagnétique minimum.

$T_{moy}$ , respectivement le couple électromagnétique moyen.

F.é.m. : Force électromotrice

$F_t$  : La force électromagnétique

$T_e$  : Couple électromagnétique.

$\Psi$  : flux propre

$A_z$ : Le potentiel vecteur du champ magnétique

$L_a$ : La Inductance self

$M_{ab}$ : La Inductance mutuelle

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1: Revue de littérature</b> .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Généralités sur l'énergie éolienne .....	3
1.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	3
1.2.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne .....	3
1.2.3 Potentiel éolien en Algérie.....	7
1.2.4 Energie éolienne en Algérie.....	8
1.3 Notions théoriques fondamentales.....	10
1.3.1 Les équations de Maxwell .....	10
1.3.2 Relations entre les grandeurs électromagnétiques.....	13
1.4 La Machine Synchrone.....	13
1.4.1 Définition.....	13
1.4.2 Historique .....	14
1.4.3 Classification des machines synchrones .....	14
1.5 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents .....	15
1.5.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents .....	15
1.5.2 État de l'art de la machine synchrone à aimants permanents .....	16
1.6 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les machines synchrones à aimants permanents .....	16
1.6.1 Les différents types de matériaux pour aimants permanents.....	17
1.7 Structures des inducteurs des machines synchrones à aimants permanents .....	19
1.7.1 Inducteurs à pôles lisses.....	19
1.7.2 Inducteurs à pôles saillants .....	20
1.8 Avantages des machines synchrones à aimants permanents .....	20
1.9 Inconvénients de la MSAP .....	21
1.10 Domaine d'application.....	21
1.11 Effet de la température dans le cas des machines à aimants permanents .....	21
1.11.1 Effet de la température sur les aimants permanents (matériaux durs) .....	21
1.11.2 Effets thermiques sur les isolants d'encoche.....	22
1.11.3 Effets thermiques sur les roulements .....	23
1.12 Modes de transferts de la chaleur dans les machines électriques.....	24

1.12.1	Transfert de chaleur par conduction.....	24
1.12.2	Transfert de chaleur par convection.....	25
1.12.3	Transfert de chaleur par rayonnement.....	25
1.13	Conclusion .....	26
<b>CHAPITRE 2 : Dimensionnement de la Machine Synchrone à Aimants Permanents .....</b>		<b>27</b>
2	Chapitre 2 : Dimensionnement de la Machine Synchrone à Aimants Permanents.....	27
2.1	Introduction .....	27
2.2	Dimensionnement du rotor .....	27
2.2.1	Calcul du volume du rotor .....	27
2.2.2	Calcul du diamètre du rotor .....	29
2.2.3	Calcul de l'épaisseur d'entrefer .....	30
2.2.4	Calcul du facteur de Carter .....	31
2.2.5	Choix des aimants permanents.....	31
2.2.6	Flux créé au niveau de l'entrefer .....	32
2.2.7	Hauteur de la culasse rotorique.....	32
2.2.8	Diamètre externe du rotor .....	33
2.3	Dimensionnement du stator .....	33
2.3.1	Le coefficient de bobinage.....	34
2.3.2	Conception électromagnétique du stator .....	34
2.3.3	Dimensionnement de l'encoche statorique .....	34
2.4	Résultats du dimensionnement .....	37
2.5	Conclusion .....	39
<b>Chapitre3 : Résultats et Analyse par la Méthode des Éléments Finis de Générateur Synchrone</b>		<b>40</b>
3.1	Introduction .....	40
3.2	Géométrie et propriétés des matériaux .....	40
3.3	Formulation des équations du champ en 2D .....	41
3.4	Discretisation par éléments finis.....	42
3.5	Conditions aux limites.....	43
3.6	Calcul du couple électromagnétique.....	44
3.7	Calcul de la force électromotrice induite .....	46
3.7.1	Cahier des charges .....	46
3.7.2	Choix du matériau ferromagnétique pour le rotor et stator .....	47
3.7.3	Les avantages du matériau M270-5A .....	47
3.8	Résultats obtenus par la méthode des éléments finis .....	48
3.8.1	Résultats statiques à vide .....	48
3.9	Densité de flux radial dans l'entrefer à vide .....	51

3.10	Densité de flux radial dans l'entrefer en charge .....	52
3.11	Résultats dynamique .....	54
3.11.1	Résultats du flux magnétique.....	54
3.11.2	Résultats de la force électromotrice f.é.m. ....	55
3.11.3	Résultats du couple de détente .....	56
3.11.4	Résultats du couple électromagnétique .....	57
3.12	Calcul des Inductances Self/Mutuelles .....	58
3.12.1	Résultats des inductances self .....	59
3.12.2	Résultats des inductances mutuelles .....	59
3.13	Conclusion .....	60
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>62</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>63</b>
	<b>Webographie.....</b>	<b>66</b>

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'énergie électrique est indispensable dans notre vie quotidienne. Partout dans le monde, l'électricité a trouvé de nombreuses applications, dans divers domaines de la vie, dans l'industrie, l'agriculture, le transport et les usages domestiques. L'électricité est considérée comme étant une énergie secondaire parce qu'elle provient de sources primaires différentes. En raison des différentes possibilités de conversion, c'est une source d'énergie bien adaptée pour les applications demandées par la consommation. La demande mondiale d'énergie a augmenté à un rythme exponentiel au cours des dernières années. D'une part, la population urbaine a augmenté rapidement tout en exigeant une production d'énergie de plus en plus importante afin de répondre à leurs besoins énergétiques. C'est pour cela que l'énergie électrique doit être exploitée de façon optimale.

Les machines synchrones à aimant permanent ont été utilisées dans de nombreuses applications industrielles parce qu'ils présentent plusieurs caractéristiques intéressantes : rendement élevé, compacité et haute densité de couple. De nombreux auteurs ont conçu des MSAP (moteurs ou générateurs) dans différents domaines : applications automobiles et véhicules hybrides électriques [1], [2], propulsion de navires [3]–[5], éoliennes [6], [7], compresseur [8] et comme moteur de traction [9]. Chaque application nécessite des exigences de machine différentes. Par conséquent, il est nécessaire de développer un processus de conception précis et rapide, non seulement pour calculer des machines spécifiques, géométrie, mais aussi de la dimensionner à partir de quelques variables [10].

L'alternateur est l'élément clés de la centrale éolienne pour la production de l'électricité. Il s'agit d'une machine synchrone qui permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

Notre travail consistera à concevoir un alternateur (générateur) pour une éolienne domestique de faible puissance. La conception se fera à l'aide de la méthode analytique couplée à la méthode numérique. La modélisation se fera sur le logiciel COMSOL et le calcul des dimensions de la machine se fera analytiquement sur le logiciel MATLAB.

Dans le chapitre un, une revue de la littérature des différents éléments qui touche à la conception de l'alternateur éolienne est faite. Ainsi une description de l'énergie éolienne est présentée, les notions théoriques fondamentales sont rappelées et la machine synchrone est décrite et bien définie. Nous verrons aussi les principaux avantages et inconvénients des machines synchrones à aimants permanents par rapport aux autres types de machines électriques tournantes. Enfin, l'influence de la température sera étudiée dans le cas des machines à aimants ainsi que les différents modes de transfert de chaleur.

Dans le deuxième chapitre, la procédure de dimensionnement de la génératrice synchrone à aimants permanents est présentée, et ceci en faisant apparaitre plusieurs paramètres (géométriques, magnétiques et électriques). A partir du cahier des charges, certains de ces paramètres seront déterminés empiriquement en se basant sur des machines déjà faites.

Enfin au chapitre 3, l'ensemble des résultats obtenus à l'aide du logiciel COMSOL sont présentés dans ce chapitre, nous verrons d'abord la géométrie et les propriétés des matériaux, la formulation des équations du champ en 2D, la discrétisation par éléments finis et les conditions aux limites, après nous allons voir comment calculer le couple électromagnétique, la force électromotrice induite et les inductances self/Mutuelles... etc. Nous allons voir aussi les résultats de l'analyse des régimes statiques et dynamiques des deux machines synchrones tels que : l'induction magnétique, les lignes du champ magnétique, couple de détente et couple électromagnétique, f.é.m., les inductances selfs et mutuelles et le flux magnétique).

# **CHAPITRE 1 :**

## Revue de Littérature

## **1 Chapitre 1: Revue de littérature**

### **1.1 Introduction**

L'un des composants les plus importants d'une centrale éolienne est le générateur. Le générateur entraîné par l'éolienne convertit l'énergie mécanique générée par la rotation de l'arbre (du vent) en énergie électrique. L'électricité produite par l'alternateur est montée en haute tension par un transformateur et envoyée au réseau.

La machine synchrone est constituée généralement de deux parties essentielles : un induit fixe appelé stator, formé d'un système d'enroulement triphasé et un inducteur tournant appelé rotor, formant un système de  $p$  paires de pôles, alimenté en continu. Dans les machines synchrones à aimants permanents, les aimants sont situés sur la partie tournante. Concernant son fonctionnement, il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor ; d'où le nom des machines synchrone à aimants permanents(MSAP).

Le dimensionnement d'un alternateur est très complexe et nécessite des connaissances dans différents domaines (électrique, mécanique, etc.), dans ce qui suit on présentera les différents éléments nécessaire à connaître avant de commencer le dimensionnement.

### **1.2 Généralités sur l'énergie éolienne**

#### **1.2.1 Définition de l'énergie éolienne**

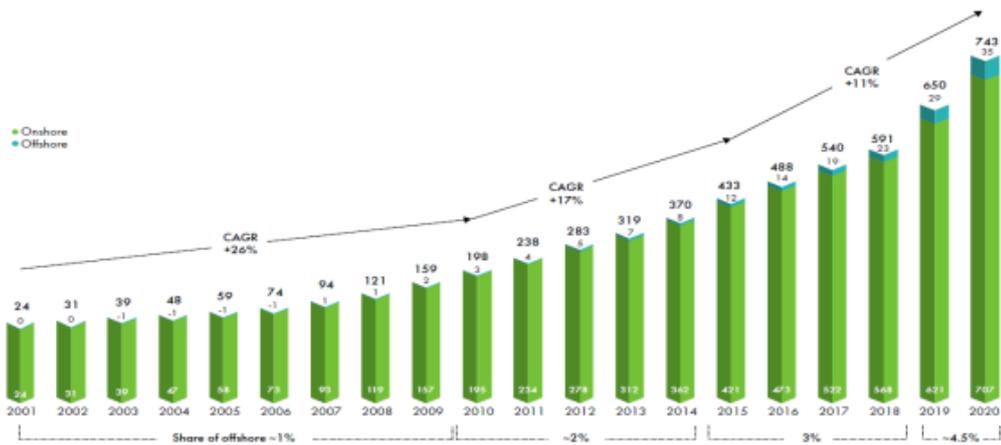
L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe, c'est une forme indirecte de l'énergie calorifique de soleil ; les rayons solaires entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique.

#### **1.2.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne**

Dès le premier choc pétrolier, l'exploitation de l'énergie éolienne a connu pendant environs 23 ans un grand essor sans précédent.

Selon le rapport annuel du Conseil Mondial de l'Energie Eolienne (Global Wind Energy Council GWEC), l'année 2020 a été l'année record pour l'industrie éolienne, 93 (GW) d'éolien de plus avaient été raccordés au réseau. Une telle progression annuelle fulgurante n'a jamais été vue avant 2020. Son meilleur résultat a été réalisé en 2015 avec 63,8 GW ajouté.

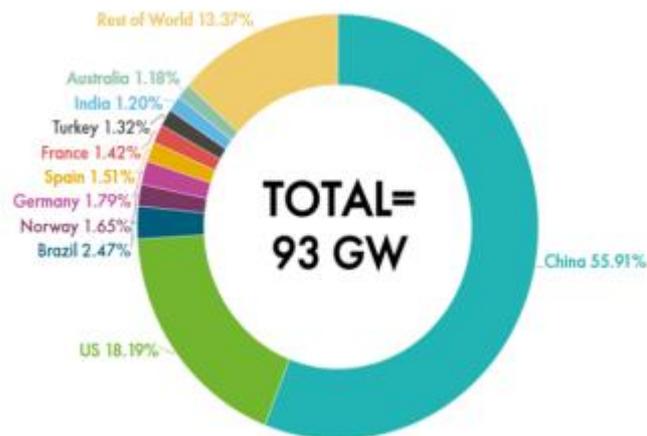
L'année 2020 a vu des nouvelles installations éoliennes dépassant les 90 GW, soit 53 % croissance par rapport à 2019, portant la capacité totale installée à 743 GW, soit une croissance de 14% par rapport à l'année dernière, (figures 1.1 et 1.2).



**Figure.1. 1** Evolution de la puissance totale du parc éolien installée dans le monde 2001- 2020[W01].



(a)



(b)

**Figure.1. 2** (a) Nouvelles installations éolienne en 2020 (b) Répartition de la nouvelle capacité de production éolienne ajoutée en 2020 [W01].

Selon la même source (GWEC), le segment de l'éolien de type "terrestre" ou "onshore", a enregistré une mise en service de 86,9 GW, soit 59 % de plus qu'en 2019, ce qui porte la puissance totale installée de ses capacités à 707,4 GW, tandis que l'éolien de type "marin" ou "offshore" a enregistré 6,1 GW poussant la puissance totale de son parc à 35,3 GW, c'est la seconde meilleure année de l'histoire de ce type.

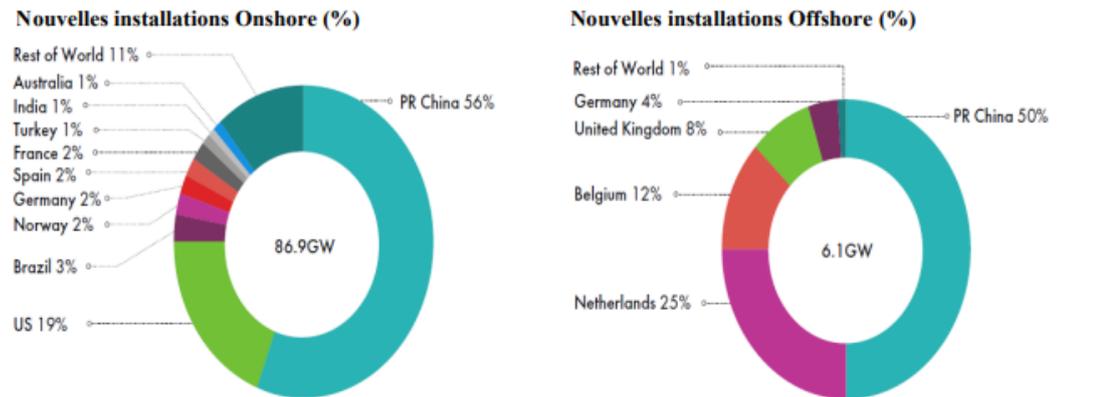


Figure.1. 3 Nouvelle capacité installée des éoliennes par type (année 2020) [W01].

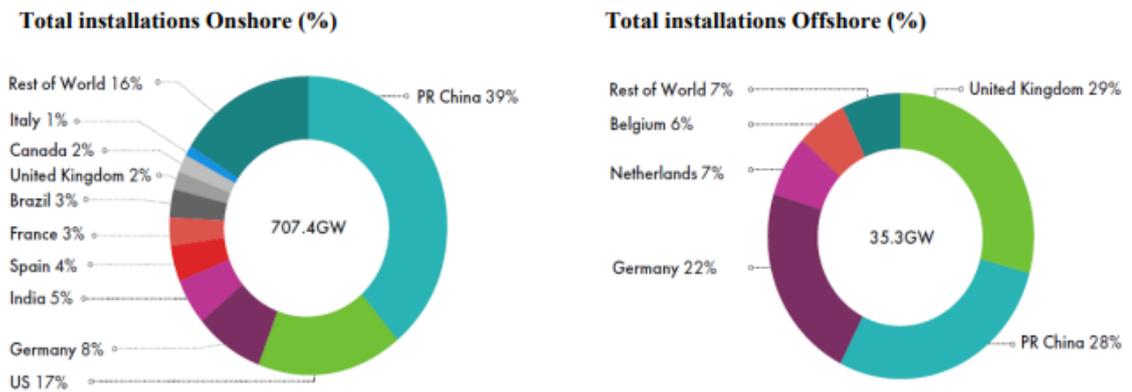


Figure.1. 4 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne par type (Onshore/Offshore) [W01].

On s'aperçoit que l'année 2020 a été principalement marquée par une nouvelle dynamique de l'énergie éolienne. La Chine devance le classement mondial, suivi des États Unis, En troisième et quatrième place on trouve respectivement l'Allemagne et l'Inde avec 62 GW et 38 GW de puissance installée, l'Espagne et le Royaume-Uni sont en cinquième et sixième place. La chine se trouve toujours en tête de classement avec 289 gigawatts, soit 39 % de la capacité mondiale. Le marché américain s'est également développé de manière

extraordinaire et a augmenté de près de 17 gigawatts en 2020 avec un nouveau record et des parcs éoliens totalisant 122 gigawatts, La Chine détient plus du tiers de la puissance mondiale.

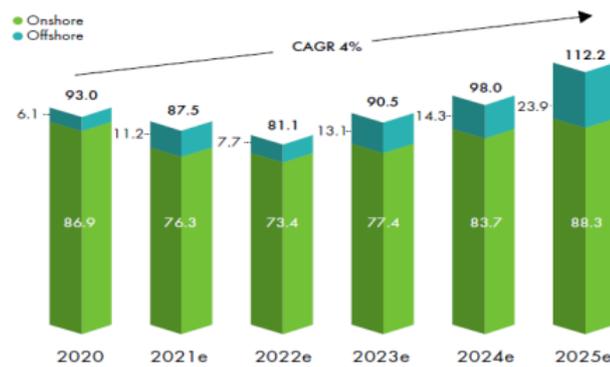
Les dix premiers marchés de l'énergie éolienne n'ont pratiquement pas changé. Le Brésil est passé de la 9e à la 8e position avec un volume de marché fort de 2,5 gigawatts (total : 18 gigawatts), tandis que la France est passée de la 8e à la 7<sup>e</sup> position.

**Tableau.1. 1** Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne [W02].

Le tableau suivant synthétise les pays les plus exploitants d'énergie éolienne, dont deux (02) avec plus de 10 GW installés, et 06 qui ont passé la barre des 1 GW.

<b>Pays /Région</b>	<b>2020</b>	<b>Nouvell es capacités 2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>
<b>Chine</b>	290000	52000	237029	209529
<b>Etats-Unis</b>	122328	16895	105433	96363
<b>Allemagne</b>	62784	1427	61357	59313
<b>Inde</b>	38625	1096	37529	35129
<b>Espagne</b>	27446	1638	25808	23494
<b>Royaume-Uni</b>	24167	652	23515	20743
<b>France</b>	17949	1303	166446	15313
<b>Brésil</b>	18010	2558	15452	14707
<b>Canada</b>	13588	175	13413	12816
<b>Italie</b>	10850	280	10512	9958
<b>Turquie</b>	9305	1249	8056	7369

Selon le taux de croissance des dernières années, le Conseil Mondial de l'Energie Eolienne estime que la production d'énergie éolienne continuera son développement dans les années qui suivent. Les estimations mentionnées dans la figure (1.5) prévoient une capacité mondiale de l'énergie électrique à base du vent de l'ordre de 743 GW éolienne en 2020 et qui peuvent atteindre les 1212.3 GW à l'horizon de l'année 2025, soit 63.16 % de plus qu'en 2020.



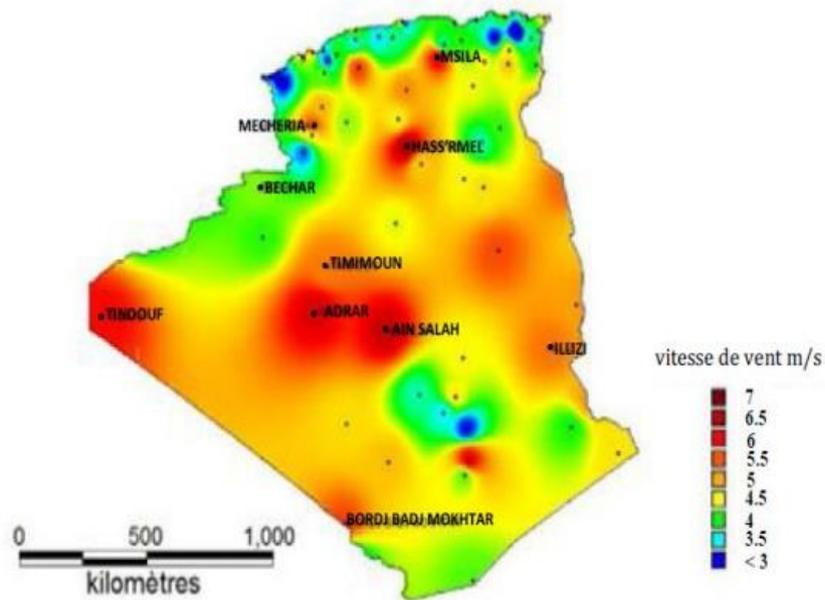
**Figure.1. 5** Prévision globale de la capacité installée d'énergie éolienne entre 2020-2025[W01].

### 1.2.3 Potentiel éolien en Algérie

Malgré le potentiel considérable qui peut être exploité en Algérie pour la production d'énergie électrique à base de l'éolienne, surtout dans le sud où les vitesses de vents peuvent dépasser 6m/s dans la région de Tindouf et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar, la puissance éolienne totale installée reste toujours insignifiante.

Avant toute éventuelle implantation d'un parc éolien, l'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région devient nécessaire comme le cas de l'Algérie qui a été réalisée par le Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, figure (1.6) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent [11]. C'est ce qui a permis d'ailleurs d'identifier huit zones ventées susceptibles d'être de bons endroits de recevoir des installations éoliennes : [11]

- Deux zones sur le littoral.
- Deux zones sur les hauts plateaux.
- Quatre zones en sites sahariens.



**Figure.1. 6** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie [12].

#### 1.2.4 Energie éolienne en Algérie

La première tentative d'utilisation des éoliennes en Algérie remonte à 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Ce prototype de 25 m de diamètre et de 30m de haut (figure 1.8), conçu par l'ingénieur français ANDREAU, avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre [13].

**Fig.1.8** Eolienne installée en Algérie (Grand Vent) en 1957 [13].



**Figure.1. 7** Eolienne installée en Algérie (Grand Vent) en 1957 [13].

Autrefois, durant la période de colonisation française, le service de la colonisation et de l'hydraulique relevant des militaires qui contrôlaient les territoires du sud algérien avait installé en 1953 une autre éolienne constituée d'un mât de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m [14], elle se trouve actuellement à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar.



**Figure.1. 8** Éolienne installée en Algérie en 1953 [15].

En Algérie, l'énergie éolienne constitue un deuxième axe de développement des énergies renouvelables après le solaire, à cet effet, la wilaya d'Adrar a bénéficié à la faveur d'un partenariat Algéro-Français première du genre à l'échelle nationale, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune et d'une puissance cumulée de 10.2MW se trouve dans la région de Kabertene (80 km au nord d'Adrar), ce projet est implanté sur une superficie de 30 hectares et a été mis en service le 8 juin 2014.

Les turbines utilisées dans cet édifice sont à rotor tripale de 52 m de diamètre de type « G52/850/50-60Hz », équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) et fournies par le constructeur espagnol GAMESA.



**Figure.1. 9** La 1ère ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [14].

### 1.3 Notions théoriques fondamentales

#### 1.3.1 Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme. Vers 1865, Maxwell a réalisé une synthèse harmonieuse des diverses lois expérimentales découvertes par ses prédécesseurs (lois de l'électrostatique, du magnétisme, de l'induction...), en les exprimant sous la forme d'un système de quatre équations aux dérivées partielles couplées. [W03]

- **Première équation de Maxwell :**

Cette équation est héritée du théorème de Gauss, qui permet de lier le flux du champ électrique à travers une surface fermée à la charge intérieure à cette surface.

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{\sum Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{DS} = \sum Q_{int} \quad (1.2)$$

D'autre part on a :

$$\sum Q_{int} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (1.3)$$

Dou :

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (1.4)$$

En appliquant le théorème d'Ostrogradski à l'intégrale de gauche on aura :

$$\iiint_v \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (1.5)$$

D'où l'expression de la première équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.6)$$

$\vec{D}$  : Induction électrique [ $C/m^3$ ].

$\sum Q_{int}$  : Charge totale contenue dans le volume [C].

$\epsilon_0$  : Permittivité électrique du vide  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  [F/m].

$dv$  : élément du volume [ $m^3$ ].

$\rho$  : Densité de charge volumique [ $C/m^3$ ].

$ds$  : élément de surface [ $m^2$ ].

- **Deuxième équation de Maxwell :**

Cette équation traduit le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday et complété par Lenz. Une variation de flux d'induction magnétique engendre une force électromotrice qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Sa forme intégrale est :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.7)$$

Sachant que :

$$\phi = \iint_s \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (1.8)$$

$$e = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (1.9)$$

On aura :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt} (\iint_s \vec{B} \cdot \vec{dS}) \quad (1.10)$$

Selon le théorème de Stokes :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \vec{dl} = \oiint_s (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) \cdot \vec{dS} \quad (1.11)$$

D'où la deuxième équation de Maxwell est de la forme :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.12)$$

- **Troisième équation de Maxwell :**

Cette équation traduit le principe de conservation flux magnétique à travers une surface fermée.

D'après la deuxième équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.13)$$

En appliquant la divergence aux deux membres de l'équation on aura :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{\nabla} \cdot \left( -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (1.14)$$

D'où la troisième équation de Maxwell est de la forme

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.15)$$

• **Quatrième équation de Maxwell :**

Cette équation est la généralisation du théorème d'Ampère. Elle relie le champ magnétique à ses sources. Le terme supplémentaire  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  indique qu'un champ électrique variable est source de champ magnétique.

D'après le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (1.16)$$

Selon le théorème de stocks :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad (1.17)$$

Sachant que:

$$\sum I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (1.18)$$

On déduit :

$$\iint_S (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (1.19)$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (1.20)$$

Avec :

$$\vec{j} = \vec{j}_C + \vec{j}_d \quad (1.21)$$

$$\vec{j}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.22)$$

D'où la quatrième équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.23)$$

$\vec{J}_C$  : densité de courant de conduction.

$\vec{J}_d$  : densité de courant de déplacement.

### 1.3.2 Relations entre les grandeurs électromagnétiques

Premièrement la relation entre le champ électrique  $\underline{E}$  et le déplacement électrique  $\underline{D}$ . Dans le cas d'un milieu diélectrique isotrope, linéaire stationnaire et sans perte, on peut écrire pour le modèle continu de la matière :

$$\underline{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \underline{E} = \epsilon \underline{E} \quad (1.24)$$

Deuxièmement la relation entre le champ magnétique  $\underline{H}$  et l'induction magnétique  $\underline{B}$ . Sous les mêmes conditions que ci-dessus, on peut écrire :

$$\underline{B} = \mu_0 \mu_r \underline{H} = \mu \underline{H} \quad (1.25)$$

Enfin, dans les milieux conducteurs, les charges libres qui se déplacent sous l'effet du champ électrique  $\underline{E}$  génèrent une densité de courant  $\underline{J}$ . La loi d'Ohm généralisée permet de lier ces deux grandeurs par la relation suivante:

$$\underline{J} = \sigma \underline{E} \quad (1.26)$$

Les trois relations vectorielles (1.24), (1.25) et (1.26) complètent l'ensemble des équations nécessaires à la résolution des équations de Maxwell.

## 1.4 La Machine Synchrone

### 1.4.1 Définition

Les machines synchrones sont des machines électriques tournantes, convertisseurs d'énergie, réversibles qui peuvent fonctionner en mode moteur ou en mode générateur.

Lorsqu'une machine synchrone fonctionne en génératrice, c'est-à-dire transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique et fournit un courant alternatif, elle est appelée Alternateur. Pour l'alternateur synchrone triphasé, l'énergie électrique est produite sous forme triphasée, ainsi son induit peut être câblé en étoile ou en triangle.

L'alternateur se décline en différentes puissances de quelques kilovolts ampères à 250000 kVA. A ce titre il peut être intégré dans des systèmes embarqués, ainsi que dans des installations de puissance. L'alternateur à pôles saillants est principalement utilisé dans les centrales hydroélectriques, tandis que le turboalternateur (à pôles lisses) dans les centrales thermiques et nucléaires. Ainsi, il est à la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale. Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que Moteurs dans une large gamme de puissance et dont la fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit. En fonctionnement moteur, la machine synchrone transforme de

l'énergie électrique en énergie mécanique, et est utilisé pour entraîner de fortes charges : le TGV Atlantique utilise le moteur synchrone pour se propulser. Le fonctionnement du moteur est de type inductif.

Le moteur synchrone est souvent utilisé comme filtre passif pour le relèvement du cosinus  $\varphi$  en remplacement des condensateurs qui produisent de l'énergie réactive. Il fonctionne à vide. Son fonctionnement est capacitif et est appelé Compensateur synchrone.

### 1.4.2 Historique

La machine synchrone est une invention de Nikola Tesla. Son concept apparaît dans un dépôt de sept brevets du 1er mai 1888 où il en décrit plusieurs variantes ainsi que le principe du courant alternatif biphasé/triphasé et leur distribution. Tesla aurait développé cette idée de la machine électrique quand il était étudiant à l'École polytechnique de Graz (1875-1876) [16].

### 1.4.3 Classification des machines synchrones

Les machines synchrones peuvent être classées selon la nature de leur excitation (bobinage ou aimants permanents) et par leur rapport de saillance qui est donné par [17]:

$$\xi = L_d/L_q \quad (1.27)$$

Où  $L_d$  est l'inductance sur l'axe directe et  $L_q$  est l'inductance sur l'axe en quadrature.

Le classement des machines synchrone est indiqué dans la figure 1.10 [18].

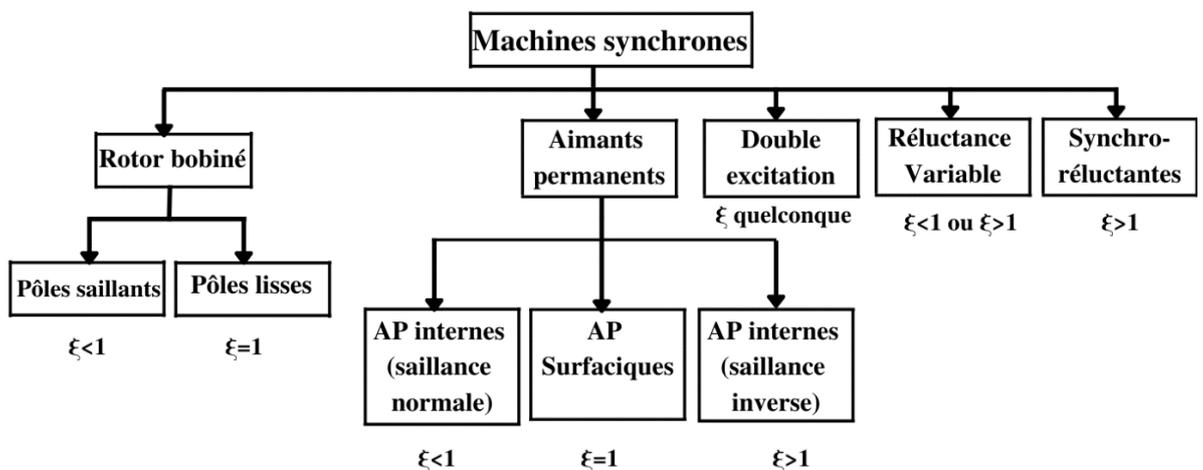


Figure.1. 10 Classification des machines synchrones.

## 1.5 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

### 1.5.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor.



**Figure.1. 11** machine à aimant permanent.

- **Le stator :**

Est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $\frac{2\pi}{3}$



**Figure.1. 12** photographie d'un stator.

- **Le rotor :**

Est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable.



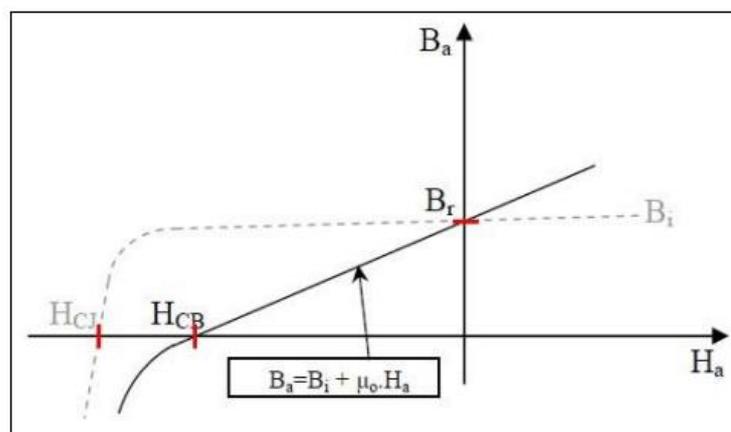
**Figure.1. 13** photographie d'un Rotor avec des aimants.

### 1.5.2 État de l'art de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone est composée généralement de deux parties essentielles : un induit fixe appelé stator, formé d'un système d'enroulement triphasé et un inducteur tournant appelé rotor, formant un système de  $p$  paires de pôles, alimenté en continu. Dans les machines synchrones à aimants permanents, les aimants sont situés sur la partie tournante. Concernant son fonctionnement, il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor ; d'où le nom des machines synchrone à aimants permanents(MSAP).

### 1.6 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les machines synchrones à aimants permanents

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis (voir fig.1.15).



**Figure.1. 14** courbe de désaimantation.

Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants pour les applications industrielles. Ces paramètres sont:

- **L'induction résiduelle (ou rémanente)** : qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer.
- **le champ coercitif** : représentant le champ magnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable.
- **le champ coercitif de polarisation** : qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible.
- **le produit d'énergie (B. H)** : valeur énergétique de l'aimant par unité de volume. En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de Curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

### 1.6.1 Les différents types de matériaux pour aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [19,20]:

- **Les Alnico :**

aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.



**Figure.1. 15** les alnico.

- **Les Ferrites:**

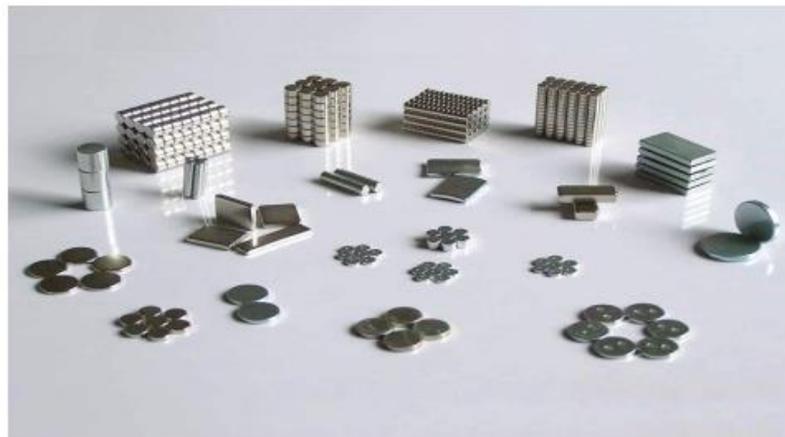
Les aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie – prix.



**Figure.1. 16** les ferrites.

- **Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B) :**

ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160 °C).



**Figure.1. 17** les Néodyme-Fer-Bore.

- **Les alliages métaux – terres rares :**

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium–

cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois

plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé. Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable.

Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau 1.2 ci-dessous.

**Tableau.1. 2** Exemples de propriétés magnétiques des aimants [19,21].

Type D'aimants	Densité d'énergie $(BH)_{max}$ (KJ/m <sup>3</sup> )	Induction rémanente Br (T) a 25°C	Champ coercitif $-H_c$ (KA/m)	Température $T_{max}$ (°C)	Prix (€/Kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co <sub>5</sub>	140-200	1	2000	280	220
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-0.4	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-0.4	170	100-240	4.5

## 1.7 Structures des inducteurs des machines synchrones à aimants permanents

Les différents types de machines synchrones à aimants ne se distinguent que par leurs inducteurs. Les aimants peuvent être montés en surface, insérés ou enfouis dans le fer. Dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est souvent constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

On peut distinguer les machines synchrones à aimants permanents via deux grandes catégories d'inducteurs qui peuvent être à « pôles lisses » ou à « pôles saillants ».

### 1.7.1 Inducteurs à pôles lisses

La majorité des machines synchrones à aimants sont à aimants montés directement sur la surface du rotor. Les aimants sont plaqués sur un noyau magnétique et fixés grâce à des frettes au niveau de l'entrefer. Ces aimants peuvent avoir une aimantation radiale, azimutale ou mixte [22].

Les paramètres qui influent sur les performances de ce type de machines sont le sens de l'aimantation, l'épaisseur de l'aimant, son ouverture sur un pas polaire, l'épaisseur de l'entrefer, le type de matériaux utilisé, le mode d'alimentation adopté et la densité de courant injectée au niveau des encoches statoriques. La distribution de l'induction au niveau de l'entrefer varie fortement suivant le type d'inducteur [23].

### 1.7.2 Inducteurs à pôles saillants

La saillance permet en principe d'augmenter le couple et d'améliorer les performances de la machine tout en réduisant le volume des aimants [23]. On distingue plusieurs catégories d'inducteurs à pôles saillants:

- **Structures à aimants insérés dans l'armature rotorique :**

Les aimants à aimantation radiale sont insérés entre les dents rotoriques et débouchent sur l'entrefer. Ce type de structures, outre la simplicité de sa réalisation, permet d'augmenter le couple tout en diminuant le volume des aimants. Le couple, dans ce cas, est la résultante d'un couple d'interaction et d'un couple de réluctance [23] en dehors du couple de détente.

- **Structures à aimants internes :**

Ce sont des inducteurs à géométrie complexe. Les aimants sont logés à l'intérieur du rotor. Il existe toute une variété de configurations [23]. Ces structures offrent un certain nombre d'avantages parmi lesquels:

- des rotors robustes qui permettent de plus grandes vitesses de rotation.
- Une adaptation à des puissances plus importantes.
- De bonnes performances, selon la littérature, surtout avec les aimants du type NdFeB [22].

### 1.8 Avantages des machines synchrones à aimants permanents

- A puissance nominale, le rendement d'une machine synchrone est élevé par rapport à une machine asynchrone.
- La vitesse d'une machine synchrone demeure rigoureusement constante, même si la tension d'alimentation ou la charge qu'il entraîne subissent des variations.
- Le couple d'une machine synchrone est proportionnel à la tension d'alimentation et non pas au carré de celle-ci, donc cet actionneur peut mieux supporter une baisse temporaire de la tension d'alimentation sans décrocher.
- Contrairement à une machine asynchrone qui est encombrant et coûteux à basses vitesses. L'emploi de la machine synchrone à ces vitesses devient particulièrement avantageux, car, quelle que soit la vitesse, son facteur de puissance avoisinant de l'unité.
- A des vitesses lentes, une machine synchrone est plus légère et moins cher qu'une machine asynchrone de même puissance tournant à la même vitesse.
- Puissance massiques élevée.
- Et augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence du cuivre et de contacts bagues-balais au niveau de l'inducteur dans ces machines.

### **1.9 Inconvénients de la MSAP**

- En contrepartie, lorsque le réseau est exposé à des interruptions de service de très courte durée (de l'ordre d'une seconde), la machine asynchrone peut continuer à fonctionner alors que la machine synchrone décroche et s'arrête, ce qui nécessite une surveillance particulière avec l'utilisation des dispositifs de sécurité.
- Construction plus compliquée de la machine synchrone et par conséquent un prix élevé.

### **1.10 Domaine d'application**

La machine synchrone à aimant est employée dans des nombreuses applications :

- Véhicules électriques routiers.
- Processus d'automatisation.
- Systèmes de sécurité (portails automatiques des garages par exemple).
- Les ascenseurs.
- Les escaliers roulants.
- Actionnement des pistes de décollage pour le contrôle des vols aériens.
- Production de l'énergie électrique.

### **1.11 Effet de la température dans le cas des machines à aimants permanents**

De manière générale, une machine électrique se constitue de plusieurs composants. Selon la nature et la composition de celui-ci, l'effet de la température diffère. Dans cette partie, nous allons voir les effets de la température sur les différents composants sensibles des machines à aimants permanents. Ces composants sensibles du point de vue thermique sont principalement :

- Les isolants.
- Les roulements.
- Les aimants permanents.

#### **1.11.1 Effet de la température sur les aimants permanents (matériaux durs)**

Les aimants permanents (matériaux durs) présentent des cycles d'hystérésis extrêmement larges, ce sont des matériaux qui ne se désaimantent pas facilement. L'application principale des matériaux durs correspond à la fabrication des aimants permanents utilisés dans les moteurs et les génératrices [24].

D'après [25], il y a dépendance des caractéristiques magnétiques de la température. En effet, lors de l'augmentation de la température, il y a diminution de l'induction rémanente pour les quatre types d'aimants. Cette diminution conduit quant à elle à une chute des performances de la machine, ce qui peut provoquer un arrêt de fonctionnement inattendu en raison des risques de désaimantation. Cependant, l'augmentation de la température a pour conséquence d'augmenter le champ coercitif.

**Tableau.1. 3** Températures caractéristiques pour différents types d'aimants [26].

Température	Ferrite	NdFeB	SmCo	AlNiCo
<b>Température de Curie (°C)</b>	450 à 460	310 à 350	700 à 800	740 à 860
<b>Température Maximale (°C)</b>	250 à 300	80 à 200	250 à 350	450 à 540

La température de Curie est définie comme étant la température à laquelle l'aimant perd son aimantation, ce qui veut dire qu'il faut toujours que la machine opère de telle sorte à ce que les aimants permanents n'atteignent jamais cette température. Pour ceci, on définit dans ce tableau la température maximale qui représente la température limite à ne pas dépasser en pratique, selon le type d'aimants.

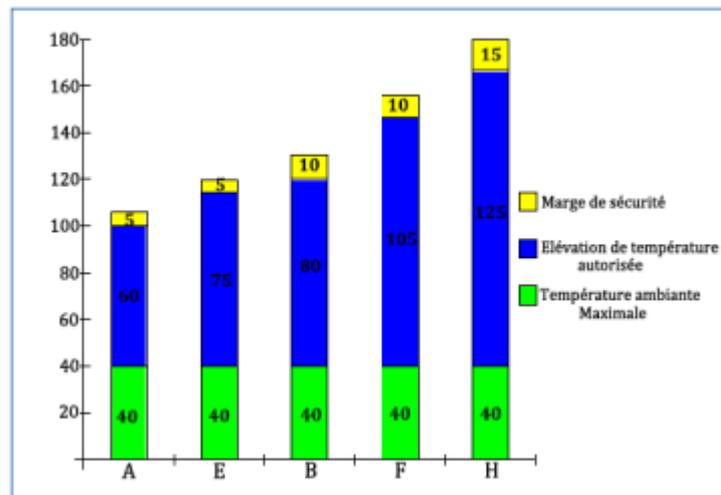
Le choix d'un aimant se fait en se basant sur plusieurs facteurs, à savoir : le rapport des performances magnétiques/coût et la température d'utilisation. Les ferrites et les NdFeB sont les aimants qui présentent le meilleur rapport performances/coût.

Les aimants NdFeB ont la température d'utilisation la plus faible parmi tous les types d'aimants. Les aimants Sm-Co possèdent des performances magnétiques remarquables et ont une bonne tenue en température mais présentent un coût de fabrication le plus élevé. Les performances magnétiques des Alnico sont proches de celles des ferrites avec une induction rémanente plus élevée. Les Alnico sont moins stables que les ferrites car leur champ coercitif est plus faible. Cependant, la température de Curie des Alnico est très élevée ce qui les favorise dans le domaine des hautes températures [27].

### 1.11.2 Effets thermiques sur les isolants d'encoche

C'est généralement le composant le plus sensible à la température dans les machines électriques. Ceci est aussi valable pour l'isolant d'encoche, que pour la cale d'encoche et les séparateurs d'encoche, ces composants sont généralement utilisés à faible épaisseur afin de maximiser le taux de remplissage d'encoche.

Pour les machines électriques standards, les normes de la Commission Électrotechnique Internationale (International Electrotechnical Commission) IEC 85 et IEC 34-1 donne les classes d'isolants les plus utilisées.



**Figure.1. 18** les classes d'isolants les plus utilisées [28].

La température ambiante maximale représente la température maximale du fluide de refroidissement. L'élévation de température autorisée représente la valeur moyenne de l'élévation de la température des enroulements.

La marge de sécurité permet de définir la température maximale du bobinage de la machine. En effet, dépasser cette température en fonctionnement permanent conduirait à un vieillissement rapide de l'isolant et donc de la machine [26].

L'élévation de température dans les isolants conduit à la vaporisation de certains de ces composants, ce qui entraîne une augmentation de la porosité de l'isolant et une diminution de sa résistance. D'un autre côté, l'isolant est aussi soumis à des contraintes thermomécaniques causées par le phénomène de dilatation thermique. Tous ces phénomènes conduisent à un vieillissement rapide de l'isolant et produisent un endommagement prématuré de la machine [26].

### 1.11.3 Effets thermiques sur les roulements

L'effet de la température sur les roulements n'est généralement pas un problème majeur dans les machines électriques. Cependant, dans les applications où ces roulements peuvent être exposés à des températures relativement élevées comme les applications à haute vitesse ou également pour les machines opérant dans un milieu chaud, des effets néfastes peuvent se produire. En effet, à haute vitesse, les pertes dans les roulements deviennent considérables et contribuent à l'échauffement des roulements. Cet échauffement engendre des dilatations et ainsi des modifications dans les dimensions des roulements. Ce changement de dimension peut entraîner une rotation parasite, celle-ci peut représenter une source de vibration, de bruit, d'usure et même d'éraflure, engendrant ainsi une défaillance prématurée du roulement [26].

Tous ces problèmes relevés montrent la nécessité de pouvoir prédire les températures des différentes parties d'une machine lors de sa conception.

## 1.12 Modes de transferts de la chaleur dans les machines électriques

Les machines électriques sont le siège de nombreuses sources de chaleur. On peut distinguer trois principaux modes de diffusion de cette chaleur :

- Transfert de chaleur par conduction
- Transfert de chaleur par convection
- Transfert de chaleur par rayonnement

### 1.12.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur à travers un milieu matériel sans déplacement de matière. Elle est caractérisée par un transfert de chaleur par contact entre particules d'un ou plusieurs solides. Le processus de conduction résulte d'un transfert de chaleur des parties les plus chaudes vers les parties les plus froides. La conduction est le mode de transfert de chaleur prépondérant dans les bobinages.

Ce mode de transfert est régi par la loi de Fourier qui stipule que le vecteur densité de flux thermique est proportionnel à l'opposé du gradient de la température. Dans un matériau isotrope, cette loi s'écrit à l'équilibre thermique comme suit :

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (1.28)$$

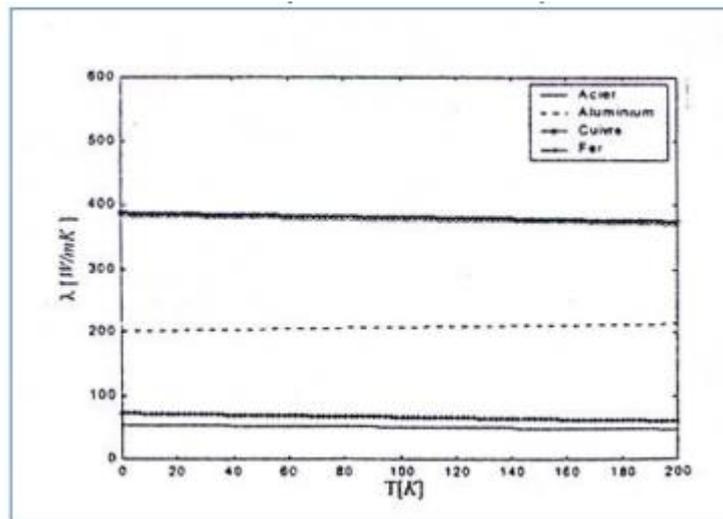
Avec :

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau (W/m/K).

Le signe négatif permet d'être en accord avec le second principe de la thermodynamique qui stipule que l'échange de chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid.

La conductivité thermique est une propriété liée à la structure physico-chimique de la matière, les corps sont donc classés comme conducteurs ou isolants thermiques (solide, liquide ou gaz) suivant sa valeur. En effet, plus cette valeur est importante plus le matériau est bon conducteur de la chaleur. La valeur de la conductivité thermique dépend essentiellement de la nature et l'état du matériau ainsi que de la température. Dans le cas d'un matériau anisotrope, le tenseur est constitué des trois valeurs de conductivité.

Pour les matériaux métalliques, cette grandeur thermique augmente avec la température jusqu'à atteindre son maximum. Cependant, dans le cas des alliages ferreux utilisés dans la construction des machines électriques, l'augmentation de la conductivité thermique avec la température se fait d'une manière faible voir négligeable sur les plages des températures usuelles propres aux machines électriques. Ainsi, pour ces plages de températures, la conductivité thermique peut être considéré constante pour les tôles magnétiques, les alliages d'aluminium ou pour le cuivre comme le montre la figure 1.19



**Figure.1. 19** Influence de la température sur la conductivité thermique.

### 1.12.2 Transfert de chaleur par convection

Contrairement au transfert de chaleur par conduction, le transfert de chaleur par convection se fait par déplacement de la matière par l'intervention d'un fluide. Ce déplacement est principalement dû à des différences de pressions ou de températures. En effet, toute différence de température dans un fluide modifie sa densité ce qui conduit à un mouvement au sein de celui-ci. Il existe deux aspects différents des phénomènes convectifs :

- Convection naturelle: Ce mode de transfert est rencontré essentiellement sur les culasses extérieures des machines.
- Convection forcée : dans ce cas, une vitesse de déplacement est imposée au fluide pour assurer sa circulation.
- Lorsqu'il y a combinaison des deux modes de transferts, on parle alors de convection mixte.

L'échange de chaleur par convection peut être modélisé à l'aide de la relation de Newton qui permet de relier la densité de flux de chaleur à la différence de température entre les deux milieux (fluide et solide) par la relation suivante :

$$q = -h(T_s - T_f) \quad (1.29)$$

- $T_f$  représente la température moyenne du fluide.
- $T_s$  représente la température de paroi du solide.

### 1.12.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques transportant l'énergie émise à la surface d'une substance sans avoir besoin de support matériel. Tout corps (liquide, solide ou gazeux) possédant une température supérieure à 0 K émet et reçoit un rayonnement électromagnétique à sa surface, ce rayonnement entraîne une variation de l'énergie interne de ce corps. De cette variation d'énergie, il en résulte une variation de la température interne (élévation ou diminution).

Dans le cas des machines électriques tournantes, le transfert de chaleur par rayonnement peut être considéré négligeable à l'intérieur. Cependant, l'échange de chaleur peut s'effectuer par radiations quand les surfaces de l'entrefer d'une machine en vis-à-vis du rotor et du stator présentent des différences de température assez importantes [29]. Ce mode de transfert induit le plus souvent des conséquences mineures voir négligeables à l'intérieur des machines électriques.

### **1.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons pu survoler l'ensemble des sujets importants qui concerne notre travail.

Cela commence par une vue d'ensemble de l'éolienne, on a pu voir son fonctionnement et les éléments qui la compose. Ensuite un rappel des notions fondamentales de l'électromagnétisme, on a pu parler des équations de *Maxwell* sous leurs différentes formes et leurs importances dans le domaine de la conception des machines électriques.

Une description générale de la machine synchrone est donnée à la fin de ce chapitre, suivie des avantages, des inconvénients et des domaines d'application de la machine synchrone à aimants permanents. Ensuite, dans le chapitre suivant, nous utiliserons les équations de construction pour concevoir une MSAP (utilisée en mode générateur) pour éolienne domestique.

**CHAPITRE 2 :**  
Dimensionnement de la  
Machine Synchrone à Aimants  
Permanents

## 2 Chapitre 2 : Dimensionnement de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

### 2.1 Introduction

L'un des domaines les plus anciens de l'électrotechnique est le domaine de la construction de machines électriques. En fait, les premières tentatives de construction remontent à la découverte du phénomène d'induction et à la mise en évidence des forces produites par l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants conduits. De ce fait, le domaine de la conception des machines électriques reste aujourd'hui un sujet de grande attention dans les laboratoires de recherche. Le but de cette recherche est toujours d'optimiser et de concevoir de nouvelles machines adaptées aux exigences du marché des différentes applications industrielles. Les propriétés de ces machines conduisent à formuler des méthodes de dimensionnement basées sur des équations prenant en compte divers phénomènes électromagnétiques et conduisent à des définitions globales [30]. Le dimensionnement commence généralement par la définition des paramètres (spécifications) requis par la machine :

- Puissance nominale  $P$  [W]
- Vitesse nominale  $\Omega$  [tr / min]
- Tension nominale  $V$  [V]
- $\cos\varphi$  souhaité
- nombre de phases  $m$
- Rendement de la machine  $\eta$

Dans la conception des machines, il existe un nombre considérable de paramètres libres. Quand on vise une conception optimale de notre machine, la tâche devient extrêmement compliquée à moins que le nombre de ces paramètres libres soit en quelque sorte limité. De nombreux paramètres libres ne varient que légèrement et, par conséquent, simplifient la tâche de conception, ces paramètres peuvent donc être supposés constants. Chaque application nécessite des exigences différentes. Par conséquent, il est nécessaire de développer un processus de conception précis et rapide, non seulement pour calculer la géométrie spécifique d'une machine, mais également pour la dimensionner à partir de quelques variables.

### 2.2 Dimensionnement du rotor

#### 2.2.1 Calcul du volume du rotor

La première étape du dimensionnement de la machine consiste à calculer la taille du rotor, cette taille est liée au couple de la machine et s'obtient par la relation suivante [31] :

$$V_r = \frac{T}{\sqrt{2} A_{RMS} B_{e1,max} K_{w1} \sin(\beta)} \quad (2.1)$$

- $T$  est le couple de la machine

## CHAPITRE 2 : Dimensionnement de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

- $A_{RMS}$  Valeur maximale de la densité du courant linéaire [A/m]
- $B_{e1\_max}$  Valeur maximale de la densité de flux dans l'entrefer [T]
- $K_{w1}$  Coefficient de bobinage
- $\sin(\beta)$  est le décalage angulaire entre les champs produit par aimants et courant de stator

Calcule le couple de la machine la relation suivante :

$$T = \frac{P_u 60}{\Omega 2\pi} \quad (2.2)$$

- $P_u$  La puissance utile [w]
- $\Omega$  Vitesse de rotation [tr/min]

Ces valeurs sont déterminées à partir du tableau suivant [31] :

**Tableau.2. 1** Valeurs possibles de la pression magnétique tangentielle selon le type de machines.

	<b>Machines synchrones à pôles saillants</b>	<b>Machines synchrones à pôles lisses</b>
$A$ [KA /m]	35_65	30_80
$B_\delta$ [T]	0.85_1.05	0.8_1.05
$\sigma_{Ftan}$ [kPa]		
Minimale	21000	17000
Moyenne	33500	36000
Maximale	48000	59500

Une valeur élevée de pression magnétique tangentielle signifie qu'en pratique, la machine doit avoir des aimants à haute rémanence et une valeur de courant élevée, ce qui permet d'avoir la valeur idéale de la densité de courant [32].

### 2.2.2 Calcul du diamètre du rotor

Pour calculer le diamètre du rotor, il faut tout d'abord considérer le rapport suivant :

$$\chi = \frac{l}{D_r} \quad (2.3)$$

Avec

- $l$  : Longueur du rotor.
- $D_r$  : Diamètre du rotor.

Ce rapport est donné par des lois empiriques, il varie selon le type de machine étudiée .pour le cas des machines synchrones avec  $p > 1$ , la relation donnant ce rapport est la suivante :

$$\chi \approx \frac{\pi}{4p} \sqrt{p} \quad (2.4)$$

Sachant que le volume du rotor est donné par  $V_r = \frac{\pi}{4} D_r^2 l$  et à partir de l'équation donnée précédemment, on peut déterminer le diamètre du rotor :

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4V_r}{\chi \cdot \pi}} \quad (2.5)$$

La valeur trouvée peut être modifiée par un degré de liberté considérable. En fait, la modification de la taille du rotor n'a aucun impact sur la nature de la machine, en particulier les caractéristiques des machines à aimant permanentes. Par conséquent, la machine peut avoir un rotor long de long diamètre, ou au contraire. Par rapport à la longueur du rotor, la machine relativement importante peut être plus adaptée aux machines à couple élevé [32].

Le diamètre du rotor étant calculé, on peut alors déterminer sa longueur à partir de l'expression du volume d'un cylindre  $V_r = \frac{\pi}{4} D_r^2 l$  :

$$l = \frac{4V_r}{\pi D_r^2} \quad (2.6)$$

Cette valeur est égale à la longueur de l'empilement du stator  $l_s$ . Cependant, en raison du flux de fuite aux extrémités de l'enroulement du stator, la longueur équivalente du noyau du stator doit être augmentée car ce flux magnétique se produit également dans la production du couple de la machine [32].

Cette longueur est donnée par la relation suivante :

$$l' \approx l_s + 2e \quad (2.7)$$

- $e$  : Epaisseur de l'entrefer.

### 2.2.3 Calcul de l'épaisseur d'entrefer

L'étape suivante consiste à déterminer la largeur de l'entrefer  $e$ . Bien que cette valeur soit d'une grande importance, aucune relation théorique n'a pu être établie pour la détermination d'un optimum. Il y a des suggestions pour la recommandation donnée par la valeur donnée dans [31], Selon cette valeur, la hauteur de l'entrefer de la machine synchrone doit respecter la relation suivante:

$$e \geq \gamma \tau_p \frac{A_a}{B_{emax}} \quad (2.8)$$

Ou :

- $\gamma$  : Coefficient qui tient compte de l'ouverture de l'aimant par rapport au pas polaire, il est compris entre  $(3.0 \div 7.0)10^{-7}$
- $\tau_p$  : Pas polaire
- $A_a$  : Densité de courant linéaire dans l'induit.

Généralement, la longueur de l'entrefer peut être calculée en mètres par des lois empiriques comme étant fonction de la puissance de la machine :

Pour  $P = 1$  on utilise la relation suivante :

$$e = \frac{0.18 + 0.01P^{0.4}}{1000} \text{ m} \quad (2.9)$$

Pour  $P > 1$  on utilise la relation suivante :

$$e = \frac{0.18+0.006P^{0.4}}{1000} m \quad (2.10)$$

#### 2.2.4 Calcul du facteur de Carter

Afin de simplifier les calculs du circuit magnétique de la machine, le facteur de Carter  $K_c$  doit être calculé. Ce facteur prend en compte la diminution de la densité de flux au niveau des ouvertures d'encoches en homogénéisant pratiquement la surface du stator et en augmentant légèrement l'entrefer de sorte qu'un entrefer équivalent soit calculé comme suit :

$$e_c = eK_c \quad (2.11)$$

La loi  $K_c$  est donnée par la relation suivante.

$$K_c = \frac{\tau_u}{\tau_u - Kb_1} \quad (2.12)$$

Avec :

$$K = \frac{\pi}{2} \left[ \operatorname{atan} \left( \frac{b_1}{2e} \right) - \frac{2e}{b_1} \ln \left( \sqrt{1 + \left( \frac{b_1}{2e} \right)^2} \right) \right] \quad (2.13)$$

#### 2.2.5 Choix des aimants permanents

Le choix des aimants permanents n'est pas seulement le choix des matériaux, mais également de dimensions. Il s'agit d'obtenir les meilleures performances de la machine. En effet, l'augmentation du volume des aimants permet de pousser la valeur moyenne de l'induction due aux aimants vers des valeurs importantes, ce qui entraînera l'amélioration de la valeur de couple [32].

Pour les machines triphasées, les ondulations du couple dues aux harmoniques de la f.e.m. peuvent être réduites en sélectionnant des ouvertures d'aimants suffisantes. Par conséquent, Il est possible d'éliminer les harmoniques de rang particulier en ajustant l'ouverture de l'aimant [31].

Dans le cas d'une aimantation radiale et indépendamment du type d'alimentation, le couple moyen généré atteint un optimum à partir d'une ouverture d'aimant égale à 80% du pas polaire. Au-delà de cette ouverture, le couple a très peu changé [33].

Par conséquent, afin de réduire la distorsion harmonique totale, nous choisissons une ouverture d'aimant  $\alpha_{PM}$  de 0,8 du pas polaire afin de supprimer l'harmonique 5 et réduire l'harmonique 7.

$$\alpha_{PM} = \frac{p\theta_{PM}}{\pi} \quad (2.14)$$

- $\alpha_{PM}$  : Largeur de l'aimant.

La structure à aimantation radiale présente un optimum de couple obtenu pour une épaisseur des aimants de l'ordre de 5mm. Pour cette même épaisseur, le taux d'ondulation est minimum.

L'épaisseur de l'aimant  $h_a$  est calculée à l'aide de la densité de flux rémanente  $B_r$ , de la densité de flux de l'entrefer  $B_{max}$  qui sera calculée après, ainsi que de la perméabilité relative de l'aimant  $\mu_r$  selon la relation suivante [37]:

$$B_{max} = \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r \cdot e_c}{h_a}} \quad (2.15)$$

Les aimants permanents choisis pour notre application sont les aimants à terres rares NdFeB, en raison de leurs performances élevées et leur efficacité. Le tableau 2.2.2 présente les caractéristiques magnétiques de ces aimants:

**Tableau.2. 2** Caractéristiques de l'aimant utilisé.

Caractéristique	Valeur
Type d'aimant	NdFeB
Induction rémanente a 20°[T]	1.05
Perméabilité relative	1.05
Largeur de l'aimant $\theta_{PM}$	72°

### 2.2.6 Flux créé au niveau de l'entrefer

Le flux créé dans l'entrefer par les aimants permanents  $\phi_m$  ainsi que le flux traversant une phase  $\phi_{ph}$  sont calculés par :

$$\phi_m = \alpha_{PM} B_{max} \tau_p l_s \quad (2.16)$$

$$\phi_{ph} = N \phi_m \quad (2.17)$$

### 2.2.7 Hauteur de la culasse rotorique

La valeur de la densité de flux dans la culasse rotorique sera  $B_{yr}$  déterminée dans ce qui suit, elle va nous permettre de déterminer la hauteur de la culasse rotorique par la relation suivante :

$$h_{yr} = \frac{\phi_m}{2K_{fe} B_{yr} l} \quad (2.18)$$

- $\phi_m$  : Flux créé au niveau de l'entrefer.
- $B_{yr}$  : Densité de flux dans la culasse rotorique.

### 2.2.8 Diamètre externe du rotor

Connaissant  $h_a$  et  $h_{yr}$ , le diamètre externe du rotor  $D_{ri}$  et le diamètre de l'arbre  $D_{ar}$  sont déterminés à l'aide des expressions suivantes :

$$D_{ri} = D_r - 2h_a \quad (2.19)$$

$$D_{ar} = D_{ri} - 2h_{yr} \quad (2.20)$$

### 2.3 Dimensionnement du stator

Pour le dimensionnement du stator, il est nécessaire de choisir le matériau, le type d'enroulement et de calculer les paramètres géométriques.

Quant au matériau, le choix a été porté sur un matériau laminé M270-35A. Nous calculons le nombre d'encoches, le pas dentaire et le pas polaire à partir des relations suivantes [31]:

$$Q = 2mpq \quad (2.21)$$

$$\tau_p = \frac{\pi D_s}{2p} \quad (2.22)$$

$$\tau_u = \frac{\pi D_s}{Q} \quad (2.23)$$

Le type de bobinage est également très important. Pour les modes de fonctionnement adoptés, différentes possibilités sont envisageables dans le choix du bobinage. Elles sont ajustées par le nombre d'encoches et le nombre de paires de pôles. On peut utiliser des bobines à nombres d'encoches entiers ou fractionnaires.

Dans nos circonstances, le bobinage utilisé est un bobinage à double couches, certaines couches peuvent contenir des conducteurs appartenant à deux phases différentes, ceci présente un petit inconvénient car il nécessite de renforcer l'isolation. Ce type de bobinage permet d'améliorer sensiblement la forme d'onde de la f.é.m.

Le choix du pas de raccourcissement se fait de manière à avoir une courbe de densité de flux dans l'entrefer proche d'une sinusoïde en réduisant les harmoniques les plus nocifs et

pour atteindre le minimum de niveau d'harmoniques. Pour notre machine, nous avons un bobinage avec un pas raccourci de 8/9. [39]

En considérant les ouvertures d'aimants choisies précédemment, le choix de ce raccourcissement permet de diminuer l'amplitude des harmoniques de faible rang. En effet, ce choix réduit l'harmonique 5 et 7 [39]. Le bon choix du raccourcissement permet ainsi de réduire voir éliminer l'harmonique désiré.

### 2.3.1 Le coefficient de bobinage

Le coefficient de bobinage peut être calculé de la manière suivante [34]:

$$K_{bob} = K_d K_r \quad (2.24)$$

- $K_d$  : Facteur de distribution.

$$K_d = \frac{1}{q} \times \frac{\sin(\pi/6)}{\sin(\pi/q6)} \quad (2.25)$$

- $K_r$  : Facteur de raccourcissement.

$$K_r = \sin\left(\frac{8}{9} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.26)$$

La matrice de connexion correspondante qui représente la distribution des enroulements dans les encoches du stator est représentée par :

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -2 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.3.2 Conception électromagnétique du stator

La conception électromagnétique du stator commence à partir de la sélection de la valeur crête de la densité de flux dans l'entrefer  $B_{\delta max}$ .

Pour les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et en tenant compte de la saturation du fer et de la rémanence limitée des aimants, la densité de flux dans l'entrefer est comprise entre 0.8 et 1.1 T.

Dans les MSAP, les aimants sont souvent installés à la surface du rotor. Pour simplifier la fabrication, des aimants permanents rectangulaires sont utilisés dans la construction du rotor.

### 2.3.3 Dimensionnement de l'encoche statorique

Afin de déterminer les dimensions de l'encoche statorique, quelques paramètres doivent être calculés, nous devons d'abord estimer le courant statorique, celui-ci est calculé à partir de la relation suivante [36], [38]:

$$I_s = \frac{p}{mV\eta \cos \varphi} \quad (2.27)$$

Ensuite, la surface totale de la section transversale de cuivre de l'encoche  $S_{cus}$  sera estimée comme suit:

$$S_{cus} = \frac{Z_{Qnew} S_{cs}}{K_{cus}} \quad (2.28)$$

- $K_{cus}$  : est le facteur de remplissage en cuivre qui prend en considération la forme des fils, du niveau de tension ainsi que le matériau d'isolation ( $K_{cus} \in [0.4 - 0.6]$ )
- $S_{cs}$  : est la surface d'un conducteur calculée à partir de la relation suivante :

$$S_{cs} = \frac{I_s}{\alpha J_s} \quad (2.29)$$

- $J_s$ : étant la densité de courant, son choix est limité par les propriétés thermiques de la machine, elle est aussi choisit en fonction de la méthode de refroidissement souhaitée.

À partir de la densité de flux dans la dent, la largeur de la dent  $B_d$  peut être calculée comme suit :

$$B_d = \frac{\tau_u B_{maxnew}}{K_{fe} B_{dapp}} \quad (2.30)$$

- $K_{fe}$  : Facteur de remplissage.

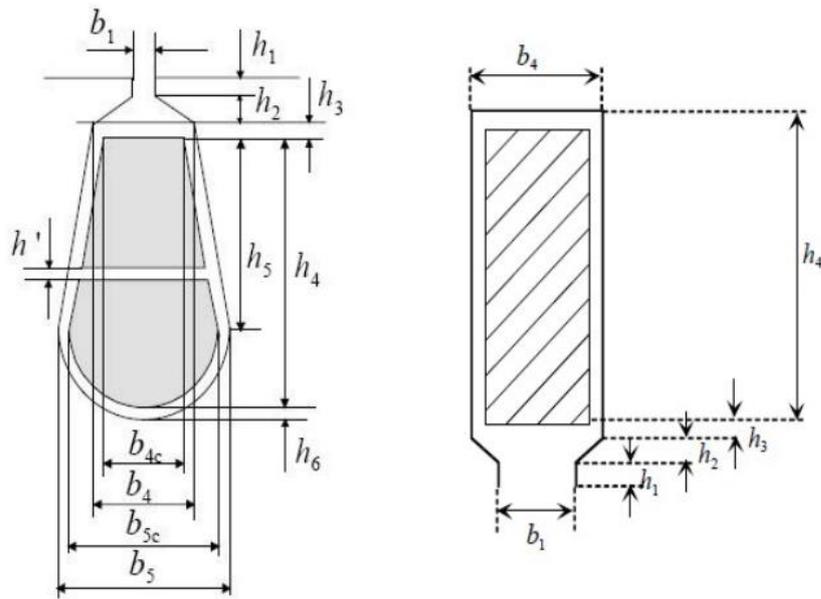
L'ouverture de l'encoche statorique est ensuite calculée par :

$$b_1 = \tau_u - B_d \quad (2.31)$$

On peut ainsi calculer la hauteur de la culasse statorique :

$$h_{ys} = \frac{\phi_m}{2K_{fe} B_{ys} l_s} \quad (2.32)$$

Pour calculer les dimensions des encoches, nous devons tenir compte du volume de cuivre requis, de l'isolation et de l'ouverture des encoches.


**Figure.2. 1** Dimensions de l'encoche statorique [35].

Les dimensions initiales de l'encoche sont décrites dans le tableau 2.3.2. Les autres dimensions sont déterminées comme suit :

$$b_4 = \frac{\pi(D_s + 2(h_1 + h_2))}{Q} - B_d \quad (2.33)$$

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2\pi h_3}{Q} - 2h_6 \quad (2.34)$$

$$\begin{cases} b_{5c} = b_{4c} + \frac{2\pi h_5}{Q} \\ S_{cus} = \left(\frac{b_{4c} + b_{5c}}{2}\right) h_5 + \frac{\pi}{8} b_{5c}^2 \end{cases} \quad (2.35)$$

$$\Rightarrow h_5 = \left(S_{cus} - \frac{\pi}{8} b_{5c}^2\right) \left(\frac{2}{b_{4c} + b_{5c}}\right) \quad (2.36)$$

**Tableau.2. 3** Dimensions initiales de l'encoche statorique.

Dimensions initiales de l'encoche	Valeur [m]
$b_1$	$\tau_u/3$
$h_1$	0.001
$h_2$	0.001
$h_3$	0.0005
$h_6$	0.0005

La hauteur  $h_1 + h_2$  est réservée à la cale de l'encoche.  $h_3$  et  $h_6$  représentent l'isolation entre les conducteurs et la paroi de l'encoche.  $h_4$  est calculé en fonction de la surface totale de la section de cuivre dans l'encoche  $S_{cus}$ .

La hauteur totale de l'encoche est calculée comme suit :

$$h_{tot} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6 \quad (2.37)$$

La section totale de l'encoche est égale à :

$$S_{slot} = b_1 h_1 + h_2 \left( \frac{b_1 + b_4}{2} \right) + h_3 \left( b_4 + \frac{\pi h_3}{Q} \right) + h_5 \left( \frac{b_4 + b_5}{2} \right) + \frac{\pi}{8} b_5^2 \quad (2.38)$$

## 2.4 Résultats du dimensionnement

En raison des difficultés locales de réalisation des résultats géométriques obtenus, la construction de notre générateur présente certaines conditions, ces conditions de fabrication sont le diamètre intérieur du stator et la section totale d'une encoche, ce qui permet d'appliquer une densité de courant linéaire appropriée pour obtenir le bon agencement des conducteurs dans l'encoche.

Les paramètres des données initiales de la conception des deux générateurs sont donnés dans le tableau 2.4.

**Tableau.2. 4** Données initiales des deux machines.

Donnée	Machine 1	Machine 2
Puissance utile $P_u$ [KW]	1.5	1.5
Vitesse de la machine $\Omega$ [tr/min]	1500	1500
Nombre de paires de pôles $p$	2	2
Nombre d'encoches par pole et par phase $q$	3	3
Tension nominale par phase $V$ [V]	220	220
Rendement $\eta$	90%	90%
Facteur de puissance $\cos \varphi$	0.9	0.9
Diamètre interne du stator $D_s$ [mm]	----	82.5

La procédure de dimensionnement a été programmée par Matlab en introduisant les paramètres des deux machines (Tableau 2.5). En raison des difficultés locales de fabrication du produit obtenu résultats géométriques, les dimensions qu'il est possible de fabriquer sont ajoutées aux données initiales. Les conditions de fabrication sont le diamètre intérieur du stator et la totale section transversale d'une fente, ce qui conduit à appliquer une densité de courant linéaire appropriée pour obtenir la bonne disposition des conducteurs dans la fente. Pour mieux comprendre la machine de la conception complète (**sans conditions**) est appelé

## CHAPITRE 2 : Dimensionnement de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

machine 1, la machine de la conception **avec conditions spécifiques** est appelé machine 2. Afin de comparer les performances des deux moteurs, la construction du bobinage, le matériau et les propriétés de l'aimant sont conçus de la même manière.

A l'aide des équations citées précédemment, le tableau 2.5 présente les paramètres et résultats du dimensionnement des deux machines.

**Tableau.2. 5** les paramètres et résultats du dimensionnement.

<b>Paramètres</b>	<b>Machine 1</b>	<b>Machine 2</b>
Diamètre externe du stator [mm]	174.5	138.3
Diamètre interne du stator [mm]	110.7	82.5
Longueur stator/rotor [mm]	62.4/60.4	112/110
Largeur de la dent statorique [mm]	5	3.8
Entrefer [mm]	1	1
Hauteur de la culasse stator/rotor [mm]	20.3/23.4	15.3/17.6
Diamètre externe du rotor [mm]	98.5	70
Diamètre d'arbre [mm]	51.7	34.8
Tension nominale [V]	220	220
Courant nominal [A]	2.8	2.8
Hauteur d'encoche statorique [mm]	11.6	12.6
Surface totale d'encoche [mm <sup>2</sup> ]	58.97	57.48
Epaisseur d'aimant [mm]	5.1	5.25
Nombre de spires en série de la phase	276	204
Nombre de conducteurs par encoche	46	34
Densité de flux rectangulaire dans l'entrefer [T]	0.848	0.8574
Flux créé dans l'entrefer [Wb]	1.016	1.016

La valeur de l'entrefer calculée est égale à 0,3 mm, notre générateur étant un générateur de faible puissance et afin d'éviter les problèmes mécaniques, l'entrefer est fixé à 1 mm.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu les étapes de dimensionnement d'une machine synchrone à aimants permanents montés sur la surface rotorique à partir des équations de construction. Plusieurs variables de géométrie ont été fixées pour tenir compte des contraintes de constructibilité.

Les résultats obtenus dans cette étape seront utilisés dans le calcul par la méthode des éléments finis (FEM) des propriétés électromagnétiques

Les dimensions initiales obtenues à partir d'équations empiriques seront affinées par la méthode analytique qui permet l'étude paramétrique des performances électromagnétiques.

# **CHAPITRE 3 :**

Résultats et Analyse par la  
Méthode des Éléments Finis de  
Générateur Synchrone

### **3 Chapitre3 : Résultats et Analyse par la Méthode des Éléments Finis de Générateur Synchrone**

#### **3.1 Introduction**

Nous nous appuyons sur la méthode des éléments finis pour trouver une solution à des problèmes complexes, car elle est considérée comme la meilleure façon de résoudre des équations aux dérivées partielles.

Dans ce chapitre, nous discutons d'abord de l'ingénierie et des propriétés des matériaux, de la formulation d'équations de champ en 2D bidimensionnelles et de la distinction par éléments finis et conditions aux limites.

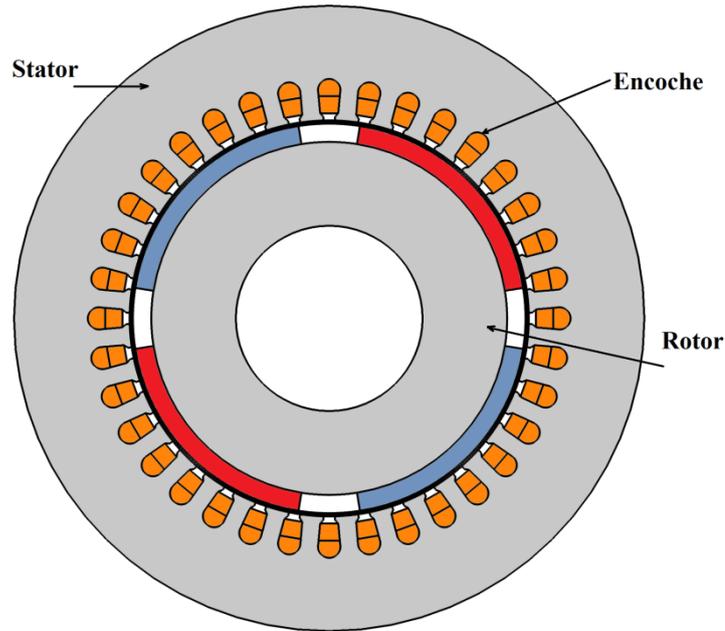
Ensuite, nous passons à la façon de calculer les performances de la machine. Enfin, nous analysons les résultats des systèmes statiques et dynamiques de la machine synchrone, tels que :

L'induction magnétique, les lignes et flux de champ magnétique, le couple d'engrenage, le couple électromagnétique, f.é.m., les inductances propres et mutuelles et le flux magnétique. Nous comparons les résultats des deux appareils dans les sections suivantes :

#### **3.2 Géométrie et propriétés des matériaux**

Nous modélisons les problèmes étudiés en deux dimensions et nous les résolvons de cette façon. Lors du processus de modélisation bidimensionnelle, on voit que la machine est infiniment longue et que ses caractéristiques géométriques ne varient pas selon la direction axiale.

Les conditions de symétrie permettent de simplifier l'analyse du champ magnétique. Grâce au processus d'analyse d'une partie de l'appareil (le circuit magnétique), nous pouvons ensuite généraliser sur l'ensemble de l'appareil. On peut voir sur la figure 3.1 la partie étudiée de la machine.



**Figure.3. 1** Géométrie réduite d'une machine.

Dans la figure 3.1, nous pouvons observer plusieurs régions telles que l'air, le fer et les conducteurs, nous attribuons les propriétés électromagnétiques correspondantes à ces régions, telles que la conductivité électrique et la perméabilité relative  $\mu$ , Nous représentons également les propriétés non linéaires par leur courbe de saturation  $B(H)$ .

### 3.3 Formulation des équations du champ en 2D

Nous déterminons la précision par la loi d'Ampère élément fini à l'aide du logiciel COMSOL En 2D, tel que le potentiel vecteur du champ magnétique n'a qu'une seule composante selon l'axe  $z$ , notée  $A_z$ . La relation de l'équation aux dérivées partielles régissant le champ magnétique dans la section de la machine est donnée par [40] :

Dans les zones conductrices :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) = \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.1)$$

Ailleurs :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Avec :

- Les termes de droite dans les équations (3.1) et (3.2) représentent la densité de courant total.
- Le terme  $\sigma \frac{\partial V}{\partial Z}$  représente la densité de courant appliquée.
- Le terme  $\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t}$  représente la densité de courant induite.

En magnétostatique le membre de droite de L'équation (3.1) est égal a  $-J_z$ , ce qui donne par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) = -J_z \quad (3.3)$$

En dynamique la densité de courant dépend de la nature des zones conductrices et du circuit auquel elles sont couplées. Il est donc nécessaire d'ajouter des équations de couplage.

### 3.4 Discrétisation par éléments finis

Pour résoudre les équations (3.1) et (3.2), un logiciel, utilisant la méthode des éléments finis, reformule la nature du problème sous forme variable, c'est -à- dire qu'au lieu de trouver une fonction  $A_z(x, y, t)$  qui vérifie (3.1) et (3.2), il va plutôt il s agit de trouver une fonction  $A_z(x, y, t)$  (qui est point fixe d'une fonction) qui réduira l'énergie électromagnétique  $\xi$  du système, car tout système physique tend vers l'état d'énergie le plus bas.

L'équation d'énergie électromagnétique  $\xi$  est donnée par la relation suivante [40] :

$$\xi = \iint_S \left( \int_0^B \underline{H} \cdot d\underline{B} - \underline{J} \cdot \underline{A} \right) dS \quad (3.4)$$

La solution de l'équation (3.4) est celle qui minimise l'énergie électromagnétique  $\xi$ .

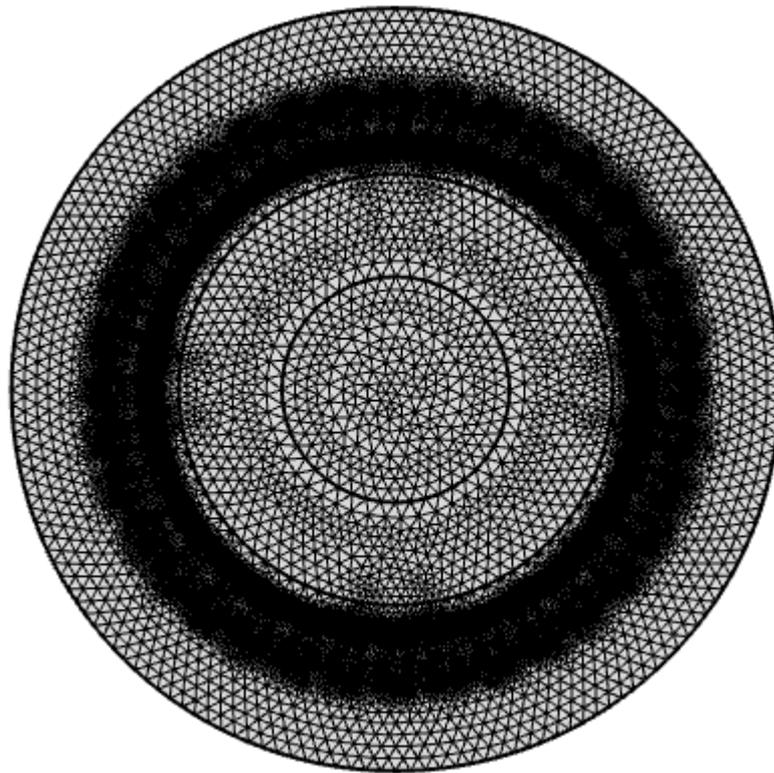
La recherche de cette solution se fait à l'aide d'une fonction test  $A_z^*$  définie par :

$$A_z^*(x, y, t) = \sum_{j=1}^N A_j v_j(x, y, t) \quad (3.5)$$

- $A_j$  : Les coefficients sont inconnus.
- $V_j$  : sont les fonctions de base.

Le principe de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser en plusieurs petits éléments de la géométrie que nous analysons. Ces éléments sont souvent de forme triangulaire, et le corps et les extrémités de ces éléments de réseau sont appelés nœuds (Fig. 3.2).

Lorsque les éléments sont suffisamment petits, les fonctions de base  $V_j$  de l'équation (3.5) peuvent être simplifiées et ne pas entraîner de perte de précision. Les fonctions de base simples, dérivées des polynômes lagrangiens, peuvent également être linéaires ou quadratiques et dépendent des coordonnées spatiales  $X$  et  $Y$ .

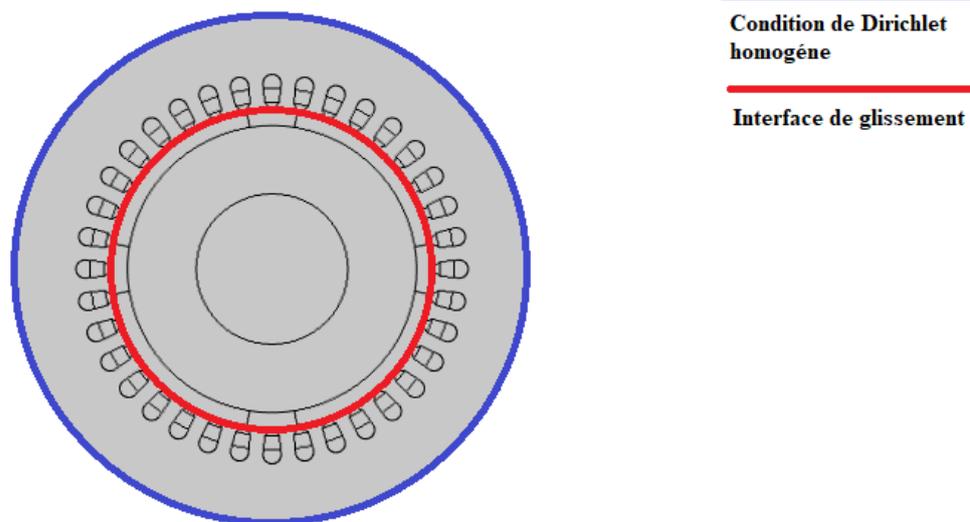


**Figure.3. 2** Maillage triangulaire de la machine.

Les coefficients  $A_j$  représentent les potentiels vecteurs magnétiques au niveau des nœuds du maillage. Pour une solution test  $A_z^*$ , il est possible de ramener le problème à un système d'équations différentielles algébriques, où les potentiels aux nœuds sont les variables inconnues. Ainsi la résolution du problème du champ des équations (3.1) et (3.2) peut se faire à l'aide d'une méthode numérique d'intégration appropriée [41].

### **3.5 Conditions aux limites**

Afin d'avoir une définition complète du problème du champ, des conditions aux limites sont mises au niveau de la géométrie de la machine. Les deux conditions les plus utilisées sont la condition de Dirichlet et la condition de périodicité (voir la figure 3.3).



**Figure.3. 3** Condition aux limites de la géométrie.

- La condition de Dirichlet impose que  $A_z$  soit égal à 0, c'est -à- dire que le matériau au- delà de cette limite a une perméabilité relative nulle.
- La condition de périodicité tire parti du caractère répétitif du champ magnétique dans la machine et permet d'associer les valeurs aux nœuds  $A_z$  situés de part et d'autre des deux frontières.

On peut remarquer à la figure 3.3 la présence d'une condition d'interface de glissement (en rouge) au milieu de l'entrefer. Cette condition est utilisée pour simuler la rotation du rotor, son principe consiste à lier les maillages du rotor et du stator au niveau des nœuds. La détermination des potentiels de ces nœuds se fait par interpolation.

### 3.6 Calcul du couple électromagnétique

Lorsque nous résolvons le problème de champ, nous extrayons certaines grandeurs électromagnétiques telles que le couple électromagnétique et la force électromotrice induite.

Nous calculons le moment électromagnétique dans le programme COMSOL, en utilisant la méthode Maxwell Stress Tensor, et cette méthode est la plus utilisée car elle est simple et rapide. La technique utilisée pour effectuer le calcul en 2D est la méthode des intégrales surfaciques.

Pour calculer le couple, la composante transversale de la force électromagnétique, qui est calculée en intégrant le long de la circonférence fermée entourant l'entrefer (Fig. 3.4), doit d'abord être trouvée par la relation suivante :

$$F_t = \frac{l_{fe}}{\mu_0} \oint_{\Gamma_0} B_n B_t dy \quad (3.6)$$

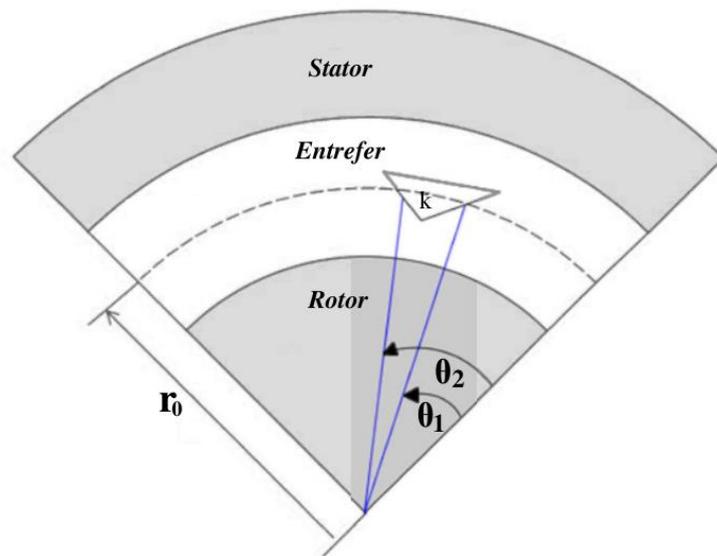
En utilisant les coordonnées polaires :

- $B_r = B_n$
- $B_\theta = B_t$
- $\Gamma_0 = r_0 d\theta$

on peut réécrire (3.6) :

$$F_t = \frac{l_{fe}}{\mu_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_r B_\theta r_0 d\theta \quad (3.7)$$

- Les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  représentent les angles de frontière du modèle (figure 3.4).



**Figure.3. 4** Schématisation de la technique d'intégration pour le calcul du couple électromagnétique.

Dans le champ électromagnétique bidimensionnel, le couple est généré à l'entrefer par la composante tangentielle de la force, on a donc :

$$T_e = r_0 \times F_t = \frac{l_{fe}}{\mu_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r_0^2 B_r B_\theta d\theta \quad (3.8)$$

Le chemin d'intégration étant circulaire, le rayon constant peut émerger de l'intégrale dans la relation (3.8), et compte tenu du nombre de pôles de la machine, on obtient l'expression suivante du couple par rapport a ;

$$T_e = \frac{2pl_{fe}r_0^2}{\mu_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_r B_\theta d\theta \quad (3.9)$$

Si le long du chemin d'intégration est composé de  $N_e$  éléments triangulaires, alors (3.9) peut-être exprimé comme suit :

$$T_e = \frac{2pl_{fe}r_0^2}{\mu_0} \sum_{k=1}^{N_e} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_r^{(k)} B_\theta^{(k)} d\theta \quad (3.10)$$

- $B^{(k)}$  : La densité de flux moyenne dans élément triangulaire k.

### 3.7 Calcul de la force électromotrice induite

La f.é.m. induite dans un enroulement est calculée à partir du flux propre  $\Psi$  selon l'équation :

$$E_m = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (3.11)$$

Le flux propre du bobinage d'une machine est calculé à partir de la solution du champ bidimensionnel par :

$$\Psi = n_s l_{fe} \left( \sum_{n=1}^{N^+} \frac{\iint_{S_{en}} \frac{\partial A_z^+}{\partial t} dS}{\iint_{S_{en}} dS} - \sum_{n=1}^{N^-} \frac{\iint_{S_{en}} \frac{\partial A_z^-}{\partial t} dS}{\iint_{S_{en}} dS} \right) \quad (3.12)$$

- Si tous les conducteurs ont la même section  $S_{cu} = \iint_{S_{en}} dS$ , on peut alors réécrire

(2.13) comme suit :

$$\Psi = \frac{n_s l_{fe}}{S_{cu}} \left( \sum_{n=1}^{N^+} \iint_{S_{en}} \frac{\partial A_z^+}{\partial t} dS - \sum_{n=1}^{N^-} \iint_{S_{en}} \frac{\partial A_z^-}{\partial t} dS \right) \quad (3.13)$$

- $n_s$  est le nombre de secteurs de symétrie de la machine.
- $N^+$  et  $N^-$  indiquent le nombre de conducteurs du bobinage orientés positivement et négativement, respectivement.

#### 3.7.1 Cahier des charges

Le cahier des charges est déterminé à partir des données des deux machines synchrones à aimants permanents :

- Le tableau 2.4 nous donne les spécifications des deux machines à concevoir

- Le tableau 2.5 représente les informations dimensions et les résultats pour les deux machines

### 3.7.2 Choix du matériau ferromagnétique pour le rotor et stator

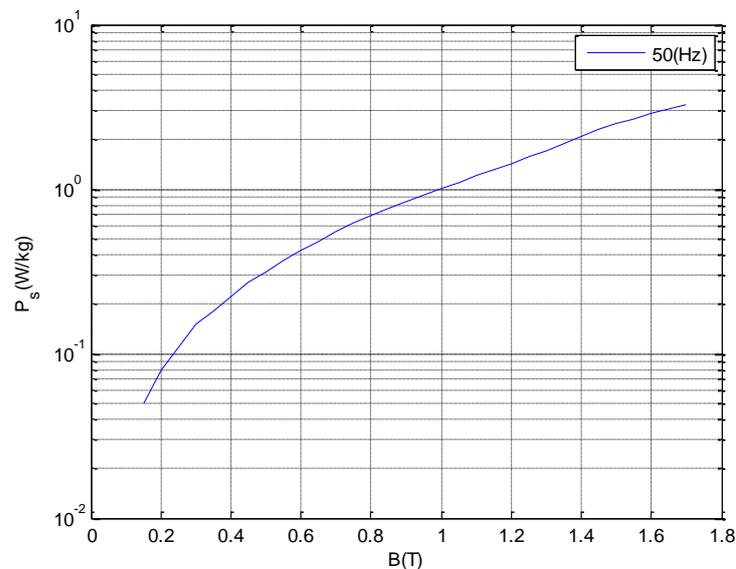
Les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par des informations de perméabilité (Fig.3.6) qui dépendent de l'intensité du champ magnétique (Fig.3.5b). Ensuite, nous parlons de médias non linéaires.

Il faut tenir compte des matériaux composant la machine. Nous pouvons également choisir en fonction de critères de cout ou d'un accord avec le client. La non- linéarité des matériaux se voit à travers leur courbe d aimantation. Il est également nécessaire de pouvoir évaluer les pertes magnétiques dans le stator. Pour ce faire, un modèle est utilisé pour déterminer la courbe (induction – pertes fer / Kg) fournie par le fabricant de plaques, voir (Fig. 3.5a). Nous intégrons ce modèle dans le modèle analytique.

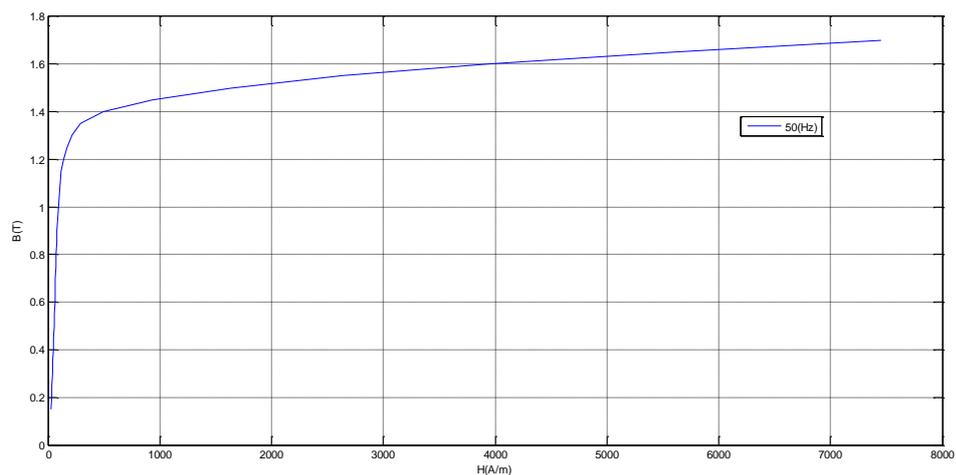
Le matériau utilisé est du M270-35A le même pour le rotor et le stator, un acier électrique de la plus haute qualité, sa densité est de  $7680 \text{ Kg/m}^3$ .

### 3.7.3 Les avantages du matériau M270-5A

- Meilleure aptitude au traitement grâce à des propriétés mécaniques constantes et des surfaces homogènes et propres.
- Excellente capacité d'empilage résultant d'une grande précision dimensionnelle dans le sens du laminage et perpendiculairement au sens du laminage (tolérance d'épaisseur).
- Systèmes innovants d'isolation électrique en acier à la demande.

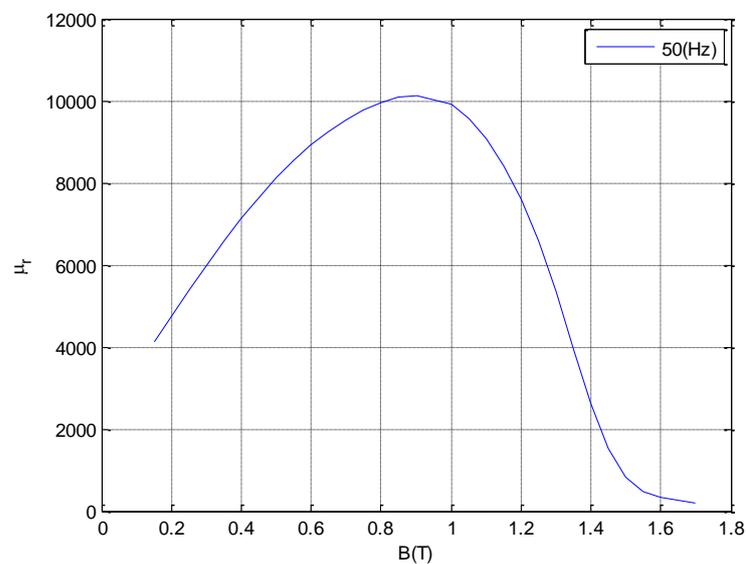


(a)



(b)

**Figure 3. 5 (a) :** caractéristiques de la courbe de perte  $P_s/B$  **(b) :** la courbe d aimantations caractéristiques  $B/H$ .



**Figure.3. 5** Caractéristiques de la courbe de perméabilité  $\mu_r/B$  du matériau M270-35A.

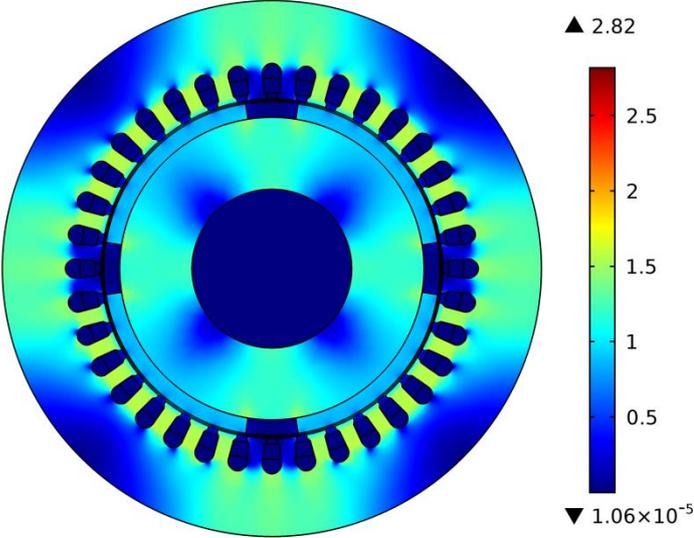
### 3.8 Résultats obtenus par la méthode des éléments finis

#### 3.8.1 Résultats statiques à vide

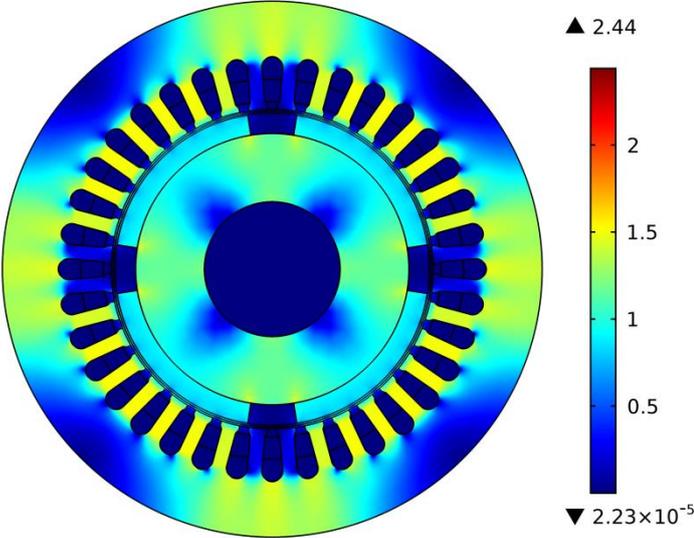
Nous observons la distribution de densité de flux à vide des deux machines étudiées sur la Fig. (3.7) et la fig. (3.8). On peut voir la distribution de densité de flux et les lignes de flux vides dans le dispositif dans toutes les parties actives.

- **Résultats d'induction des zones ferromagnétiques**

Nous montrons l'induction magnétique produite par la réaction d induit dans les figures (3.7).



(a) Machine 1



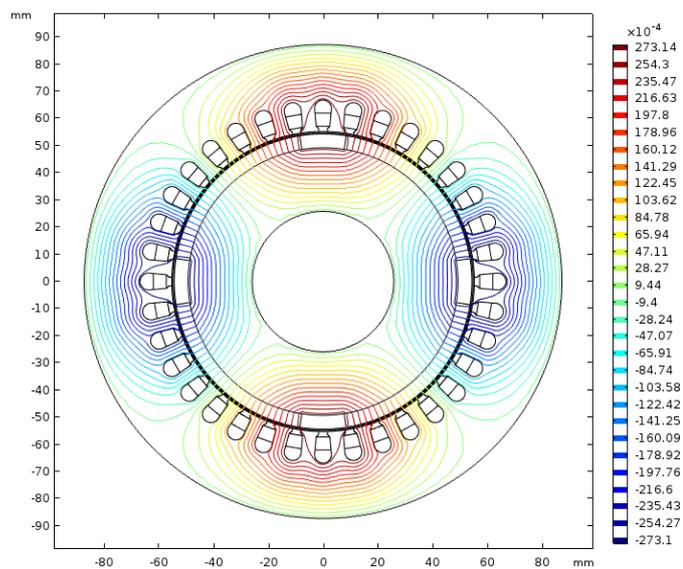
(b) Machine 2

**Figure.3. 6** Résultats d inductions dans les parties ferromagnétiques rotor et stator des deux machines.

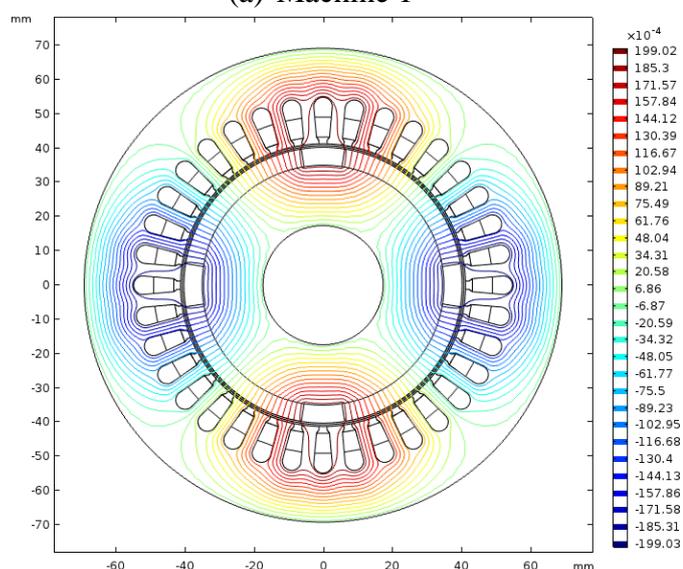
Les figures 3.7 et 3.8 illustrent la répartition de la densité de flux à vide des deux machines étudiées. En examinant les figures, on peut observer la distribution de densité de flux ainsi que les lignes de flux à vide dans les parties actives des machines. Cela peut fournir des informations précieuses sur la manière dont les machines fonctionnent et comment la densité de flux est répartie dans différentes parties des machines. Il est important de bien comprendre la répartition de la densité de flux pour optimiser les performances des machines et minimiser les pertes d'énergie. En utilisant ces informations, il est possible de concevoir des machines plus efficaces et améliorer les performances des machines existantes.

- **Résultats des lignes de champ magnétique**

Les lignes du champ magnétique produit par la réaction d'induit sont présentées aux figures (3.8).



(a) Machine 1



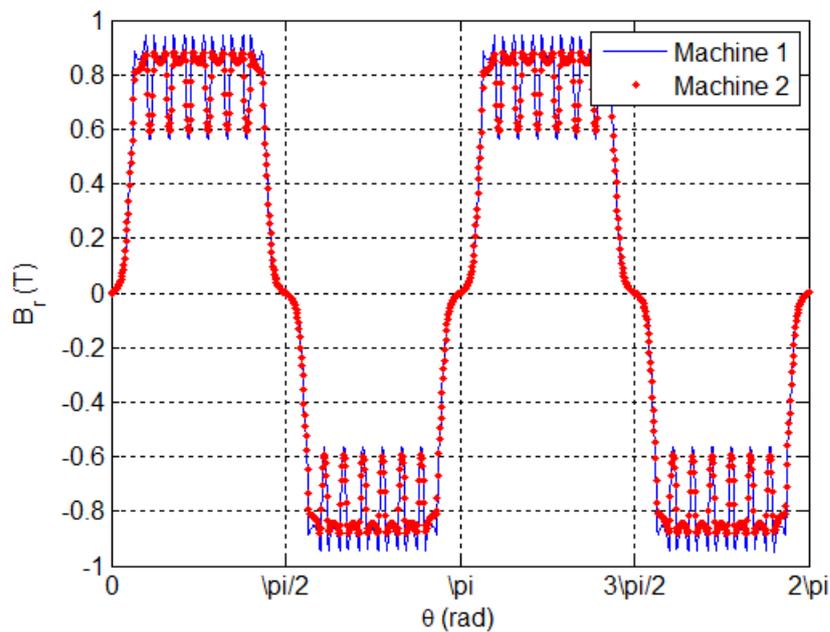
(b) Machine 2

**Figure.3. 7** Résultats des lignes du champ dans les parties ferromagnétiques rotor et stator des deux machines.

Les figures ci- dessous nous montrent la distribution des composantes radiales et tangentielles de densité de flux dues aux aimants (stéréoscopiques). A partir de la forme d'onde, nous pouvons voir la composante radiale de sa densité de flux qui est de forme rectangulaire comme la largeur d'un aimant permanent. Cependant, en raison de l'ouverture des écoutes, il y a des changements autour des zones immédiatement en dessous. Ainsi, les encoches du stator entraînent une diminution de l'amplitude de la composante radiale. De plus, on remarque que la densité de flux radial de la machine 1 est légèrement supérieure à celle de la machine 2.

- **Commentaire :** Les fentes du stator réduisent l'amplitude de la composante radiale. De plus, on remarque que la densité de flux radial de la machine 1 est légèrement supérieure à celle de la machine 2.

### 3.9 Densité de flux radial dans l'entrefer à vide



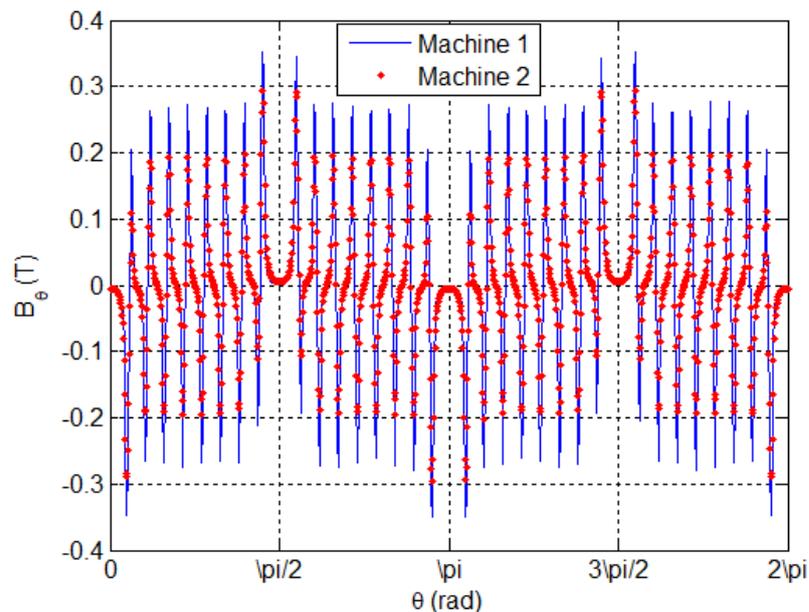
**Figure.3. 8** Densité de flux radial dans l'entrefer.

La figure en haut nous montre les formes d'onde radiales de densité de flux pour le rayon moyen de l'entrefer des deux machines, qui sont identiques. La densité de flux maximale est de 0.9 Tesla avec une moyenne de 0.85 Tesla. D'après l'équation (2.15), l'amplitude estimée de la densité de flux rectangulaire est proportionnelle à la f.é.m. calculée. 0.84 Tesla pour les deux machines (Tableau 2.5). La figure ci- dessous nous montre la densité de flux tangentielle dans l'entrefer, et nous notons que la densité de flux maximal est de 0.35 Tesla, et cette dernière est considérée comme une valeur faible par rapport à la composante radiale et cela est dû au passage du flux magnétique dans l'entrefer (entre la partie mobile et

la partie fixe), par conséquent, la majorité du flux magnétique doit être dans ce chemin d'écoulement est dans la direction normale (radiale).

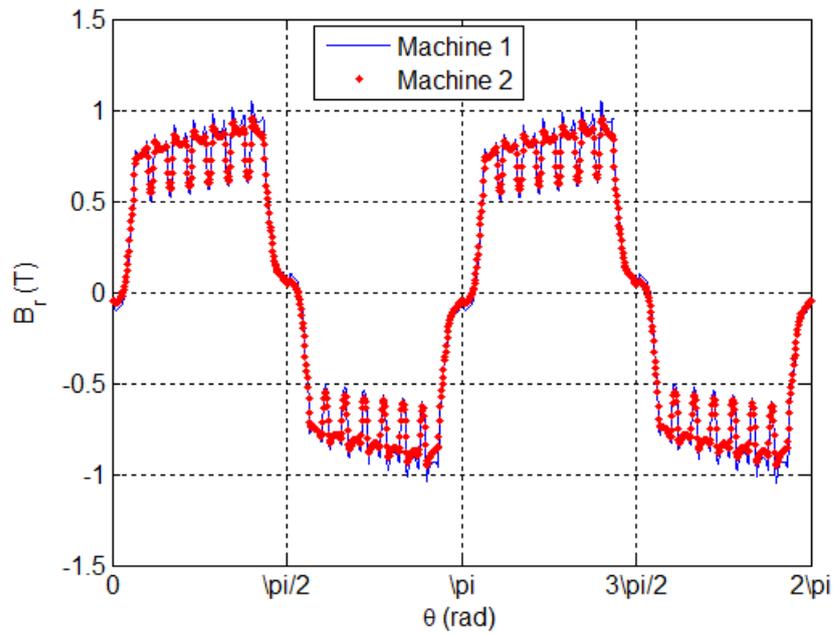
**Commentaire :**

- Les formes d'onde radiales de densité de flux du rayon moyen de l'entrefer pour les deux machines sont les mêmes que la densité de flux maximale de 0.9 Tesla avec une moyenne de 0.8 Tesla.
- L'amplitude de l'estimateur rectangulaire de densité de flux est proportionnelle à la f.é.m. calculée de 0.84 Tesla est la même pour les deux machines.
- L'intensité du flux tangentiel dans l'entrefer maximal est estimée à 0.35 Tesla, et cette valeur est considérée comme faible par rapport à la composante radiale en raison du passage du flux magnétique dans l'entrefer.

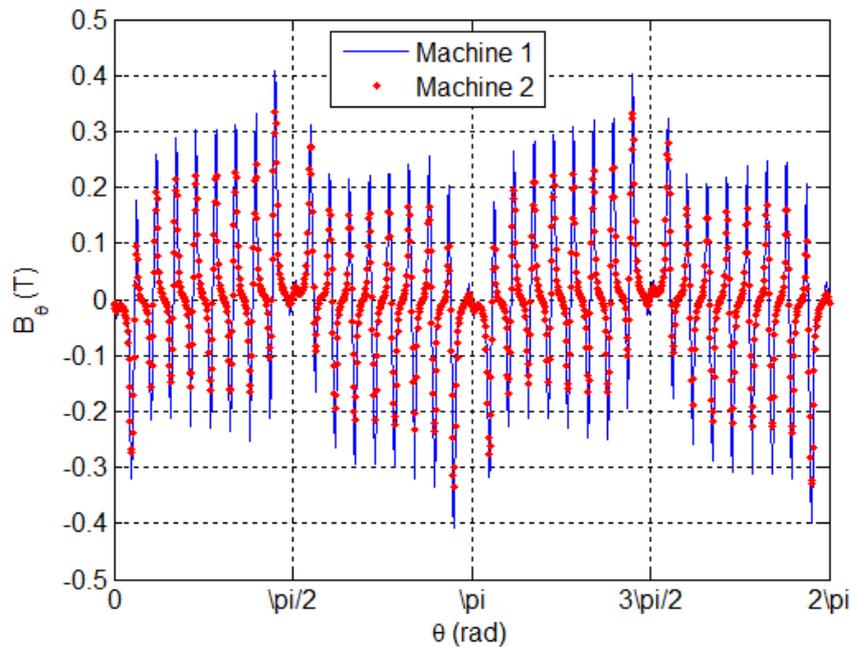


**Figure.3. 9** Densité de flux tangentielle dans l'entrefer.

**3.10 Densité de flux radial dans l'entrefer en charge**



**Figure.3. 10** Densité de flux radial dans l'entrefer en charge.



**Figure.3. 11** Densité de flux tangentielle dans l'entrefer en charge.

A travers la fig.3.11 et la fig.3.12 on constate que les composantes radiale et tangentielle de la densité de flux subissent des déformations dues à la présence des courants statoriques. Comme le montre les figures 3.11 et 3.12, on remarque un changement de forme d'onde de densité de flux et est devenue non sinusoïdale, elle subit une distorsion importante en raison des harmoniques générées par les courants de stator. Cette distorsion entraîne divers problèmes tels que l'ondulation du couple, des pertes accrues et une efficacité réduite.

### 3.11 Résultats dynamique

#### 3.11.1 Résultats du flux magnétique

Lors du calcul du débit à travers la bobine, il dépend du potentiel vectoriel sur la section transversale, Grâce au vecteur, la différence de potentiel entre deux points de bobine est obtenue [42]. Une comparaison des résultats numériques du flux magnétique des deux machines est suggérée dans la figure 3.13, L'importance de calculs précis pour assurer des performances et une efficacité optimales des machines électriques est mise en évidence dans cette comparaison.

La valeur de simulation maximale pour la machine 1 est 0.91 watt et pour la machine 2, elle est de 0.88 watt, ce qui est illustré à la figure 3.13, tandis que nous avons trouvé que la valeur calculée était de 1.01 watt. Il convient de noter que le calcul du débit à travers une bobine est un processus complexe qui implique la prise en compte de plusieurs facteurs, notamment la géométrie de la bobine, la taille et la direction du courant qui la traverse et les propriétés des matériaux environnants.

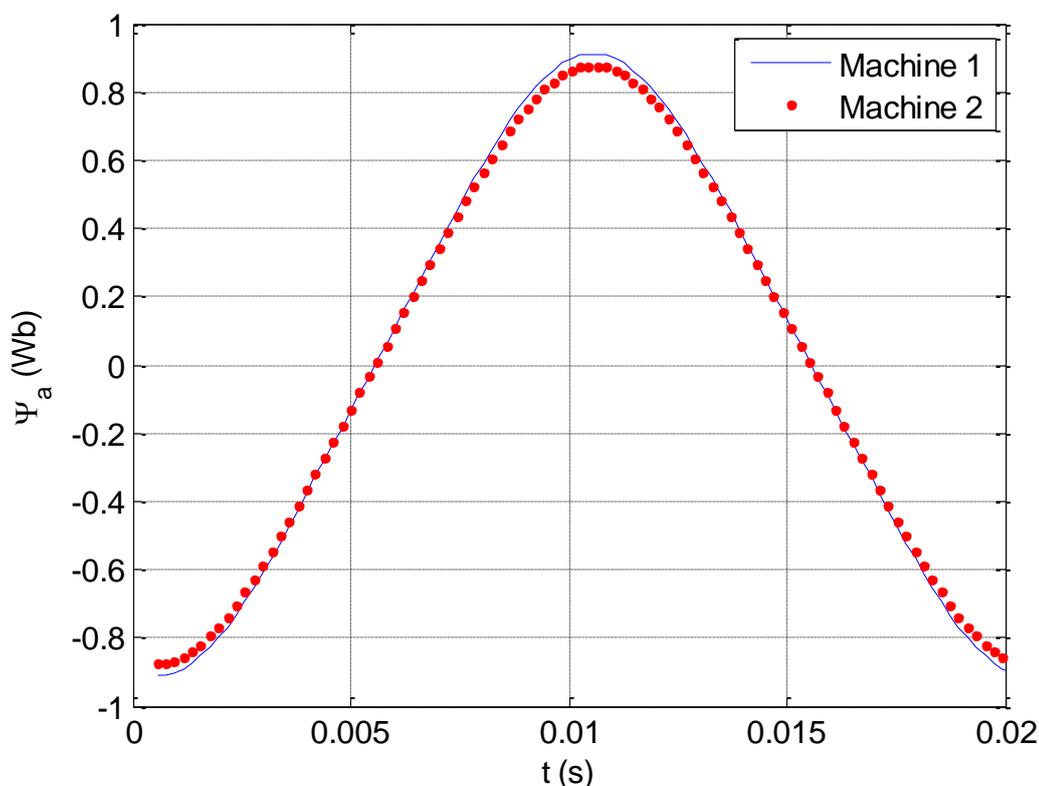


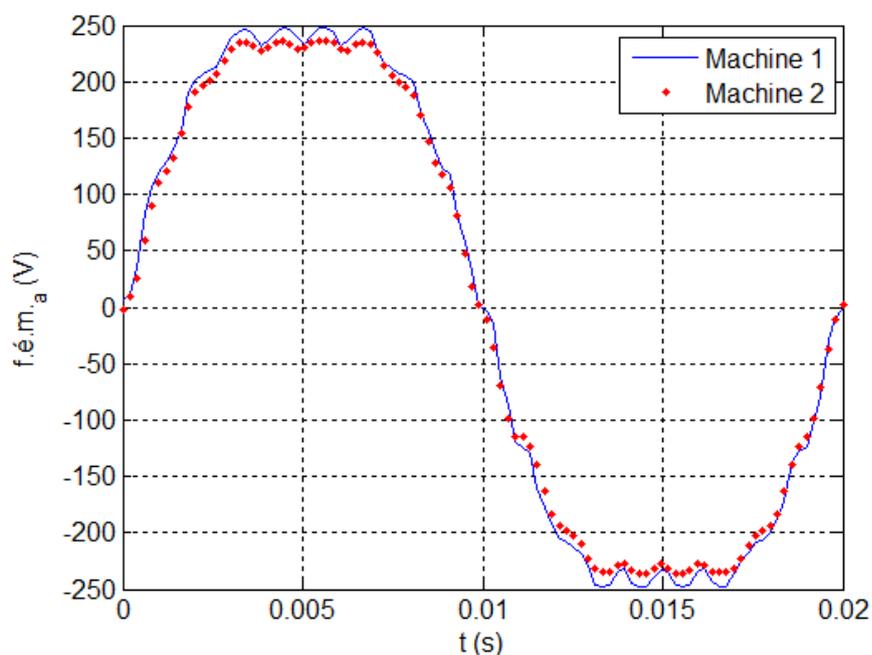
Figure.3. 12 Résultats du flux magnétique pour les deux machines.

### 3.11.2 Résultats de la force électromotrice f.é.m.

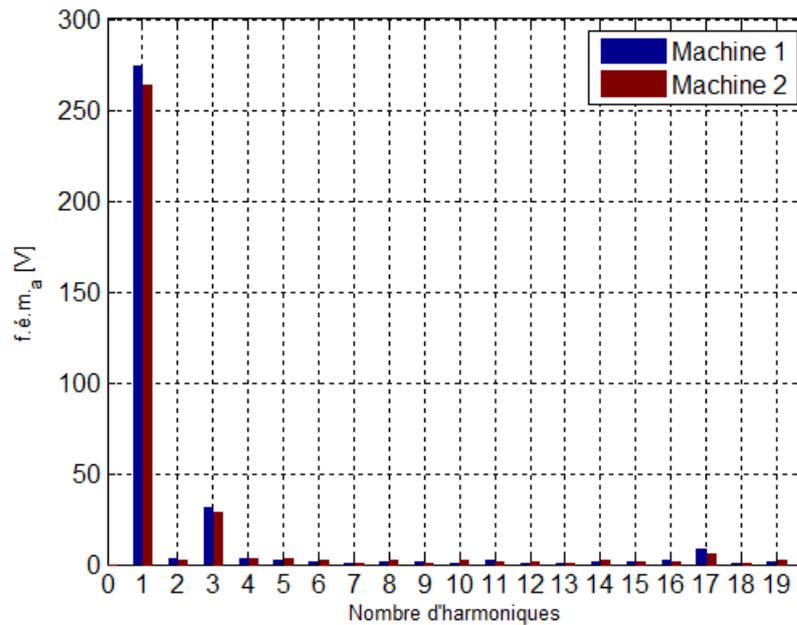
La force électromotrice induite obtenue est la tension de ligne à vide. La distribution du champ magnétique produit par les courants magnétisants est montrée à la figure 3.7. Une comparaison entre les résultats numériques des deux machines est proposée à la figure 3.14.

Pour calculer la f.é.m. qui est basée sur l'utilisation de l'intégrale linéaire de la composante z du champ électrique E sur le long de la bobine [43].

La tension induite, ainsi que les harmoniques spatiaux, sont illustrés à la figure 3.14. Les formes d'onde f.é.m. des deux machines sont presque identiques à celle d'une onde sinusoïdale. La première valeur harmonique de f.é.m. 274.73 volts pour la machine 1 et 262.13 volts pour la machine 2. Par rapport à la valeur attendue analytiquement, la valeur simulée est inférieure (12.6%) pour la machine 1 et (8.06%) pour la machine 2 (en raison d'une fuite du stator) car le pas conçu de la bobine 8/9 réduit Harmoniques 5ème et 7ème, les harmoniques sont pratiquement nulles, et les électromoteurs obtenus sont de meilleure qualité, les harmoniques multiples d'ordre 3 sont nulles.



(a)



(b)

**Figure.3. 13** Résultats de la f.é.m. à vide pour les deux machines; (a) : Forme d'onde de la f.é.m. (b) : Espace harmoniques de la f.é.m. induite.

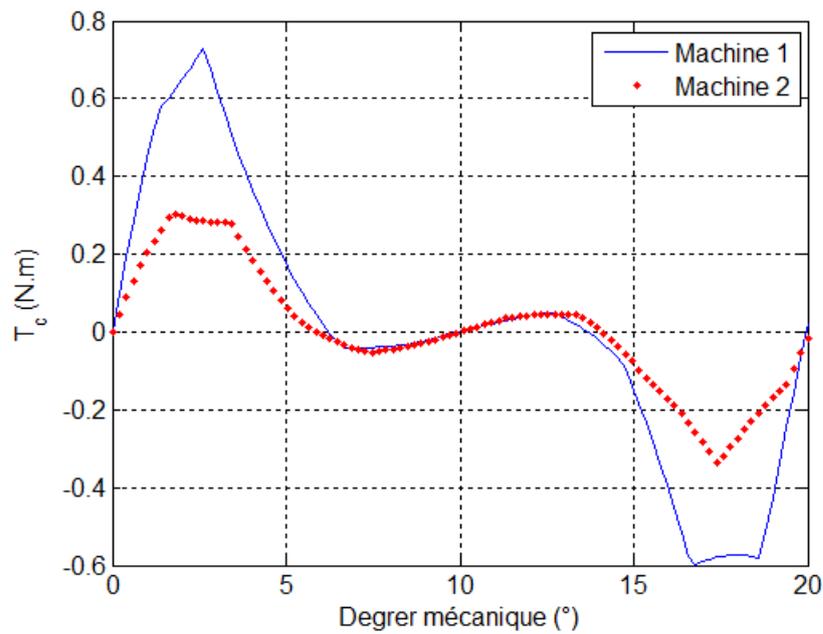
D'après la figure 3.14 (b), l'avantage de la machine 2 est que son Distorsion Harmonique Totale (THD) est inférieure à celle de la machine 1. Cela signifie que la machine 2 produit moins de distorsion harmonique dans sa forme d'onde de sortie par rapport à machine 1. Il s'agit d'une considération importante dans de nombreuses applications, car des niveaux élevés de distorsion harmonique peuvent entraîner des problèmes tels qu'une surchauffe et des dommages à la machine électrique, ainsi que des interférences avec d'autres appareils électriques. Par conséquent, le THD inférieur de la machine 2 en fait une option plus souhaitable dans de nombreuses situations.

### 3.11.3 Résultats du couple de détente

Le couple de détente est défini comme le couple à la charge maximale qui est appliqué à l'arbre du moteur et qui est non excité sans provoquer de rotation continue. Il est également connu comme couple de retenue et est produit dans le rotor de la machine à aimant permanent.

#### Commentaire :

Le couple de détente est produit dans le rotor de la machine aimante permanente. On remarque dans la figure ci-dessous que la valeur Max du couple de détente 0.7304 N.m pour la première machine et 0.3030 N.m pour la deuxième. Il est très faible car l'ouverture des becs des deux machines est très petite ce qui affecte directement l'amplitude du couple de détente.



**Figure.3. 14** Résultats du couple de détente pour les deux machines.

### 3.11.4 Résultats du couple électromagnétique

L'ondulation du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_{\text{ond}} = 100 \cdot \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{moy}}} \quad (3.14)$$

- $T_{\text{max}}$ , respectivement le couple électromagnétique maximum.
- $T_{\text{min}}$ , respectivement le couple électromagnétique minimum.
- $T_{\text{moy}}$ , respectivement le couple électromagnétique moyen.

Donc à partir des résultats du tableau ci-dessous et la figure 3.16 on peut calculer le  $T_{\text{moy}}$

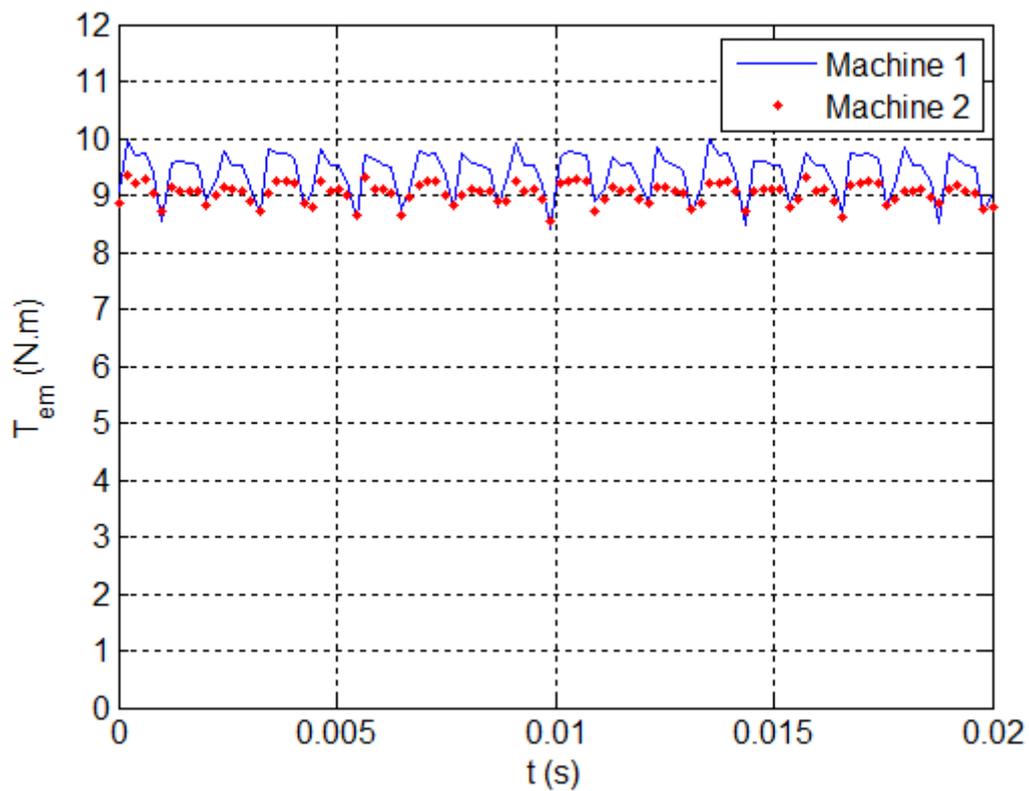


Figure.3. 15 Résultats du couple électromagnétique pour les deux machines.

Tableau.3. 1 Résultats du couple électromagnétique pour les deux machines.

	$T_{max}(N. m)$	$T_{min}(N. m)$	$T_{moy}(N. m)$	$T_{ond}(\%)$
<b>Machine 1</b>	9.9650	8.3955	9.3926	16.7098
<b>Machine 2</b>	9.3393	8.5524	9.0361	8.7083

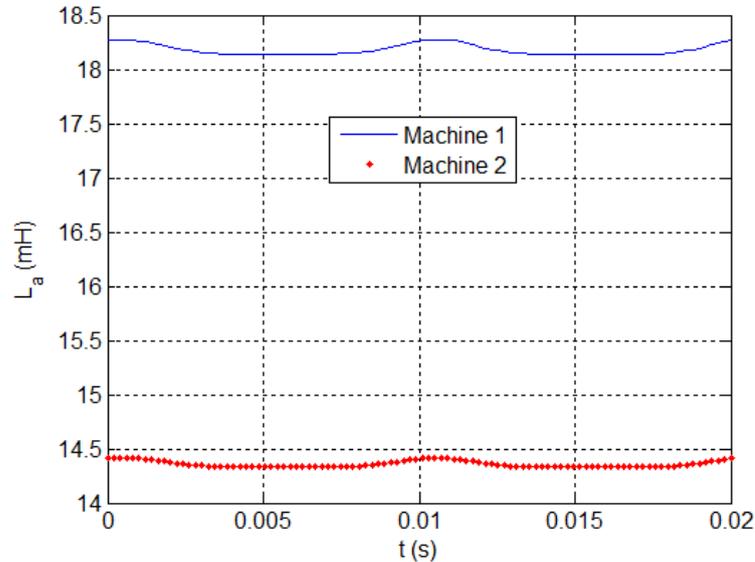
Le couple électromagnétique produit en condition de charge au courant de 2,57 A et une vitesse de 1500 tr/min est présentée dans la figure 3.16, la valeur moyenne du couple est de 9.9650 N.m pour la machine 1 et 9.3393 N.m pour la machine 2, le bobinage conçu donne la valeur désirée du couple pour les deux machines. L'ondulation de couple crête à crête pour la machine 1 est de 1.665 N.m (16.7098 % du couple nominal) alors que l'ondulation pour la machine 2 est de 0,813 N.m (8.7083 % du couple nominal).

### 3.12 Calcul des Inductances Self/Mutuelles

La self inductance  $L_a$  et la mutuelle  $M_{ab}$  peuvent être calculées à partir du flux magnétique des trois phases, ces inductances sont obtenues par l'équation (3.14) en fournissant une densité de courant fixe (c.-à-d., par un courant continu) seulement dans la phase-A.

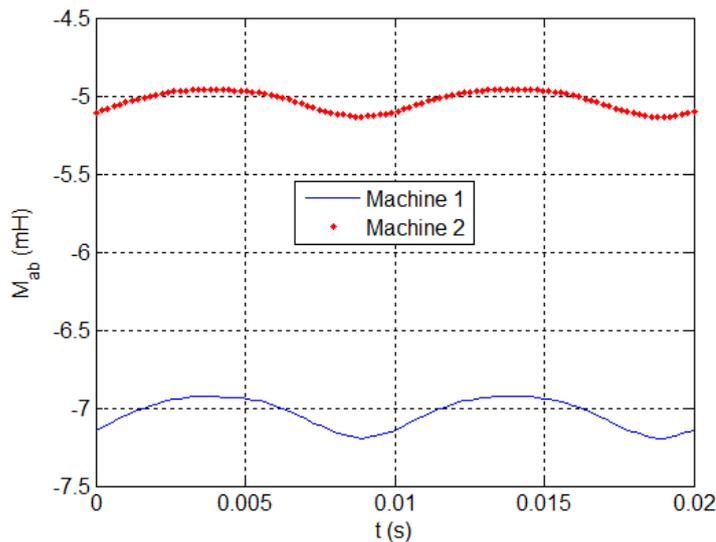
$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_{ab} \\ M_{ac} \end{bmatrix} = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T / i_a \quad (3.15)$$

### 3.12.1 Résultats des inductances self



**Figure.3. 16** Résultats des inductances selfs pour les deux machines.

### 3.12.2 Résultats des inductances mutuelles



**Figure.3. 17** Résultats des inductances mutuelles pour les deux machines.

D'après les résultats de la figure 3.17 et la figure 3.18 fournies, les valeurs d'inductance self et d'inductance mutuelle ont été mesurées pour les deux machines. Pour la machine 1, la valeur maximale de l'inductance self est de 18,27 mH et la valeur minimale est de 18,14 mH.

Pour la deuxième machine, la valeur maximale de l'inductance self est de 14,41 mH et la valeur minimale est de 14,32 mH. En ce qui concerne l'inductance mutuelle, la machine 1 a une valeur maximale de - 6,92 mH et une valeur minimale de -7,19 mH, tandis

que la deuxième machine a une valeur maximale de -5 mH et une valeur minimale de -5,1 mH. Ces mesures sont importantes pour l'analyse et la conception de la machine électriques.

La valeur de l'inductance n'est pas négative car il s'agit d'une valeur absolue, et elle peut être facilement modifiée en inversant le sens de la bobine. Cependant, il est souhaitable d'avoir des valeurs d'inductance faibles car cela conduit à un facteur de puissance élevé. Pour bien comprendre, l'inductance est une propriété des circuits électriques qui s'oppose à la variation du courant traversant le circuit. Lorsque le courant passe à travers une inductance, une f.é.m. est induite dans la bobine qui s'oppose au changement de courant, provoquant un déphasage entre la tension et le courant. Ce déphasage se traduit par un facteur de puissance plus faible, ce qui signifie qu'un courant plus élevé est nécessaire pour fournir la même quantité de puissance à une charge, donc pour avoir un facteur de puissance élevé, ce déphasage entre la tension et le courant doit être réduit.

### **3.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, il a été question d'utiliser tous les préceptes vus dans les chapitres précédents afin d'obtenir les paramètres de la machine pour l'éolienne. À l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, et de la Méthode des Eléments Finis MEF, nous avons pu modéliser notre machine toute en respectant les conditions imposait par le cahier des charges. Ce travail a présenté une méthode de dimensionnement de deux machines synchrones de flux radial à aimant permanent en utilisant un calcul analytique, basé sur les caractéristiques géométriques et électromagnétiques validées avec une simulation par la MEF en utilisant le logiciel COMSOL.

D'après les résultats de la comparaison entre les deux machines conçues, il apparaît que la machine conçue avec des conditions spécifiques (machine 2) répond aux exigences souhaitées en termes de densité de flux d'entrefer et de force électromotrice avec des harmoniques minimales. Cependant, cette machine présente un couple de détente plus faible, une ondulation de couple et un volume de fer plus important que la machine entièrement conçue sans condition. Malgré cela, la machine conçue avec des conditions spécifiques offre de faibles pertes et un bon rendement, ce qui en fait le meilleur choix pour une utilisation dans une éolienne. De plus, une comparaison entre l'approche analytique utilisant des équations de dimensionnement et l'approche numérique utilisant la simulation par MEF montre que les deux approches offrent un bon accord en termes de résultats obtenus.

Ces résultats soulignent l'importance de l'utilisation de ces différentes approches pour la conception de machines électriques, afin de pouvoir choisir la meilleure option en fonction des critères de conception et des exigences de performance.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### **Conclusion générale**

Ce travail a présenté les méthodes à utiliser et la procédure à suivre afin de concevoir un alternateur pour une éolienne domestique. Les aspects liés à la conception des machines électriques à aimants permanents sont multiples. Ils concernent la structure de la machine et le type de matériaux à utiliser. Les machines synchrones sont plus adaptées aux centrales éoliennes, elles permettent de convertir la force du vent en électricité

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, porte sur le dimensionnement d'une machine synchrone à aimants permanents. La procédure de dimensionnement par utilisation des expressions de construction, en suivant les contraintes et les performances qu'impose le cahier de charges, nous a permis de dégager rapidement les dimensions et paramètres de la machine à concevoir. Ces dimensions et paramètres constituent le point initial pour un calcul plus précis des performances électromagnétiques en utilisant les méthodes analytiques et numériques par éléments finis.

D'abord nous avons présenté une revue de la littérature qui englobe l'ensemble des éléments nécessaires à connaître avant de commencer le travail de conception. Ainsi nous avons pu voir une description de l'éolienne, ensuite on a abordé certaines notions théoriques fondamentales qui ont servi comme base de notre travail. Enfin une description globale de la machine synchrone est faite afin de bien comprendre son fonctionnement et connaître les différents éléments qui la composent et leurs rôles dans la machine, cela nous a permis de bien cerner la machine synchrone sous tous ces angles avant sa conception.

Ensuite, la méthodologie de conception de la machine (alternateur). Nous avons parlé en détail des types de bobinages présents dans la machine synchrone et de leur structure ainsi que des techniques de dimensionnements du circuit magnétique et des enroulements de la machine.

A la fin de ce mémoire et à l'aide de la méthode des éléments finis, nous avons présenté une méthode de dimensionnement de la MSAP qui fonctionne en mode générateur de flux radial en utilisant un calcul analytique, basé sur les caractéristiques géométriques et électromagnétiques validées avec une simulation par la MEF en utilisant le logiciel COMSOL. Deux comparaisons ont été faites, la première entre les deux machines conçues et la deuxième comparaison de l'approche analytique et l'approche numérique par éléments finis. Ces derniers ont montrés un bon accord entre les deux approches.

## Références bibliographiques

- [1] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, pp. 746-765, Apr. 2007.
- [2] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, pp. 746-765, Apr. 2007.
- [3] A. Mahmoudi, N. A. Rahim, H. W. Ping, "Axial-Flux PermanentMagnet Motor Design for Electric Vehicle Direct Drive Using Sizing Equation and Finite Element Analysis," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp. 467-496, 2012.
- [4] N. Bianchi., S. Bolognani, B. Ruzojcic, "Design of a 1000 HP Permanent Magnet Synchronous Motor for Ship Propulsion," in *13th Eutropean Conference on Power Electronics and Applications*, EPE2009, Barcelona 8-10 Sept. 2009.
- [5] F. Caricchi, F. Crescimbin, O. Honorato, "Modular Axial Flux Permanent-Magnet Motor for Ship Propulsion Drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, No. 3, Sept. 2009.
- [6] R. Lateb, N. Takorabet, F. Meïbody-Tabar, A. Mirzaïan, J. Enon, A. Sarribouette, "Performances Comparison of Induction Motors and Surface Mounted PM motor for POD Marine Propulsion," in *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 2, pp. 1342 - 1349, Oct. 2005.
- [7] A. Grauers, "Design of direct driven permanent magnet generators for wind turbines," Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996.
- [8] R. Wallace, J. Alexandrova, B. Vera, J. Tapia, J. Pyrhonen, P. Lindh, "P.M. Synchronous Generator Design Analytical Method," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion Conference., 2012*.
- [9] F. Dubas, C. Espanet, A. Miraoui, "Design of a High-Speed Permanent Magnet Motor for the Drive of a Fuel Cell Air-Compressor," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, vol. -, pp. 603 - 610, Oct. 2005.
- [10] J. Montonen, P. Lindh, J. Pyrhönen, " Design Process of Traction Motor having Tooth Coil Windings," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference*, pp. 1264-1268, 2012.
- [11] I. Elozegui, I. Egaña, L. Fontán, Andrés Garcia Rico, and M. MartínezIturralde, "Fast Sizing and Simulation of Multipole Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines," in *International Symposium on Power Electronics on Electrical Drives, Automation and Motion*, SPEEDAM 2008.
- [12] N. KasbadjiMerzouk « Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?, » *Bul.Ene. Ren, CDER*, N°14, Dec 2008, p.6-7.
- [13] K. BOULAAM, « Commande d'une machine à courant alternatif avec système hybride de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, USTHB, 2020.
- [14] O. Guerri, "L'Énergie Eolienne en Algérie : un Bref Aperçu", *Bulletin des Energies Renouvelables* N°. 21, CDER, Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Algérie, 2011.
- [15] B. TOUAL, « Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Énergie Electrique », Thèse de doctorat, Université Batna, 2018.

- [16] F.Z. BELAIMECHE, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université DJILLALI LIABES de Sidi Bel Abbas, 2018.
- [17] Ilarion PAVEL, «L'invention du moteur synchrone par Nikola Tesla», sur [bibnum.education.fr](http://bibnum.education.fr), janvier 2013.
- [18] D. PRIETO, « Modélisation et optimisation des machines synchro-réductances à aimants permanents et de leur électronique», Thèse de Doctorat, Ecole doctorale STITS, 2015.
- [19] D. PRIETO, « Modélisation et optimisation des machines synchro-réductances à aimants permanents et de leur électronique», Thèse de Doctorat, Ecole doctorale STITS, 2015.
- [20] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012.
- [21] G.Lacroux, " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989.
- [22] Bernard MULTON, "Application des aimants aux machines électriques ", notes de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan. <http://emecatronique.bretagne.ens.cachan.fr>
- [23] R. Ibtouen : "Contribution au dimensionnement électromagnétique d'une machine synchrone autopilotée à aimants insérés", Thèse doctorat d'état, ENP, Alger, Algérie, avril. 1993.
- [24] L. Hadjout : "Analyse des performances électromagnétiques d'une machine synchrone autopilotée à aimants à rotor lisse », Thèse Magister, ENP, Alger, Algérie, juin. 1994.
- [25] L. Lechevallier, "Aimants permanents, applications et perspectives", Technique de l'ingénieur, E1760.
- [26] Mohand Laïd Idoughi, "Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures". Université Paris Sud - Paris XI, 2011.
- [27] Gilles Romuald Guedia Guemo, "Modélisation et caractérisation thermique de machines électriques synchrones à aimants permanents.", INSA de Lyon, 2014.
- [28] Mohand Laïd Idoughi, "Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures". Université Paris Sud - Paris XI, 2011.
- [29] M. Dubois, "matériaux de l'électrotechnique", IGEE-403, 2006.
- [30] R. Glises, "Simulation du comportement thermique", Technique de l'ingénieur, D3760.
- [31] référence J.Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, " Design of Rotating Electrical Machines, Chichester", UK: John Wiley & Sons, 2008..
- [32] J.Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, " Design of Rotating Electrical Machines, Chichester", UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [33] Ponomarev, "Tooth-coil Permanent Magnet Synchronous Machine Design for Special Applications", PhD dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Lappeenranta University of Technology, Finland, Oct 2013.

- [34] Søren B. Andersen, Ilmar F. Santos, "Evolution strategies and multi-objective optimization of permanent magnet motor", Science Direct Applied Soft Computing.
- [35] Technique de l'ingénieur, "Bobinage des machines tournantes à courant alternatif", d3420.
- [36] "A. Tikellaline, K.Boughrara, N.Takorabet, "Design and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor"
- [37] Abdeslam Djamila, "Analyse et construction d'un Moteur Asynchrone à rotor à cage", Thèse de magister, L'ENP, Mars 2006.
- [38] Stephan Meier, "Theoretical design of surface-mounted permanent magnet motors with field weakening capability", Thèse de master, Royal Institute of Technology, Stockholm 2001/2002.
- [39] Ramdane Lateb, "Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimant avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps: Application à la propulsion marine par POD ", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Octobre 2006.
- [40] Techniques de l'ingénieur, "Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ", d3554.
- [41] M. RANLOF, « Electromagnetic Analysis of Hydroelectric Generators », Thèse de Doctorat, Faculty of Science and Technology, Uppsala University, Uppsala, 2011.
- [42] Mohamed Amine KHALF, « Conception Optimale d'un Alternateur de Faible Puissance pour le Simulateur de Groupe Turbine-Alternateur d'Hydro-Québec », Mémoire de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Avril 2013.
- [43] O. Krovel, « Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines,» Ph.D. Dissertation, Dept. Electrical Power Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Feb 2011.
- [44] Comsol AC/DC Module Model Library Manual.S. WIAK et E. NAPIERALSKA-

## **Webographie**

[W01]: <https://gwec.net/global-wind-report-2021> 17.06.2023

[W02]: <https://www.wwindea.org> 17.06.2023

[W03] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> 17.06.2023