



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHIQUE

Mémoire de MASTER

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Électrotechnique

Option : Machines électriques

Réalisé par :

ABDELALI Khalil et CHAKKEM Ibrahim

THEME

CAO d'une Machine Electrique en Utilisant ANSYS-Maxwell

Application à un Moteur à Induction Triphasé

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

<i>Mr. SAROUTE Mohamed</i>	MCB	Président
<i>Mme BENLARBI Keltoum</i>	MCB	Encadreur
<i>Mr. MOKRANI Lakhdar</i>	Prof.	Co-encadreur
<i>Mr. DAREM El Moradj</i>	MCB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Abstract: This work consists of a Computer Aided Design (CAD) of a 30 kW squirrel cage three phase Induction Motor (IM). At the beginning, we started by establishing a state of the art regarding the different CAD methods of electrical machines in general and IMs in particular. Then, we were interested in the classic method that we used for a preliminary dimensioning of the studied motor. Afterwards, we used the ANSYS-RMxpert software to calculate, plot and discuss its different static characteristics (equivalent electromagnetic parameters, torque, current, power factor, efficiency, ...). Finally, we ended our work by using ANSYS-Maxwell 2D software for a fine two-dimensional analysis of this machine using the finite element method. This allowed us to validate our previous results.

Keywords: CAD, IM of 30 kW, Classical CAD method, Preliminary dimensioning, ANSYS-RMxpert, Characterization, ANSYS-Maxwell 2D, Validation.

ملخص: يندرج هذا العمل في إطار تصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAD) لمحرك لا تزامني ذي ثلاثة أطوار و قفص سنجاب بقدرة 30 كيلواط. في البداية ، بدأنا بعرض حالة يخص بمختلف أساليب (CAD) للالات الكهربائية بشكل عام و المحركات اللامتزامنة بشكل خاص. بعد ذلك انصب اهتمامنا على الطريقة الكلاسيكية التي استخدمناها لإيجاد تصميم أولي للمحرك المدروس. ثم استخدمنا برنامج ANSYS-RMxpert لحساب، رسم ومناقشة خصائصه السكونية المختلفة (الوسائط الكهرومغناطيسية المكافئة ، عزم الدوران، التيار، معامل الإستطاعة، الكفاءة ، ...). أخيرًا، أنهينا عملنا باستخدام برنامج ANSYS-Maxwell 2D لتحليل دقيق ثنائي الأبعاد لهذه الآلة باستخدام طريقة العناصر المنتهية. هذا ما سمح لنا التحقق من صحة نتائجنا السابقة.

كلمات مفتاحية: CAD، محرك لا تزامني بقدرة 30 كيلواط، طريقة التصميم الكلاسيكية، حساب الأبعاد الأولية، ANSYS-RMxpert، حساب الخصائص، ANSYS-Maxwell 2D، التحقق.

Résumé : Ce travail consiste en une Conception Assistée par Ordinateur (CAO) d'un Moteur ASynchrone (MAS) triphasé à cage d'écureuil de 30 kW. Au début, nous avons commencé par établir un état de l'art concernant les différentes méthodes de CAO des machines électriques en général et du MAS en particulier. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la méthode classique que nous avons utilisée pour un dimensionnement préliminaire du moteur étudié. Puis, nous avons utilisé le logiciel ANSYS-RMxpert pour calculer, tracer et discuter ses différentes caractéristiques statiques (paramètres électromagnétiques équivalents, couple, courant, facteur de puissance, rendement, ...). Finalement, nous avons clôturé notre travail en utilisant le logiciel ANSYS-Maxwell 2D pour une analyse bidimensionnelle fine de cette machine en utilisant la méthode des éléments finis. Ceci nous a permis de valider nos résultats précédents.

Mots-clés : CAO, MAS de 30 kW, Méthode de CAO classique, Dimensionnement préliminaire, ANSYS-RMxpert, Caractérisation, ANSYS-Maxwell 2D, Validation.



Dédicace ...

*Je dédie ce mémoire en premier à ma mère,
ma mère, ma mère, et encore ma mère
qui a tout fait pour que j'en sois là aujourd'hui ;
A mon père qui a éclairé mes scabreux chemins
de ma vie et m'a mené vers moi-même ;
A mes chers frères Samir, Ameer et Ayoub
A ma sœur, Maria ;
A toute ma proche famille : oncles, tantes et
cousins des deux côtés ;
A mes grands-parents ;
Et à mes très chers amis.*

Khalil



Dédicace ...

*Je dédie ce mémoire en premier à ma
mère qui a tout fait pour que j'en sois là
aujourd'hui ;*

*A mon Cher père avec toute ma
reconnaissance ;*

A mon frère et ma sœur ;

A ma famille ;

Aux amis et collègues ;

Et à tous ceux qui ont eu une faveur sur moi.

IBRAHIM



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions ALLAH pour la santé et la force qu'il nous a accordées en ces temps difficiles.

Un merci spécial à monsieur Lakhdar MOKRANI qui nous a aidé énormément et a pris le temps nécessaire pour nous guider à mener à bien ce travail. Nous tenons à remercier également Mme Benlarbi Keltoum qui nous a initiés à l'utilisation et l'exploitation du logiciel RMXprt et ANSYS-MAXWELL.

Toute notre respectueuse gratitude et nos remerciements aux membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur discussion fructueuse de nos travaux, en l'occurrence monsieur Saroute Mohamed en qualité de président du jury et monsieur Darem El Moradj en qualité d'examineur.

Nous remercions aussi nos chers parents, qui ont tout le mérite pour tout ce que nous avons accompli.

Nous remercions également la famille, les collègues et tous ceux qui ont joué un rôle dans la réalisation de ce travail.

Liste des Symboles

Symbole	Denomination	Unité
MAS	Moteur ASynchrone	-
CAO	Conception Assistée par Ordinateur	-
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur	-
$NEMA$	National Electrical Manufacturers Association	-
hp	Horse power	-
A	Densité linéaire du courant	A/m
a	Nombre de voies en parallèle de l'enroulement	-
$\hat{B}_{ys} \hat{B}_{yr}$	Induction magnétique dans les dos statorique et rotorique	T
\hat{B}_{δ}	Valeur moyenne de l'induction	T
$b_{ds} b_{dr}$	Largeur de la dent statorique et rotorique	mm
b_{4c}	Largeur minimale de l'encoche statorique	mm
b_{5c}	Largeur maximale de l'encoche statorique	mm
b_4	Largeur maximale de l'encoche rotorique	mm
b_5	Largeur minimale de l'encoche rotorique	mm
C	Constante concernant les machines à champ tournant	-
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
D	Diamètre moyen de l'entrefer	mm
D_{se}	Diamètre extérieur du stator	mm
D_{ri}	Diamètre intérieur du rotor	mm
D_s	Diamètre intérieur du stator	mm
D_r	Diamètre extérieur du rotor	mm
E_m	F.e.m interne induite par phase	V
f	Fréquence d'alimentation	Hz
g	Glissement	-
$h_{ys} h_{yr}$	Hauteurs des culasses statorique et rotorique	mm

J_s	Densité de courant dans le stator	A/m^2
J_r	Densité de courant dans le rotor	A/m^2
k_{Fe}	Facteur d'empilement des tôles ferromagnétiques	-
k_{dist1}	Coefficient de distribution	-
k_{incl1}	Coefficient d'inclinaison des encoches rotoriques	-
k_{rac1}	Coefficient de raccourcissement	-
k_{sat}	Coefficient de saturation	-
k_{ws1}	Coefficient de bobinage statorique	-
l'	Longueur équivalente du stator	mm
l	Longueur réelle de la machine	mm
m	Nombre de phases statoriques	-
N	Nombre de spires en série par phase statorique	-
n_{syn}	Vitesse de synchronisme	Tr/min
n_{cs}	Nombre de conducteurs par encoche et par phase du stator	-
p	Nombre de paires de pôles	-
P_{mec}	Puissance mécanique	W
q_s	Nombre d'encoches par pole et par phase du stator	-
Q_s	Nombre d'encoches statoriques	-
Q_r	Nombre d'encoches rotoriques	-
r_r	Rayon du rotor	mm
S_r	Surface du rotor en face de l'entrefer	mm^2
S_n	Puissance apparente nominale	VA
s_{qs}	Inclinaison en termes de pas dentaires statoriques	-
T	Couple	$N.m$
t_s t_r	Pas dentaires statorique et rotorique	mm
U_m	Force magnétomotrice totale	$A.m$
$\sigma_{F_{tan}}$	Contrainte tangentielle	N/m^2
χ	Rapport entre la longueur équivalente de la machine et le diamètre de l'entrefer	-

ζ	Déphasage entre A et \widehat{B}_δ	rd
$\widehat{\phi}_m$	Flux maximal d'une phase	Wb
δ	Epaisseur de l'entrefer	mm
α_i	Coefficient de la moyenne arithmétique de l'induction magnétique sous un pôle	-
δ_c	Entrefer équivalent	mm
η	Rendement	-

Liste des Figures

Chapitre I

Figure	Titre	Page
Fig. I.1	Schéma général d'un processus de conception	6
Fig. I.2	Vue éclatée d'un moteur asynchrone à rotor à cage	10
Fig. I.3	Section d'un stator d'un moteur asynchrone	11
Fig. I.4	Rotor à cage d'un moteur asynchrone	12
Fig. I.5	Rotor et vue d'un moteur à rotor bobiné	13
Fig. I.6	Exemples d'enroulements d'un moteur asynchrone	14
Fig. I.7	Caractéristiques normalisées des classes <i>NEMA</i> des moteurs asynchrones à cage et les formes d'encoches de rotor leur correspondant	17

Chapitre II

Figure	Titre	Page
Figure II.1	Exemples de formes d'encoches : a) statorique, b) rotorique	33

Chapitre III

Figure	Titre	Page
Fig. III.1	Interface de sélection de machines dans <i>RMxpri</i>	37
Fig. III.2	Fenêtre de projet	38
Fig. III.3	Fenêtre des propriétés de la machine	39
Fig. III.4	Fenêtre des paramètres du stator	40
Fig. III.5	Exemple de choix et paramétrage d'une encoche statorique	41
Fig. III.6	Exemple de choix et paramétrage d'un bobinage statorique	42
Fig. III.7	Exemple de choix et paramétrage d'un bobinage statorique	43
Fig. III.8	Fenêtre des paramètres du rotor	44
Fig. III.9	Topologies et paramétrage d'une encoche rotorique	45

Fig. III.10	Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor	46
Fig. III.11	Fenêtre de paramétrage de l'arbre rotorique	46
Fig. III.12	Fenêtre de configuration des paramètres d'analyse	47
Fig. III.13	Fenêtre de la rubrique ' <i>Performance</i> '	48
Fig. III.14	Fenêtre de la rubrique ' <i>Fiche technique de conception</i> '	49
Fig. III.15	Quelques caractéristiques de la rubrique ' <i>Courbes</i> '	50
Fig. III.16	Introduction des propriétés de la machine étudiée	51
Fig. III.17	Introduction des propriétés du stator	51
Fig. III.18	Introduction des propriétés des encoches et enroulement du stator	52
Fig. III.19	Introduction des propriétés du rotor	53
Fig. III.20	Introduction des propriétés des encoches et enroulement du rotor	53
Fig. III.21	Configuration du ' <i>setup</i> ' du projet du moteur étudié	54
Fig. III.22	Résultats de simulation du point de fonctionnement critique du moteur étudié	55
Fig. III.23	Fenêtre de la fiche technique	57
Fig. III.24	Disposition de l'enroulement statorique	59
Fig. III.25	Courant de phase en fonction de la vitesse	59
Fig. III.26	Puissance de sortie en fonction de la vitesse	60
Fig. III.27	Rendement en fonction de la vitesse	60
Fig. III.28	Couple électromagnétique en fonction de la vitesse	61

Chapitre IV

Figure	Titre	Page
Fig. IV.1	Fenêtre de création d'un design maxwell 2D à partir d'un projet <i>RMxprt</i>	63
Fig. IV.2	Fenêtre gérant les paramètres temps et pas de simulation	64

Fig. IV.3	Fenêtre gérant les effets de courants de Foucault dans un problème transitoire de <i>Maxwell</i>	64
Fig. IV.4	Fenêtre de validation d'un projet de conception sous <i>Maxwell-2D</i>	65
Fig. IV.5	Exemple de géométries 2D importées sous <i>Maxwell-2D</i>	66
Fig. IV.6	Exemple d'un maillage de géométrie 2D sous <i>Maxwell</i>	67
Fig. IV.7	Géométries 2D et 3D du moteur étudié sous <i>Maxwell</i>	68
Fig. IV.8	Maillage de la géométrie 2D du moteur étudié sous <i>Maxwell</i>	69
Fig. IV.9	Cartographie de l'induction magnétique sur une section 2D du moteur étudié sous <i>Maxwell</i>	70
Fig. IV.10	Visualisation de quelques caractéristiques temporelles issues de <i>Maxwell-2D</i>	71
Fig. IV.11	Géométrie du moteur étudié sous <i>Maxwell-2D</i>	72
Fig. IV.12	Cartographie des vecteurs de l'induction magnétique sur une section 2D du moteur étudié sous <i>Maxwell</i>	73
Fig. IV.13	Visualisation de quelques caractéristiques temporelles du moteur étudié obtenues par <i>Maxwell-2D</i>	74

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau III.1	Résultats de simulation du point de fonctionnement critique et des données d'entrée du projet 'FEA'	55
Tableau III.2	Résultats de simulation du point de fonctionnement à rotor bloqué et nominal	56
Tableau III.3	Quelques résultats de simulation des matériaux et des paramètres électriques du moteur étudié	56
Tableau III.4	Résultats de simulation du bilan de puissance du moteur étudié	57
Tableau III.5	Quelques résultats de simulation de la fiche technique détaillée du moteur étudié	58
Tableau IV.1	Comparaison des résultats de <i>Maxwell-2D</i> à ceux de la méthode classique et de <i>RMxprt</i>	75

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	1
 <i>Chapitre I Généralités sur la CAO des Moteurs Asynchrones</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 Principe de la CAO	3
I.3 Historique des machines électriques.....	4
I.4 La conception dans l'industrie	5
I.5 Cahier de charges	7
I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé.....	7
I.7 Conception des machines asynchrones.....	8
I.8 Généralités sur la construction des moteurs asynchrones triphasés	9
I.8.1 Stator.....	10
I.8.2 Rotor.....	11
I.8.2.1 Rotor à cage.....	11
I.8.2.2 Rotor bobiné.....	12
I.8.3 Bobinage	13
I.8.4 Carcasse.....	15
I.8.5 Circuit magnétique.....	15
I.8.6 Arbre.....	15
I.8.7 Ventilateurs.....	15
I.8.8 Paliers.....	16
I.9 Classification des moteurs à cage	16
I.9.1 Classe <i>a</i>	17
I.9.2 Classe <i>b</i>	17
I.9.3 Classe <i>c</i>	17
I.9.4 Classe <i>d</i>	18
I.9.5 Classe <i>e</i>	18
I.10 Méthodes de dimensionnement classique des moteurs asynchrones.....	19

I.10.1 Première Méthode.....	19
I.10.2 Deuxième Méthode.....	19
I.10.3 Troisième Méthode.....	20
I.10.4 Quatrième méthode	20
I.11 Méthodes modernes de la CAO des moteurs asynchrones.....	21
I.11.1 Outils d'aide au choix de la structure de la machine à concevoir	21
I.11.2 Outils de dimensionnement de la structure du moteur à concevoir	21
I.11.2.1 Outil de dimensionnement par une approche procédurale	21
I.11.2.2 Outils de dimensionnement utilisant des systèmes experts.....	22
I.11.2.3 Outils de dimensionnement à l'aide d'algorithmes d'optimisation.....	22
I.11.2.4 Outils numériques de dimensionnement des machines électriques	22
I.12 Conclusion.....	23

Chapitre II Dimensionnement Préliminaire d'un Moteur Asynchrone Triphasé à Cage

II.1 Introduction	24
II.2 Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	24
II.3 Présentation des étapes de dimensionnement d'un moteur asynchrone	25
II.3.1 Cahier des charges et données initiales.....	26
II.3.2 Détermination des dimensions principales de la machine.....	26
II.3.3 Détermination de l'entrefer de la machine	28
II.3.4 Choix et calcul de l'enroulement de la machine	29
II.3.5 Induction dans l'entrefer et nombre de spires statoriques.....	31
II.3.6 Dimensionnement des dents et des encoches	32
II.3.7 Détermination des forces magnétomotrices et vérification de l'état magnétique.....	34
II.3.8 Hauteurs des dos et diamètres statorique et rotorique	34
II.4. Conclusion.....	35

Chapitre III CAO d'un moteur à Induction par ANSYS-RMxprt

III.1 Introduction.....	36
III.2 Présentation de RMxprt.....	36
III.2.1 Création d'une nouvelle conception RMxprt.....	36
III.2.2 Fenêtre de sélection du type de machine	37

III.2.3 Fenêtre de projet.....	37
III.2.4 Fenêtre des propriétés de la machine.....	38
III.2.5 Fenêtre du stator	39
III.2.6 Choix et paramétrage des encoches du stator	40
III.2.7 Fenêtre des propriétés de l'enroulement du stator	41
III.2.8 Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche.....	42
III 2.9 Fenêtre du rotor.....	43
III.2.10 Fenêtre de paramétrage des encoches du rotor	44
III.2.11 Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor	45
III.2.12 Fenêtre de paramétrage de l'arbre rotorique	46
III.2.13 Fenêtre de configuration d'une analyse	46
III.2.14 Analyse et exploitation des résultats de simulation	47
III.2.14.1. Performance	47
III.2.14.2. Fiche technique de conception	48
III.2.14.3 Courbes	49
III.3 Exemple d'application.....	50
III.3.1 Propriétés générales du moteur à caractériser	50
III.3.2 Propriétés du stator	51
III.3.3 Propriétés des encoches et de l'enroulement statoriques.....	52
III.3.4 Propriétés du rotor	52
III.3.5 Propriétés des encoches et de l'enroulement rotoriques.....	53
III.3.6 Résultats de simulation.....	54
III.3.6.1 Performances du moteur étudié.....	54
III.3.6.2 Fiche technique du moteur étudié.....	57
III.3.6.3 Disposition de l'enroulement statorique.....	58
III.3.6.4 Quelques caractéristiques du moteur étudié.....	59
a) <i>Courant de phase statorique en fonction de la vitesse</i>	59
b) <i>Puissance de sortie en fonction de la vitesse</i>	60
c) <i>Rendement en fonction de la vitesse</i>	60
d) <i>Couple électromagnétique en fonction de la vitesse</i>	61
III.4 Conclusion.....	61

Chapitre IV Validation de la CAO établie par ANSYS-Maxwell 2D	
IV.1 Introduction.....	62
IV.2 Présentation	62
IV.2.1 Création d'un model <i>Maxwell-2D</i>	63
IV.2.2 Validation et analyse d'un model <i>Maxwell-2D</i>	65
IV.3 Modèle 2D d'une machine sous <i>Maxwell-2D</i>	65
IV.4 À propos du maillage sous <i>Maxwell</i>	67
IV.5 Analyse et exploitation des résultats de simulation.....	68
IV.5.1 Géométrie 2D et 3D du moteur étudié.....	68
IV.5.2 Maillage du moteur étudié sous <i>Maxwell-2D</i>	68
IV.5.3 Résultats et cartographie de champs.....	69
IV.5.4 Caractéristiques.....	70
IV.6 Exemple d'application.....	72
IV.6.1 Géométrie du moteur étudié sous <i>Maxwell 2D</i>	72
IV.6.2 Cartographie de champs du moteur étudié	73
IV.6.3 Quelques caractéristiques du moteur étudié.....	73
IV.6.4 Interprétation et comparaison des résultats.....	75
IV.7 Conclusion.....	76
 Conclusion Générale	 77
 Bibliographie	 79

Introduction générale

Introduction Générale

Ce travail porte essentiellement sur une Conception Assistée par Ordinateur (*CAO*) d'un moteur asynchrone triphasé et à cage d'écureuil de 30 kW. Cette machine est la version la plus connue des machines électriques classiques dans tous les systèmes énergétiques. Elle est de plus en plus utilisée grâce aux nombreux progrès techniques enregistrés, ces dernières décennies dans les domaines de l'électronique de puissance, des systèmes de commande et des matériaux. Tandis que dans l'industrie, les moteurs asynchrones à cage d'écureuil se sont largement imposés par leur robustesse, leur simplicité de réalisation et facilité d'entretien [1].

Le terme de *CAO* (*CAD : Computer Aided Design*, en Anglais) est aujourd'hui utilisée à tort et à travers, ce qui lui vaut de perdre de sa signification. Pour des personnes, cette appellation couvre l'ensemble des tâches qu'un ordinateur est capable d'assumer lors du développement de produits techniques. D'autre part, il est naïf de croire que l'emploi de moyens de *CAO* n'est justifié que lors des calculs, avant de disserter sur les différentes possibilités de la *CAO* dans le domaine des machines électriques [2].

Le développement de la technologie informatique et la puissance des ordinateurs croissant de plus en plus, ont incités les chercheurs chargés de la conception des machines électriques à développer des programmes de dimensionnement et d'optimisation de plus en plus performants. Ces outils permettent une conception assistée par ordinateur, basée essentiellement sur l'analyse, la simulation et l'exploitation automatique des ensembles de solutions possibles.

L'objectif de ce projet est d'aborder la conception de moteurs asynchrones triphasés. Tout d'abord, il sera question de mener une étude théorique abordant les généralités sur sa construction et les différentes parties (rotor et stator). Ensuite, un dimensionnement préliminaire sera effectué en se basant sur une méthodologie classique, puis une caractérisation et validation de la *CAO* du moteur asynchrone étudié sera effectuée en utilisant le logiciel *ANSYS Maxwell*.

Ainsi, nous aurons besoin en premier lieu d'un dimensionnement préliminaire en se basant sur une méthode classique (de *Liwschitz*), qui nous permettra de calculer les dimensions géométriques et les paramètres du bobinage en partant d'un cahier de charge bien déterminé.

Après, nous allons utiliser ce dimensionnement comme point de départ du logiciel *ANSYS-RMxprt* pour caractériser cette machine initialement conçue. Les caractéristiques statiques principales (couple, courant, facteur de puissance, rendement, ...) et la fiche technique détaillée d'un moteur asynchrone triphasé et à cage d'une puissance de 30 kW seront présentées et discutées. Cet outil nous permettra aussi de construire une géométrie (2D ou 3D) de cette machine que nous allons utiliser ensuite pour valider nos résultats.

Dans ce travail, nous nous intéresserons aussi à l'étude de la machine conçue en utilisant l'outil *ANSYS-Maxwell* (nous nous limiterons à une étude bidimensionnelle par *ANSYS-Maxwell 2D*). Cet outil permet une solution fine et complète des appareils électromagnétiques basse fréquence en utilisant la méthode des éléments finis. Ses utilisateurs apprécient sa facilité d'utilisation, sa précision, sa polyvalence et sa flexibilité. Nous allons utiliser cet outil pour étudier le régime transitoire électromagnétique de la machine et de valider les caractéristiques statiques issues de la deuxième étape de la CAO assurée par l'outil *ANSYS-RMxprt*.

CHAPITRE I :
Généralités sur la CAO des
Moteurs Asynchrones

I.1 Introduction

Le moteur asynchrone ou le moteur à induction a apporté depuis son invention un changement révolutionnaire à la manière de l'utilisation de l'électricité industrielle et domestique, avec son faible coût et sa fiabilité, son efficacité élevée et sa facilité d'entretien. De nos jours, 80% de l'énergie électrique produite est convertie en énergie mécanique et la plus grande partie se fait avec le moteur à induction avec son utilisation dans presque tous les domaines (transport, électroménager et outils dans des domaines variés).

Le moteur à induction est un moteur à courant alternatif construit à partir de deux parties l'une fixe appelée le stator ou l'inducteur et l'autre mobile appelé le rotor ou l'induit. Ce dernier peut être bobiné ou à cage (dite cage d'écureuil).

Dans ce chapitre, nous allons décrire brièvement le moteur asynchrone et les étapes et méthodes de conception en passant avant par son historique et le principe de la conception elle-même.

I.2 Principe de la CAO

La Conception Assistée par Ordinateur (*CAO*) en général, a très souvent été confondue avec la notion de Dessin Assisté par Ordinateur (*DAO*), sans doute parce que l'activité de conception se passait souvent à la planche à dessin et que l'on a d'abord essayé d'automatiser la production de tracés, qui en termes de recopie des solutions existantes représente à peu près 80% de l'activité des projecteurs de bureaux d'études. Cependant, la *CAO* est beaucoup plus que la fonction de dessin qu'elle inclut; elle doit, pour être vraiment efficace, intervenir au niveau même du travail de réflexion du concepteur lorsqu'il pense à un nouveau produit ou qu'il modifie le produit existant pour l'adapter à un nouveau cahier des charges [1].

La *CAO* est une technique dans laquelle l'homme et l'ordinateur sont rassemblés pour la solution des problèmes techniques en une équipe qui allie étroitement les meilleures qualités de chacun d'eux, de telle manière que l'équipe travaille mieux que chacun séparément. En d'autres termes, la *CAO* est l'ensemble des outils et procédures utilisant l'informatique et permettant d'établir une synergie entre l'homme et l'ordinateur en mettant au mieux à profit leurs qualités complémentaires :

D'une part, on confie à l'ordinateur les travaux de stockage d'information et d'analyse routinière fastidieux et automatisables, comme l'établissement de nomenclatures, la mise en place

et la consultation de catalogues, la cotation de plans, l'analyse d'effets de tolérance, la résolution de grands systèmes d'équations ...etc. D'autre part, on laisse à l'homme les travaux de synthèse créatrice [1].

Toutefois, on notera que l'expression conception assistée par ordinateur peut être trompeuse, car elle peut laisser croire que l'ordinateur supplante pratiquement le concepteur.

L'observation immédiate permet de constater que l'ordinateur peut manier un très grand nombre de données quantitatives ou logiques, les traitements à grande vitesse, et cela sans erreur, alors que l'homme excelle dans l'appréhension qualitative des spécifications, des structures et des résultats. Pour obtenir cette synergie, plusieurs générations d'outils se sont succédées [1].

I.3 Historique des machines électriques

La théorie des moteurs électriques remonte aux années 1740, mais ce n'est qu'en 1821 que le tout premier exemple de mouvement rotatif efficace a été produit par un fil suspendu libre plongé dans une piscine de mercure avec un aimant permanent placé sur le mercure. Une fois que l'électricité est passée à travers ce fil, celui-ci procède à une rotation autour de l'aimant, ce qui a montré que le courant produisait un champ magnétique circulaire étroit autour du fil [2].

En 1824, l'existence de champs magnétiques rotatifs a été montrée en activant et désactivant manuellement les interrupteurs et n'a été démontrée qu'en 1879 comme étant en fait le premier moteur à induction primitif. Dans les années 1880, de nombreux inventeurs à travers le monde tentaient de développer un moteur à courant alternatif fonctionnel en raison des avantages du courant alternatif pour la transmission haute tension à longue distance. Mais cela a été compensé par l'incapacité de faire fonctionner les moteurs sur courant alternatif. En 1885, le premier moteur à induction à courant alternatif sans collecteur a été inventé et amélioré en 1886.

En 1887, on a envisagé un développement industriel possible et le moteur à induction a été breveté en 1888. En 1891, des moteurs à courant alternatif ont été utilisés dans une exploitation minière. Puis en 1892, le développement de moteurs à induction polyphasés de 60 Hz a été réalisé. Et en 1893, ils ont été introduits sous forme de moteurs biphasés à rotors bobinés.

Cependant, les moteurs à courant alternatif triphasés à rotor à cage et à rotor bobiné ont été inventés en 1889 avec un rhéostat de démarrage, et un transformateur à trois branches, et ils sont devenus disponibles dès 1890. Des modèles plus puissants de ces moteurs ont alors été produits (une variante à cage d'écureuil de 20 *hp* et une autre à rotor bobiné de 100 *hp* avec un rhéostat de démarrage). Il s'agissait des premiers moteurs asynchrones triphasés adaptés à un fonctionnement pratique. Depuis lors, des développements similaires de machines triphasées ont été lancés et en 1894, le premier système triphasé de longue distance a été présenté avec succès. Il était évalué à 15 *kV* et s'étendait sur 175 *km* [2].

En 1896, *General Electric* et *Westinghouse* ont signé un accord de licence réciproque pour la conception du rotor à enroulement à barres, plus tard appelé rotor à cage d'écureuil.

Les améliorations apportées aux moteurs à induction suite à ces accords ont conduit à des innovations et des améliorations telles qu'aujourd'hui, un moteur à induction de 100 *hp* a les mêmes dimensions de montage qu'un moteur de 7.5 *hp* en 1897 [2]. L'invention des moteurs électriques à courant alternatif et continu a joué un rôle clé dans la révolution industrielle dans les pays développés telles que les *USA* [2].

I.4 La conception dans l'industrie

L'activité de conception, telle qu'elle se pratique dans l'industrie électrique, est consacrée pour 70 % de son volume à de la recopie de dispositifs existants et pour 30 % à des modifications, voire des innovations. Néanmoins, qu'il s'agisse d'un produit nouveau ou d'un dispositif existant à adapter, la conception passe par un certain nombre de méthodes indispensables pour mener ce travail à bien. Si l'on suppose que le cahier des charges a été établi, il faut s'assurer du bien-fondé de ses résultats avant de passer au projet conceptuel, puis à la réalisation physique [3].

La figure suivante illustre les différentes étapes d'un processus de conception :

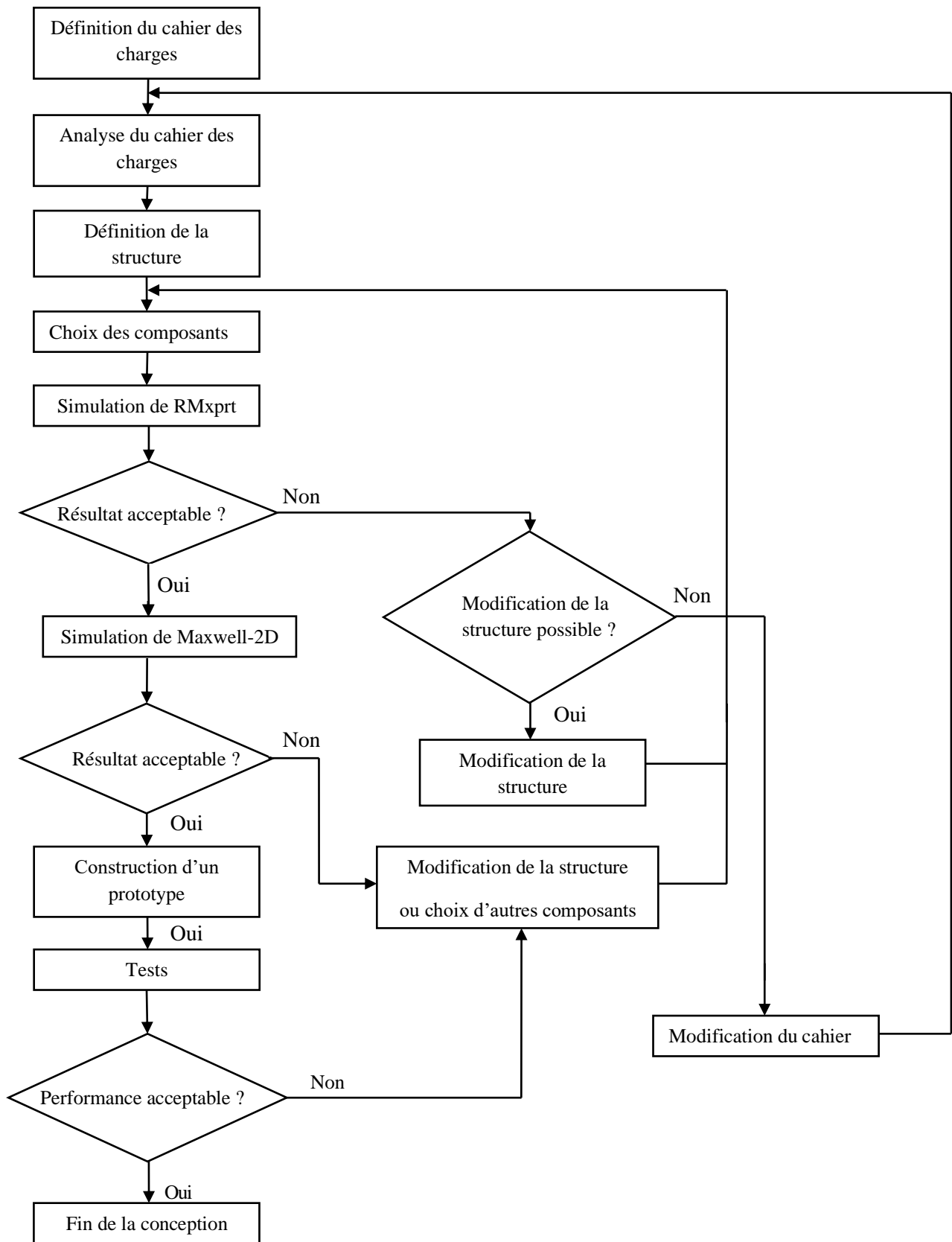


Fig. I.1 Schéma général d'un processus de conception [4]

I.5 Cahier de charges

Le cahier des charges d'un moteur électrique est composé de deux parties complémentaires suivantes :

- D'une part, la spécification des performances qui détermineront les caractéristiques électromécaniques du moteur ;
- D'autre part, les contraintes de dimensionnement et le mode de fonctionnement qui sera imposé par l'application à laquelle on le destine lorsque celle-ci est connue.

L'évolution récente de l'industrie des machines asynchrones a entraîné une normalisation importante de la puissance de ces machines en fonction de la hauteur d'axe et du nombre de pôles. Cette normalisation a une influence importante sur la conception qui se présentera sous deux formes différentes selon qu'elle s'applique à un moteur de série ou à une machine destinée à une application particulière définie par un cahier des charges donné. Cela étant, les performances électromécaniques les plus importantes sont le rendement minimal garanti pour un type de service, le courant de démarrage maximal et le couple d'accrochage.

En ce qui concerne les moteurs de série, on cherchera à optimiser la géométrie, c'est-à-dire le dimensionnement des tôles du stator et du rotor, l'adaptation des caractéristiques liées à la puissance étant reliées à la longueur du moteur [5].

I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction. Il est considéré comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant [6].

Lorsque le rotor tourne à une vitesse différente de celle du synchronisme, l'application de la loi de *Faraday* à l'un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une

force électromotrice qui, étant court-circuité sur autres enroulements, va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par son impédance. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple électromagnétique de la machine. Lorsque le champ magnétique est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [6]:

$$N_s = \frac{f}{p} \quad \text{en tr/s} \quad \text{ou} \quad N_s = \frac{60 \times f}{p} \quad \text{en tr/min} \quad (\text{I.1})$$

Où :

f : est la fréquence d'alimentation ;

p : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (N_s) diffère de celle du rotor (N), c'est à dire lorsque $N \neq N_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $N = N_s$, le champ tournant serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport g , donnée par l'équation suivante, est appelé glissement de la machine asynchrone :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (\text{I.2})$$

I.7 Conception des machines asynchrones

La conception des machines asynchrones recouvre un domaine d'activité très vaste qui va de la machine de quelques watts de puissance destinée à des applications informatiques jusqu'au moteur de quelques mégawatts implanté dans des procédés industriels lourds. Il n'est pas possible de couvrir, dans les limites de ce travail, la diversité de l'approche de l'ensemble de toutes ces applications, ce qui nous conduit à nous restreindre aux machines asynchrones a cage [5].

Cependant, dans cette seule catégorie qui recouvre la plupart des applications industrielles, le cadre dans lequel se déroule la conception est d'une très grande variété qui inclut la conception de gammes normalisées de machines destinée à la constitution d'un catalogue, mais aussi, ce qui

est de plus en plus fréquent de nos jours, la réponse à la commande d'un client pour une utilisation spécifique [5].

La caractérisation des machines asynchrones peut être formulée par une méthode de dimensionnement qui s'appuie sur les équations de la machine en tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et aboutit à une définition globale de la machine.

Le dimensionnement définitif, tel qu'il est pratiqué en utilisant les logiciels de CAO les plus courants, est ensuite décrit en exploitant les spécificités destinées aux machines asynchrones.

L'objectif principal de la conception d'un moteur à induction est d'obtenir les dimensions physiques complètes de toutes les pièces de la machine comme indiqué ci-dessous pour répondre aux spécifications du client. Les détails de conception suivants sont requis :

- les principales dimensions du stator,
- les détails des enroulements du stator,
- les détails de conception du rotor et de ses enroulements,
- et les caractéristiques de performance.

Pour obtenir les détails de conception ci-dessus, le concepteur a besoin des spécifications du client (Puissance de sortie nominale, tension nominale, nombre de phases, vitesse, fréquence, raccordement de l'enroulement du stator, type d'enroulement du rotor, conditions de travail, détails d'extension de l'arbre, ... etc).

En plus de ce qui précède, le concepteur doit avoir les détails concernant les équations de conception sur laquelle se base la procédure de calcul des divers paramètres, des informations sur la disponibilité de différents matériaux et les valeurs limites de divers paramètres de performance tels que les pertes de fer et de cuivre, le facteur de puissance, la hausse de température et le rendement.

I.8 Généralités sur la construction des moteurs asynchrones triphasés

Le moteur à induction est composé de deux pièces principales : l'une fixe et appelée stator et l'autre est tournante et nommée rotor (il a deux types, le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil). Les deux noyaux sont fabriqués à partir de tôles d'acier au silicium.

Le bobinage du rotor est accessible depuis la plaque à bornes dans le cas d'un rotor bobiné mais ce n'est pas possible sur le rotor à cage.

Les encoches du rotor d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux (voir figure I.2). Dans le cas des moteurs de faible puissance et même de puissance moyenne, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation. Toutefois, dans les petits moteurs de fabrication récente, on utilise plutôt des ailettes en plastique, étant donné que cette matière est beaucoup moins coûteuse que l'aluminium [7].

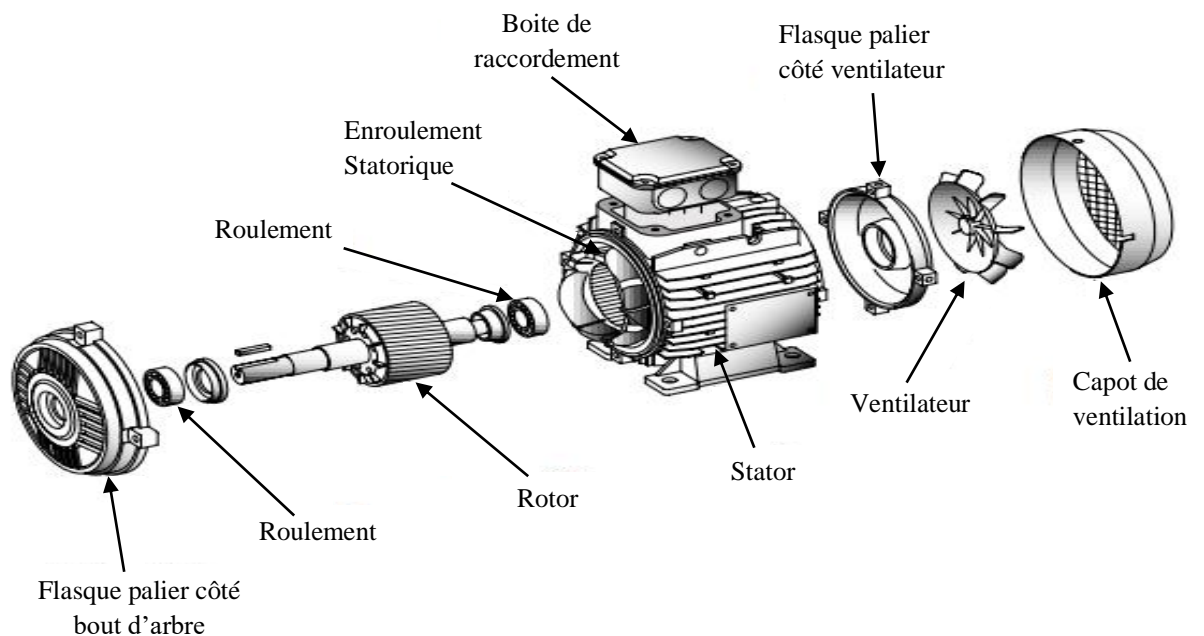


Fig. I.2 Vue éclatée d'un moteur asynchrone à rotor à cage

I.8.1 Stator

Le stator consiste en un empilement de tôles d'acier au silicium dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.50 mm. On utilise les tôles minces dans les moteurs pour lesquels on doit minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Dans le cas où le diamètre du moteur ne dépasse pas quelques centaines de millimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour les moteurs de grand diamètre, les tôles du stator et du rotor sont découpées par sections.

Afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on recouvre habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Dans ces conditions, le rapport entre l'épaisseur véritable d'acier et l'épaisseur physique de l'empilement de tôles, nommé coefficient de foisonnement, dépasse les 90 % [7].

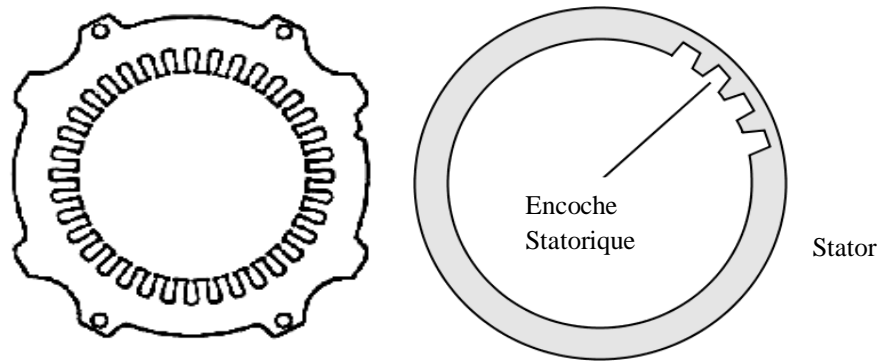


Fig. I.3 Section d'un stator d'un moteur asynchrone

I.8.2 Rotor

Tout comme le stator, le rotor est constitué de tôles ferromagnétiques empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un moyeu [7].

On distingue deux types de rotors :

I.8.2.1 Rotor à cage

Dans ce cas, les encoches sont habituellement du type semi-ouvert, mais on utilise parfois des encoches fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor (voir figure I.4). Les barres des gros moteurs sont généralement en cuivre ou, à l'occasion, en laiton. Par contre, les barres des petits moteurs sont en aluminium. On utilise de plus en plus le coulage d'aluminium pour des moteurs de plusieurs dizaines et même de quelques centaines de kilowatts. L'aluminium coulé permet de fabriquer les anneaux terminaux en même temps que les barres qui épousent la forme de l'encoche, qui peut être tout à fait quelconque. Puisque la tension induite dans les barres du rotor est faible, aucune isolation n'est requise entre les barres et les dents [8].

Pour former le rotor, on empile (en inclinant généralement) les laminations de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur. Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les sous harmoniques durant l'accélération et de donner un démarrage et une accélération plus uniforme et satisfaisante, en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge [8].

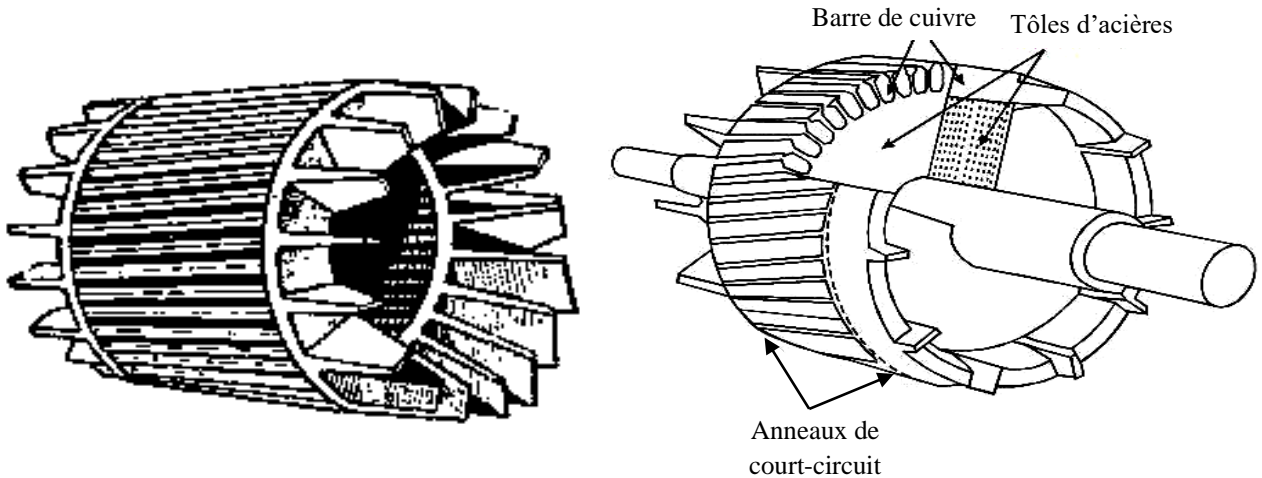
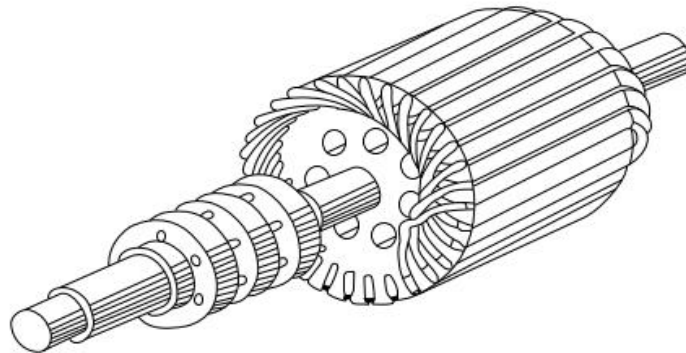


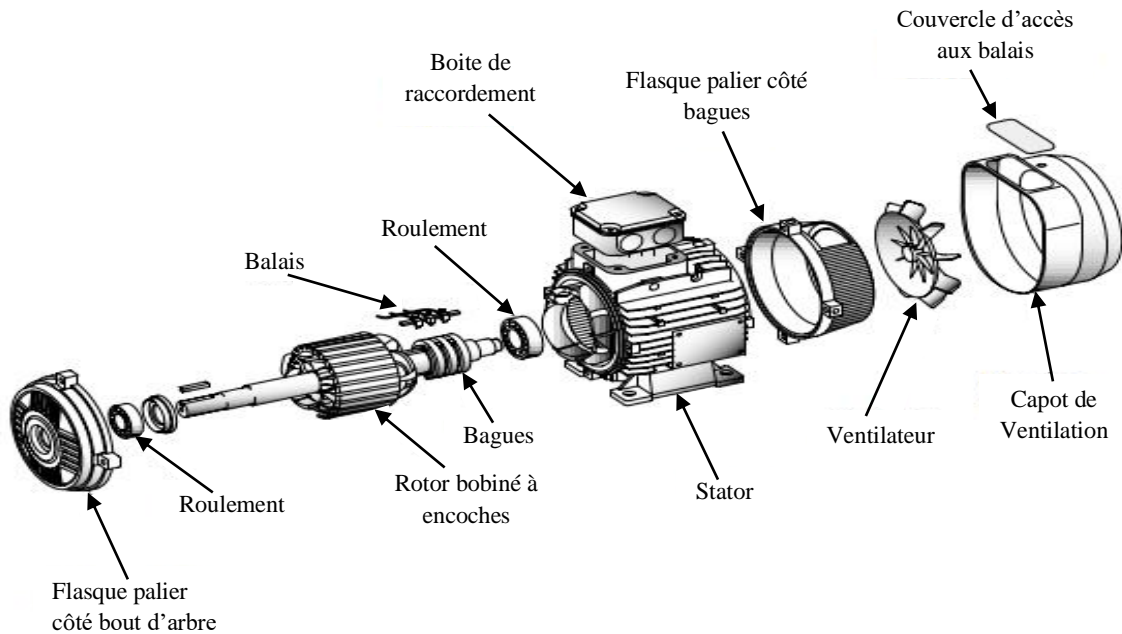
Fig. I.4 Rotor à cage d'un moteur asynchrone

I.8.2.2 Rotor bobiné

Ce type de rotor comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches (voir figure I.5). Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournante avec l'arbre. Ces bagues permettent par l'intermédiaire de trois balais, d'accéder aux circuits rotorique (par exemple, pour insérer des résistances extérieures en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur). En fonctionnement nominal les trois balais sont court-circuités [9].



a) Rotor bobiné



b) Vue éclatée

Fig. I.5 Rotor et vue d'un moteur à rotor bobiné

I.8.3 Bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements: l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators de moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus. Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique. L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues [10].

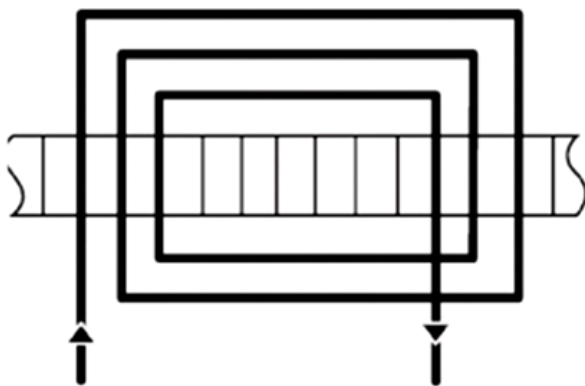
La disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul côté de bobine. L'enroulement imbriqué et l'enroulement ondulé peuvent être des bobinages à simple couche, mais sont plus souvent à double couche. Si tel est le cas, chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit nécessairement être un nombre pair. Il est possible de relier en série toutes les bobines de

l'enroulement pour une même phase, on obtient alors un moteur qui ne peut opérer que sous une seule tension [11].

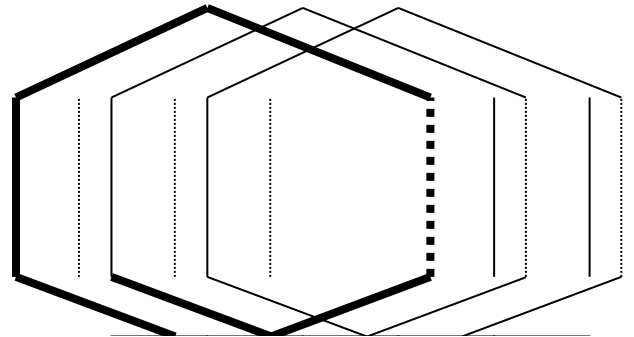
Par contre, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes à l'intérieur desquels elles sont connectées en série. Les groupes ainsi formés peuvent se relier en série ou en parallèle et permettre d'utiliser le moteur sous plusieurs tensions [12].

Lorsque les bobines sont faites de fils carrés ou rectangulaires d'assez forte section, elles sont formées sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes

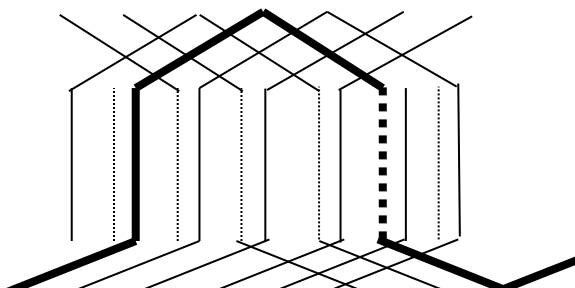
Dans le cas d'encoches de type semi-ouvert, on utilise habituellement plusieurs fils ronds, vernis et de faible section pour former les conducteurs des bobines. Comme les bobines faites de fils carrés, elles sont généralement formées sur des gabarits, mais introduites fil par fil ou quelques fils à la fois dans les encoches.



a) Enroulement concentrique



b) Enroulement imbriqué



c) Enroulement ondulé

Fig. I.6 Exemples d'enroulements d'un moteur asynchrone

I.8.4 Carcasse

La carcasse sert de support, joue le rôle d'enveloppe, assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'air de ventilation, elle agit aussi parfois comme échangeur thermique.

I.8.5 Circuit magnétique

Le couple développé dans une machine électrique est proportionnel au produit du flux magnétique par le courant induit. Il existe donc deux constituants principaux pour la partie active d'une machine: un ensemble de conducteurs chargé de véhiculer les courants et un circuit magnétique dont les fonctions principales sont [13]:

- la canalisation des lignes d'induction magnétiques,
- le maintien des conducteurs,
- la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement (canaux de ventilation, entrefer).

Le circuit magnétique doit donc présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques bien déterminées et une bonne conductivité thermique. Les pertes fer, par hystérésis et par courant de Foucault sont relativement importantes dans ce type de circuits, on utilise des tôles de faible épaisseur, à grande perméabilité et à pertes magnétiques réduites.

I.8.6 Arbre

L'arbre de la machine électrique est un organe de transmission du mouvement de rotation. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor, au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est lui-même supporté par un ou plusieurs paliers suivant la configuration de l'ensemble de la ligne d'arbre. Dans certains cas, l'arbre sert de soutien au collecteur, aux ventilateurs, aux bagues, au rotor, ainsi qu'à des accessoires variés [14].

I.8.7 Ventilateurs

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, ou inversement, ne peut s'effectuer sans pertes, l'énergie ainsi perdue étant transformée en chaleur. La ventilation a pour but d'extraire les pertes internes de leurs différentes sources et d'assurer un refroidissement aussi homogène que possible des bobinages.

On peut distinguer deux grands systèmes de ventilation :

- a) *Ventilation axiale* : Dans cette solution, et comme son nom l'indique, l'air circule suivant un chemin sensiblement parallèle à l'axe de la machine, il suffit de mettre le ventilateur à l'une des extrémités pour assurer le mouvement de l'air
- b) *Ventilation radiale* : Dans les grosses machines, on utilise la ventilation radiale symétrique, le fluide de refroidissement étant dirigé perpendiculairement à l'arbre [14].

I.8.8 Paliers

Les paliers soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers, l'autre palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre [11].

I.9 Classification des moteurs à cage

Les performances et caractéristiques statiques de la machine à induction sont illustrées par les allures de variations du couple, du courant, du rendement et du facteur de puissance par rapport au glissement, pour une tension et une fréquence statoriques données. Ces caractéristiques peuvent être influencées de plusieurs façons, parmi lesquelles on cite les influences de la saturation magnétique et de la température.

Il s'agit du couple à rotor bloqué (couple de démarrage), du couple de décrochage (couple maximal), du couple nominal, du courant de démarrage, du glissement critique, du rendement et du facteur de puissance pour des conditions de fonctionnement nominal, qui intéressent les fabricants et les utilisateurs.

Pour mettre un peu d'ordre (standardiser), *NEMA (National Electrical Manufacturers Association)* a défini cinq (5) conceptions pour la machine à induction à rotors de cage. Ils se distinguent essentiellement par la courbe de couple/vitesse générée par différentes formes d'encoches rotoriques (voir figure I.7) [15].

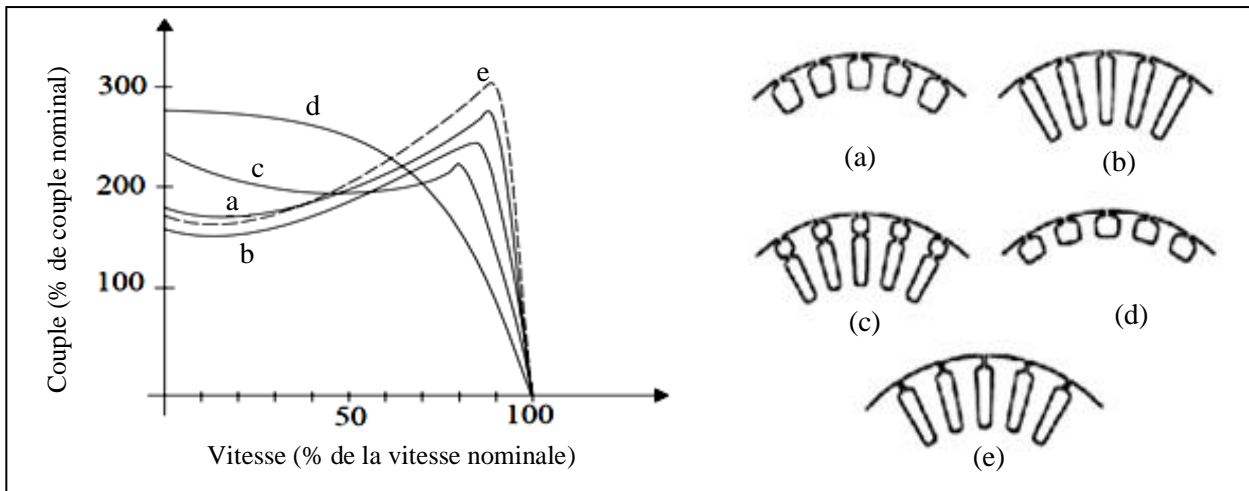


Fig. I.7 Caractéristiques normalisées des classes *NEMA* des moteurs asynchrones à cage et les formes d'encoches de rotorleur correspondant

I.9.1 Classe *a*

Le courant de démarrage de cette classe est plus grand que celui des moteurs de la classe (*b*) d'utilisation générale. Toutefois, le couple de démarrage et le couple de décrochage sont plus grands que ceux de la classe (*b*). Ces caractéristiques sont obtenues à cause de l'inductance de fuites plus faible, principalement dans le rotor, et l'effet de peau assez considérable. Des barres de rotor légèrement profondes provoquent ces effets, en général.

I.9.2 Classe *b*

Les moteurs de classe (*b*) sont conçus pour un courant à rotor bloqué minimal et pour s'assurer que la courbe de couple/vitesse d'une charge typique est dépassée sur toute la plage des glissements. Ceci permet une bonne accélération du moteur au démarrage tout au long du régime transitoire.

I.9.3 Classe *c*

Les moteurs de classe (*c*) présentent un très grand couple à rotor bloqué (plus grand que 200 % du couple nominal en général) au détriment d'un couple de décrochage inférieur et d'un rendement et facteur de puissance plus importants que les conceptions (*a*) et (*b*). Les courants de démarrage typiques sont également de 550% environ du courant nominal. Les applications avec un couple de décrochage très élevé tels que les convoyeurs sont typiques pour la classe (*c*). Des

barres assez profondes (de forme assez complexe) ou des cages doubles sont nécessaires sur le rotor pour produire cette classe de moteurs.

I.9.4 Classe *d*

Les moteurs à induction à cage de classe (*d*) sont caractérisés par un glissement critique élevé, et un courant de démarrage inférieur (450 % du courant nominal). Comme ils ont une caractéristique de couple/vitesse au-dessus de celle de la charge, cela signifie que le moteur accélérera le plus rapidement. En outre, les pertes totales d'énergie pendant l'accélération seront les plus faibles. De plus, la chaleur à évacuer sur le processus d'accélération de la charge sera moins stricte. Les rotors solides, faits de fer sans ou avec des fentes axiales ou des fentes avec des barres de cuivre sont candidats pour les moteurs de classe (*d*). Ils sont conçus à des applications où les accélérations fréquentes sont plus importantes que le fonctionnement en charge nominale. Les systèmes fonctionnant par acoups sont des applications typiques pour cette classe (*d*), ainsi que les applications à grande vitesse, aussi.

I.9.5 Classe *e*

Les moteurs à induction de classe *e* sont des moteurs à haut rendement (rendement de 1 à 4 % supérieur à celui des moteurs de classe (*b*) pour la même puissance et la même vitesse). Cette performance supérieure est payée par un volume plus important, un coût initial et un courant de démarrage plus élevé (jusqu'à 30 % de plus, en général). La densité de courant plus faible, l'effet de peau inférieur, et les inductances de fuites inférieures sont des caractéristiques typiques de ces moteurs de classe (*e*). Il a été démontré que même une augmentation de 1% du rendement d'un moteur de gamme de *kW* peut récupérer des économies d'énergie, dans une machine plutôt chargée, dans moins de 3 ans. Comme la durée de vie de la machine est de 10 à 15 ans, il est rentable d'investir davantage dans le moteur à induction de la classe (*e*) (plus grand en volume) dans de nombreuses applications.

L'augmentation du courant de démarrage imposera des réseaux électriques locaux d'être plus solides, ce qui aura tendance à augmenter légèrement le délai de récupération de trois ans susmentionné pour les moteurs de classe (*e*).

I.10 Méthodes de dimensionnement classique des moteurs asynchrones

Il existe de nombreuses méthodes classiques de dimensionnement des moteurs asynchrones. Chacune possède ses hypothèses et principes mais presque toutes aboutissent à des résultats très proches. En général, elles procèdent au dimensionnement du stator puis le calcul du rotor. Ensuite, les caractéristiques statiques et dynamiques sont calculées à l'aide des schémas équivalents de la machine.

Voici quelques-unes des méthodes les plus importantes pour le dimensionnement d'un moteur à induction :

I.10.1 Première Méthode

Cette méthode proposée par *Jufer* et *Sabonnadière*, repose sur les formules de dimensionnement du fer statorique, ensuite ils entament le calcul rotorique. Le dimensionnement du circuit magnétique, est basé sur les contraintes suivantes :

- Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à limiter les chutes de potentiel et les pertes fer, tout en diminuant le volume et la masse du fer, puis définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique ;
- Le diamètre d'alésage et la longueur active sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution est considérée sinusoïdale [5].

I.10.2 Deuxième Méthode

Cette méthode a été utilisée à l'école polytechnique de *Montréal* au *Canada*. C'est une méthode à but didactique, elle suggère et offre une certaine marge de manœuvres, des compromis doivent être faits pour le choix de certains paramètres comme le diamètre d'alésage du moteur par exemple, le résultat obtenu doit quelquefois faire l'objet de changement afin de satisfaire les exigences visées. Cette méthode inclue aussi les dispersions due à la disposition des encoches rotoriques [10].

I.10.3 Troisième Méthode

Cette procédure réunit le calcul et la conception assistée par ordinateur d'une machine à induction, empruntant différentes phases de calcul suivant un ordre chronologique. Elle est basée sur le principe de conception de *Kouskoff* et *Liwschitz* sauf que les données géométriques d'une machine industrielle déjà existante sont imposées comme contraintes auxquelles nous devons nous soumettre. Les résultats numériques du calcul sont comparés avec ceux donnés par la méthode des essais classiques puis traités par une analyse dynamique simulée du comportement de la machine en vue de mettre au point la corrélation et la concordance de ces résultats de conception avec ceux délivrés par le constructeur du moteur à induction étudié [16].

I.10.4 Quatrième méthode

Cette méthode (dite de *Liwschitz*) est une approche analytique qui permet le dimensionnement des différentes parties de la machine : stator, rotor, électrique, magnétique. Elle est basée sur des formules empiriques et des abaques.

La première étape de conception consiste à définir le cahier des charges en déterminant les différents points de fonctionnement. Le choix de la structure de la machine dépend du cahier des charges et de l'application à laquelle est destinée cette machine. On calcule d'abord les dimensions géométriques des machines à l'aide des lois de conservation du flux dans différentes parties de la machine en utilisant des équations analytiques. Généralement, la méthode de conception est un processus itératif qui sert à comparer les différentes solutions possibles. Dans la deuxième étape, on estime le niveau de saturation des circuits magnétiques du moteur et les inductions dans les différentes parties pour calculer les pertes magnétiques et les pertes par effet Joule. Ensuite les paramètres du schéma équivalent sont calculés. Ceci permet d'obtenir le couple que le moteur peut fournir et le courant absorbé. Et enfin, on peut évaluer le rendement dans toutes les conditions de fonctionnement [17].

Cette méthode sera développée dans le prochain chapitre, en se basant sur des calculs analytiques et empiriques dédiés au dimensionnement du moteur asynchrone à cage.

I.11 Méthodes modernes de la CAO des moteurs asynchrones

Plusieurs outils ont été développés pour réaliser une CAO moderne des machines électriques. Nous allons présenter brièvement, le principe de base de ces outils et les différents types, que ce soient ceux concernant le choix de la structure à concevoir, ou ceux du dimensionnement de la structure choisie [14].

I.11.1 Outils d'aide au choix de la structure de la machine à concevoir

Cette étape est difficile à programmer car, il s'agit de faire une collecte de connaissances et d'intégrer l'expérience, le savoir-faire et la créativité. On peut simplifier cette étape, en mettant en place une base de données qui regroupe l'ensemble des solutions qui existent pour des problèmes typiques et leurs caractéristiques respectives. Une comparaison des performances et des caractéristiques requises par le cahier des charges avec celles de la base de données permet de choisir systématiquement la structure la plus adaptée du dispositif à concevoir [18].

I.11.2 Outils de dimensionnement de la structure du moteur à concevoir

Les outils mis en œuvre pour assister le concepteur à dimensionner la structure choisie d'un dispositif peuvent être regroupés en trois familles. Ils partent tous d'un modèle mathématique d'une structure de base préalablement choisie dans la première étape de la CAO d'un dispositif, mais ils utilisent des approches différentes pour dimensionner la structure en 'inversant' le modèle de base [18].

I.11.2.1 Outil de dimensionnement par une approche procédurale

Cette approche consiste à développer une procédure qui traite les équations dans un ordre logique et ramène ponctuellement le dimensionnement à une suite de problèmes mathématiques simples ne demandant pas d'algorithmes numériques lourds et compliqués. Elle part d'un modèle mathématique assez simplifié et, au fur et à mesure, on fait des tests et des boucles pour rectifier des choix non judicieux ou corriger des calculs afin d'améliorer le dimensionnement. Ces procédures, sont suffisamment décrites dans les ouvrages habituels de dimensionnement des machines électriques. De plus, on trouve des logiciels dédiés qui assurent ce genre de CAO basée sur des méthodes classique mais développés sous forme de logiciels de CAO modernes tel que *ANSYS-RMxpert* que nous allons présenter et utilisé pour la CAO d'un moteur asynchrone triphasé à cage (voir chapitre III) [18].

I.11.2.2 Outils de dimensionnement utilisant des systèmes experts

Une approche de dimensionnement basée sur des techniques de l'intelligence artificielle est un système expert qui peut reproduire le raisonnement d'un expert en prenant une décision vis à vis d'un problème de conception quelconque. Cette discipline, à part d'aide au dimensionnement des dispositifs, englobe toutes les connaissances et les règles nécessaires à une procédure de conception d'une catégorie de dispositifs bien déterminée. En d'autres termes, cette approche projette une reproduction de la procédure de conception telle qu'elle est pratiquée par un expert en la matière [18].

I.11.2.3 Outils de dimensionnement à l'aide d'algorithmes d'optimisation

Une autre alternative très utilisée comme outil d'aide au dimensionnement des machines électriques est basée sur des algorithmes d'optimisation. En effet, dans le cas où le cahier des charges est réalisable, il existe en général une infinité de solutions à un problème de dimensionnement donné. N'est-il pas intéressant dans ces conditions de rechercher la meilleure conception en optimisant une performance ou une caractéristique du dispositif à dimensionner tels que le rendement, le coût, le facteur de puissance, ...etc [18].

I.11.2.4 Outils numériques de dimensionnement des machines électriques

Ces modèles résolvent directement les équations physiques de base du système à dimensionner, avec un faible niveau d'hypothèses, mais en utilisant des algorithmes numériques lourds. Ils fournissent des valeurs de potentiels (magnétiques, électriques ou thermiques) en des points de la structure. On en déduit des grandeurs macroscopiques ou globales (couple, puissance, rendement, ...etc.) d'un moteur par exemple. Les méthodes des éléments finis est un exemple de méthode numérique largement utilisée, permettant une modélisation locale des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques ou thermiques.

Ces modèles présentent les avantages suivants :

- ils sont précis, car ils peuvent tenir compte des phénomènes locaux et ce d'autant plus que le maillage de la structure est plus fin ;
- ils se présentent le plus souvent sous forme de logiciels génériques (*FLUX2D*, *3D*, *MAXWELL 2D & 3D*, ... etc.) ou de modules (*PDETOOL* de *MATLAB*) dans lesquels on

ne fait que décrire la structure géométrique et ses propriétés physiques ; ainsi le temps de développement est plutôt court.

En outre, ils présentent les inconvénients suivants :

- ils sont lents à cause de la lourdeur des calculs mis en œuvre et du fait qu'ils nécessitent au départ un maillage de la structure ;
- ils n'offrent pas de lien explicite entre les paramètres car ils se présentent comme une boîte noire abstraite.

Dans ce travail, nous allons nous baser sur l'un de ces outils puissants (*ANSYS-Maxwell-2D*) pour valider la conception du moteur asynchrone triphasé à cage étudié [18].

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé l'historique, les principes de base et la construction du moteur asynchrone. Ensuite, nous avons passé en revue les différentes méthodes utilisées pour la CAO de ce type de machines électriques, qui est le plus répandu.

Dans les chapitres suivants, nous allons mener une étude concernant la CAO d'un moteur asynchrone triphasé à cage, en passant par son dimensionnement préliminaire, sa caractérisation par un logiciel de calcul analytico-numérique des machines électriques et en finalisant cette opération de conception par sa validation en utilisant un calcul par éléments finis à l'aide du logiciel *ANSYS-Maxwell-2D*.

CHAPITRE II :
Dimensionnement
Préliminaire d'une Moteur
Asynchrone Triphasé à Cage

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la détermination de toutes les dimensions géométriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer d'un moteur asynchrone triphasé à cage, selon un cahier des charges bien déterminé tout en respectant les critères technico-économiques exigés.

Afin d'atteindre cet objectif de dimensionnement préliminaire d'un moteur asynchrone avec le respect du cahier de charge et la satisfaction des exigences du client, nous prenons en compte plusieurs caractéristiques qui affectent l'efficacité du produit final. Pour ce faire, nous devons concilier plusieurs paramètres qui peuvent être contrôlés dans une plage bien définie.

Dans le cadre d'expériences et de conceptions antérieures, les ingénieurs ont accumulé des informations suffisantes pour déterminer la portée des modifications des paramètres permettant la fabrication d'un produit à haut rendement, à moindre coût et de petite taille. De nombreuses méthodes peuvent être suivies pour atteindre cet objectif mais nous nous intéressons à la méthode classique de *Liwschitz* [3].

Ainsi, dans ce chapitre, nous allons présenter les équations utilisées pour dimensionner un moteur asynchrone triphasé, y compris les équations empiriques et celles basées sur des théories, et ceci pour le calcul des dimensions géométriques de la machine (stator, rotor, encoches, entrefer, ...etc.). Le calcul des caractéristiques électriques et magnétiques sera effectué au chapitre suivant en utilisant un logiciel dédié.

II.2 Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage

Le premier calcul des dimensions géométriques d'un moteur à induction est la phase la plus complexe de sa conception. En effet, en partant de presque rien, le programme de calcul doit proposer une géométrie partiellement optimisée, l'optimum étant toujours un compromis entre des qualités techniques et économiques.

On distingue, dans le cas général, l'ensemble des étapes principales suivantes d'un processus de conception d'une machine électrique. Il est appliqué directement aux moteurs asynchrones, mais il est également applicable à la conception d'autres types de machines avec des modifications mineures [21].

1. Lecture des données initiales (Données du cahier des charges)
2. Calcul des dimensions principales (diamètre D et longueur équivalent l')
3. Calcul de l'entrefer
4. Sélection et paramétrage des enroulements
5. Calcul de l'induction dans l'entrefer
6. Détermination du nombre de spires statoriques et sélection du facteur de saturation
7. Calcul de la nouvelle induction d'entrefer
8. Détermination de la largeur des dents statoriques et rotoriques
9. Détermination des dimensions de l'encoche
10. Détermination des forces magnétomotrices (tensions magnétiques) de l'entrefer, des dents du stator et du rotor
11. Détermination du nouveau facteur de saturation (revenir à l'étape 7 si nécessaire)
12. Détermination de la hauteur des culasses statorique et rotorique, des forces magnétomotrices (tensions magnétiques) des dos (statorique et rotorique) et des diamètres intérieurs du rotor et extérieur du stator.

II.3 Présentation des étapes de dimensionnement d'un moteur asynchrone

Dans cette section, nous allons présenter brièvement les étapes principales de dimensionnement préliminaire d'un moteur asynchrone triphasé à cage, en partant d'un cahier de charge bien déterminé.

Nous allons nous consacrer plus particulièrement au calcul des dimensions principales et des grandeurs caractérisant le dimensionnement des dents et des encoches et le flux magnétique, pénétrant dans celles-ci. Ce calcul exige la détermination successive des paramètres, par le biais de certaines formules et caractéristiques prises lors de plusieurs expériences élaborées avec les moteurs répondant à un fonctionnement normal [21].

II.3.1 Cahier des charges et données initiales

Dans ce travail, nous allons considérer un cahier des charges allégé dans lequel sont spécifiées les caractéristiques suivantes :

- Type de la machine (Moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil) ;
- Puissance de sortie nominale ;
- Tension et fréquence d'alimentation ;
- Vitesse de rotation nominale (et nombre de pôles).

Le cahier des charges comprend implicitement toutes les équations empiriques et les limitations technico-économiques exigées sur les dimensions et les grandeurs électromagnétiques et mécaniques de la machine.

II.3.2 Détermination des dimensions principales de la machine

Les valeurs typiques de la contrainte tangentielle à la surface du rotor nous donnent un point de départ pour la conception d'une machine électrique. On peut d'abord définir la taille du rotor en utilisant une valeur de contrainte tangentielle appropriée sur sa surface génératrice. Nous avons :

$$\sigma_{F_{\tan}} = \frac{\hat{A}\hat{B}_{\delta} \cos \zeta}{2} = \frac{A\hat{B}_{\delta} \cos \zeta}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.3})$$

Où A est la densité linéaire du courant, \hat{B}_{δ} est l'amplitude de l'induction dans l'entrefer et ζ est le déphasage entre ces deux grandeurs.

Si r_r est le rayon du rotor l' est sa longueur équivalente, alors la surface du rotor en face de l'entrefer est S_r et la contrainte tangentielle moyenne à la surface est $\sigma_{F_{\tan}}$. On peut ainsi exprimer le couple T par :

$$T = \sigma_{F_{\tan}} r_r S_r = \pi \sigma_{F_{\tan}} \frac{D_r^2}{2} l' \quad (\text{II.4})$$

D'autre part, procédons au dimensionnement du volume rotorique de la machine en fonction de sa puissance. La puissance apparente nominale S_n pour des machines à champ tournant avec une vitesse $n_{syn} = \frac{f}{p}$ est $S_n = m E_m I_{sn}$.

On peut montrer que :

$$S_n = m \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \hat{\psi}_m I_{sn} = m \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \hat{\phi}_m I_{sn} \quad (\text{II.5})$$

Où N est le nombre des spires du stator en série par phase et $\hat{\phi}_m$ est le flux maximal d'une phase, il peut être exprimé par :

$$\hat{\phi}_m = l' \tau_p \alpha_i \hat{B}_\delta \quad (\text{II.6})$$

Le produit $\alpha_i \hat{B}_\delta$ représente la valeur moyenne de l'induction sous un pôle dans l'entrefer.

Dans le cas d'une distribution sinusoïdale, $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$.

Par ailleurs, la densité linéaire du courant statorique peut être exprimée par :

$$A = \frac{2 I_{sn} N m}{\pi D} \quad (\text{II.7})$$

D'où :

$$S_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega k_w \hat{\phi}_m \frac{A \pi D}{2} \quad (\text{II.8})$$

Avec : $D \approx D_s \approx D_r$ et $\omega = 2p\pi n_{syn}$.

On obtient alors :

$$S_n = \frac{1}{\sqrt{2}} 2 p \pi n_{syn} k_w \frac{\pi D_s}{2p} \frac{2}{\pi} \hat{B}_\delta l' \frac{A \pi D}{2} \quad (\text{II.9})$$

Donc :

$$S_n = m E_m I_{sn} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} n_{syn} k_w \hat{B}_\delta l' A D^2 \quad (\text{II.10})$$

$$S_n = C l' D^2 n_{syn}$$

La constante C concerne les machines à champ tournant (machines synchrones et asynchrones), elle est normalisée et peut être choisie empiriquement (à partir des abaques dédiées par exemple).

Maintenant, la constante de la machine liée à la puissance mécanique P_{mec} peut être introduite ainsi pour les machines à courant alternatif :

$$\begin{aligned}
 P_{mec} &= \eta m U I \cos \varphi = \eta \cos \varphi \frac{U}{E_m} S_n & (II.11) \\
 &= C_{mec} l' D^2 n_{syn}
 \end{aligned}$$

Dans les machines électriques standards, le rapport entre la longueur équivalente de la machine et le diamètre de l'entrefer ($\chi = \frac{l'}{D}$) peut être calculé empiriquement ou choisi dans des limites assez serrées en fonction du nombre de pôles. Dans le cas des machines asynchrones, on peut choisir :

$$\chi = \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p} \quad (II.12)$$

Ainsi, le diamètre intérieur du stator peut être déduit de la relation suivante (après avoir choisi la constante C_{mec} en fonction de la puissance de la machine par nombre de pôles) :

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_{mec}}{C_{mec} n_{syn} \chi}} \quad (II.13)$$

Ce qui permet de calculer la longueur équivalente de l'induit, en connaissant D et χ , ainsi :

$$l' = \chi D \quad (II.14)$$

En tout cas, le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator (χ) doit être convenablement choisi. En effet, s'il est trop petit, la machine aura un bon refroidissement et un montage plus facile des enroulements ; mais aura un grand diamètre donc un grand flux, ce qui conduit à une consommation très élevée de cuivre. En contre partie, si ce rapport est élevé, le moment d'inertie de la machine est plus petit et la quantité du cuivre des parties frontales est plus faible. Pratiquement, ce facteur est choisi dans l'intervalle [0.5 0.8].

II.3.3 Détermination de l'entrefer de la machine

Pour des raisons mécaniques et pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ et de la dispersion provoquée par les champs d'harmoniques d'ordres supérieurs, on choisit un entrefer aussi grand que possible.

Par contre, ce même entrefer doit être choisi aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité et un courant magnétisant minimal.

Dans l'ensemble, l'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Généralement, on utilise des équations empiriques pour définir ce paramètre clé (δ) d'une machine asynchrone. Celui-ci peut être calculé à 50 Hz (ou 60 Hz) en millimètres en fonction de la puissance de la machine en Watts selon l'équation empirique suivante [8] :

$$\delta = \begin{cases} 0.2 + 0.01P^{0.4} & \text{si } p = 1 \\ 0.18 + 0.006P^{0.4} & \text{si } p > 1 \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Où P est la puissance de la machine et p est le nombre de paires de pôles.

Ce qui nous permet de calculer le diamètre intérieur du stator ($D_s = D + \delta$) et extérieur du rotor ($D_r = D - \delta$), en supposant que (D) est le diamètre moyen de l'entrefer.

II.3.4 Choix et calcul de l'enroulement de la machine

Dans cette étape, on doit sélectionner un enroulement approprié pour le stator (et le rotor) de la machine. Pratiquement, certaines recommandations doivent être prises en compte pour le choix du pas dentaire (à choisir dans l'intervalle [7 45] mm) et du nombre d'encoches statoriques (et rotoriques).

Ensuite, le choix du nombre d'encoches statoriques (Q_s) s'effectue en respectant les contraintes suivantes sur le pas dentaire :

$$Q_{Smax} = \frac{\pi D_s}{t_{1min}} \quad \text{et} \quad Q_{Smin} = \frac{\pi D_s}{t_{1max}} \quad (\text{II.16})$$

Et en fonction de (Q_s) et du nombre de pôles, il y a des tableaux qui proposent des valeurs adéquates de (Q_r). Par exemple, si $2p=4$ on a :

- Si $Q_s=36$ alors $Q_r=24, 30, 40, 42, 44$ ou 60 ;
- Si $Q_s=48$ alors $Q_r=44, 56, 60$ ou 84 ;
- Et si $Q_s=60$ alors $Q_r=44, 48, 72$ ou 84 .

Ensuite, on peut calculer le coefficient de bobinage statorique. Il est défini comme étant le produit du coefficient de distribution et du coefficient de raccourcissement (et du coefficient d'inclinaison s'il y a lieu) :

$$k_{ws1} = k_{dist1} k_{rac1} (k_{incl1}) \quad (\text{II.17})$$

Où le coefficient de distribution est calculé comme suit :

$$k_{dist1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q_s \sin\left(\frac{\pi}{2mq_s}\right)} \quad (\text{II.18})$$

Et le coefficient de raccourcissement (β étant le degré de raccourcissement du pas diamétral) est donné par la formule suivante :

$$k_{rac1} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \quad (\text{II.19})$$

En outre, le coefficient d'inclinaison des encoches rotoriques est donné par la formule suivante :

$$k_{incl1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi s q_s}{2 m q_s}\right)}{\frac{\pi s q_s}{2 m q_s}} \quad (\text{II.19})$$

Où s_{q_s} est l'inclinaison en termes du pas dentaire statorique.

Par ailleurs, le pas polaire (statorique, rotorique) exprimé en nombre d'encoches est donné par :

$$\tau_{s1} = \frac{Q_s}{2p} ; \tau_{r1} = \frac{Q_r}{2p} \quad (\text{II.20})$$

Et le pas polaire proprement dit (qui est la distance entre deux pôles voisins de natures différentes) est donné par l'expression suivante :

$$\tau_s = \frac{\pi D_s}{2p} ; \tau_r = \frac{\pi D_r}{2p} \quad (\text{II.21})$$

De sa part, le pas dentaire, défini comme étant la distance entre les axes de deux encoches voisines, est donné par la relation suivante :

$$t_s = \frac{\pi D_s}{Q_s}; t_r = \frac{\pi D_r}{Q_r} \quad (\text{II.22})$$

II.3.5 Induction dans l'entrefer et nombre de spires statoriques

Tout d'abord, nous devons choisir une induction d'entrefer (dans une fourchette recommandée, $[0.7 \text{ } 0.9] T$) qui donne une densité de courant linéaire statorique appropriée (appartenant à $[30 \text{ } 60] \text{ kA/m}$ dans le cas des machines asynchrones). Ensuite, on peut calculer le nombre de conducteurs statoriques de la machine.

En effet, le nombre de spires en série par phase statorique peut être exprimé par :

$$N = \frac{\sqrt{2}E_m}{2\pi f l' k_{ws1} \alpha_i \beta_\delta \tau_s} = \frac{\sqrt{2}k_e V_s}{2\pi f l' k_{ws1} \alpha_i \beta_\delta \tau_s} \quad (\text{II.23})$$

Où k_e est un coefficient qui définit le rapport entre la tension de phase statorique (V) et la f.e.m interne induite par phase de la machine (E_m). Il est choisit dans $[0.93 \text{ } 0.98]$ dans le cas des moteurs asynchrones. En outre, α_i est un coefficient qui représente la moyenne arithmétique de l'induction magnétique sous un pôle, elle vaut ($\alpha_i = 2/\pi$) dans le cas d'une distribution d'induction sinusoïdale.

Ainsi, on peut déterminer le nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$q_s = \frac{Q_s}{2mp} \quad (\text{II.24})$$

En outre, après avoir choisi la densité de courant (dans l'intervalle $[3 \text{ } 8] \text{ A/mm}^2$) et le nombre de voies en parallèle de l'enroulement ($a \in [1, p]$), on peut calculer le nombre de conducteurs par encoche et par phase par la formule suivante :

$$n_{cs} = \frac{2amN}{Q_s} \quad (\text{II.25})$$

Ça devrait être un entier, sinon sa valeur est arrondie au nombre entier le plus proche, puis on recalcule le nombre effectif des spires N ainsi :

$$N = \frac{n_{cs} Q_s}{2am} \quad (\text{II.26})$$

Dans cette étape, on doit s'assurer aussi que l'induction de l'entrefer est toujours dans les limites admissibles en se basant sur (II.23).

Après avoir définitivement choisi le nombre de conducteurs effectif, on passera à la vérification de la validité de la charge linéaire (A) qui est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie du stator.

II.3.6 Dimensionnement des dents et des encoches

Les dents et encoches statoriques et rotoriques sont dimensionnées comme suit :

- On calcule d'abord la largeur de la dent en se basant sur la conservation du flux à travers le pas dentaire et en tenant compte des limites imposées sur l'induction magnétique dans cette zone statorique ou rotorique (choisir $\hat{B}_{ds} \in [1.4 \ 2.1] T$ pour le stator et $\hat{B}_{dr} \in [1.5 \ 2.2] T$ pour le rotor). On peut écrire alors :

$$b_{ds} = \frac{\tau_s \hat{B}_\delta}{k_{Fe} \hat{B}_{ds}} \quad (\text{II.27})$$

Et :

$$b_{dr} = \frac{\tau_r \hat{B}_\delta}{k_{Fe} \hat{B}_{dr}} \quad (\text{II.28})$$

Où k_{Fe} est le facteur d'empilement (ou de foisonnement) des tôles ferromagnétiques.

- Ensuite on s'intéresse aux autres dimensions des encoches en se basant principalement sur la forme de celles-ci (voir figure II.1) et sur la densité de courant dans le cuivre (ou l'aluminium, pour la cage rotorique dans certains cas). Généralement, on choisit $J_s \in [3 \ 8] A/mm^2$ pour le cuivre et $J_r \in [3 \ 6.5] A/mm^2$ pour l'aluminium.

Les dimensions (b_1 , h_1 , h_2 , h_3 , h_6 , et h' pour la forme (a) et b_1 , h_1 , et h_2 pour la forme (b)) sont choisies en se basant sur des considérations techniques.

Ainsi, on donne l'expression suivante de la largeur minimale de l'encoche statorique :

$$b_{4c} = \frac{\pi(D_s+2)(h_1+h_2+h_3)}{Q_s} - b_{ds} - 2h_6 \quad (\text{II.31})$$

De même, on donne l'expression de la largeur maximale de l'encoche statorique :

$$b_{5c} = \frac{\pi(D_s+2)(h_1+h_2+h_3+h_5)}{Q_s} - b_{ds} - 2h_6 \quad (\text{II.32})$$

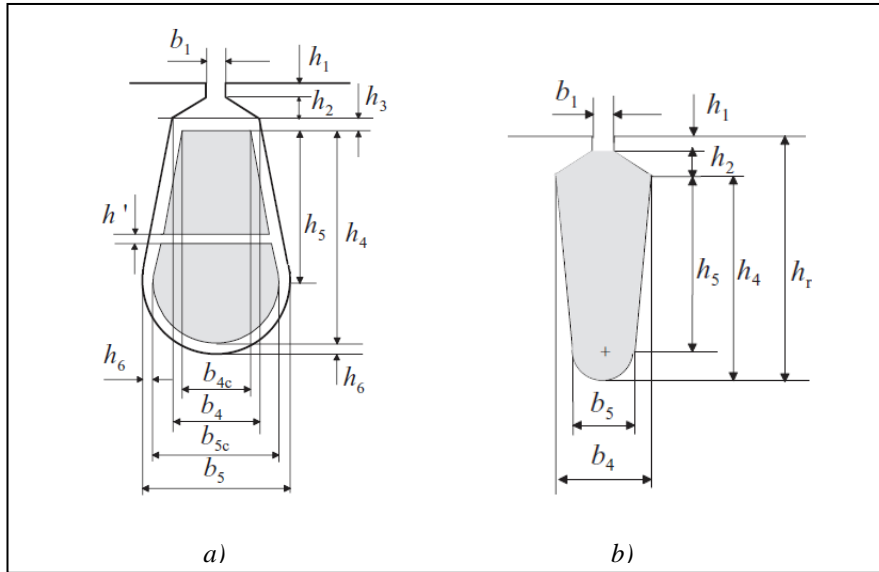


Figure II.1 Exemples de formes d'encoches : a) statoriques, b) rotoriques

- La hauteur de l'encoche (dépendant essentiellement de h_5) est calculée de façon à respecter une certaine densité de courant statorique à choisir dans la limite admissible. Sachant que le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle [0.5 0.7].

De même, les dents et encoches rotoriques sont dimensionnés comme suit :

- L'expression de la largeur maximale de l'encoche rotorique est la suivante :

$$b_4 = \frac{\pi(D_r+2)(h_1+h_2)}{Q_r} - b_{dr} \quad (\text{II.33})$$

- L'expression de la largeur minimale de l'encoche rotorique est la suivante :

$$b_5 = \frac{\pi(D_s+2)(h_1+h_2+h_5)}{Q_s} - b_{dr} \quad (\text{II.34})$$

- La hauteur de l'encoche rotorique (dépendant de h_4 et h_5) est calculée de façon à respecter une certaine densité de courant dans les barres du rotor à choisir dans la limite admissible.

II.3.7 Détermination des forces magnétomotrices et vérification de l'état magnétique

Dans cette, étape nous déterminons les forces magnétomotrices (tensions magnétiques) de l'entrefer, des dents du stator et du rotor. Puis, nous calculons le nouveau facteur de saturation α_i (ici on revient à l'étape de l'induction d'entrefer si la machine est très saturée ou mal aimantée).

La force magnétomotrice totale (de l'entrefer, de la dent statorique et de la dent rotorique) est calculée approximativement d'après la formule suivante :

$$U_m = U_{m\delta} + U_{m_{ds}} + U_{m_{dr}} = 2H_\delta\delta_c + 2H_{ds}h_{ds} + 2H_{dr}h_{dr} \quad (\text{II.35})$$

Où δ_c est l'entrefer équivalent calculé pour tenir en compte de l'effet des encoches en utilisant le coefficient de Carter.

Si on veut calculer avec précision cette grandeur (force magnétomotrice), on doit passer par une intégrale des ampères-mètres tout au long du trajet du flux ou encore utiliser une somme développée aux différents niveaux et sections des encoches statoriques et rotoriques.

Maintenant, on peut calculer le coefficient de saturation qui reflète l'état magnétique de la machine ainsi :

$$k_{sat} = \frac{U_{m_{ds}} + U_{m_{dr}}}{U_{m\delta}} \quad (\text{II.36})$$

Ce coefficient est corrélé à α_i qui est égal 0.64 (k_{sat} proche de zéro) pour une machine non saturée et 0.77 (k_{sat} dépasse l'unité) pour une machine trop saturée.

II.3.8 Hauteurs des dos et diamètres statorique et rotorique

Dans ce qui suit nous allons présenter brièvement la méthode de dimensionnement des dos statoriques et rotoriques et du calcul de leurs forces magnétomotrices. Et enfin, on déduit le diamètre extérieur du stator et le diamètre intérieur du rotor.

Tout d'abord nous allons choisir des niveaux d'induction magnétique dans ces deux zones de la machine en respectant les limites imposées sur cette grandeur dans le dos statorique ou rotorique ($\hat{B}_{ys} \in [1.4 \ 2] T$ et $\hat{B}_{yr} \in [1 \ 1.9] T$). Ensuite, on calcule les hauteurs des culasses statorique et rotorique ainsi :

$$h_{ys} = \frac{\hat{\phi}_m}{2k_{Fe}l\hat{B}_{ys}} \quad (\text{II.37})$$

$$h_{yr} = \frac{\hat{\phi}_m}{2k_{Fe}l\hat{B}_{yr}} \quad (\text{II.38})$$

Maintenant, on peut calculer les forces magnétomotrices de ces zones de la machine et on en déduit le coefficient de saturation total de la machine.

Et finalement, on calcule le diamètre extérieur du stator et le diamètre intérieur du rotor par les deux équations suivantes :

$$D_{se} = D_s + 2(h_s + h_{ys}) \quad (\text{II.39})$$

$$D_{ri} = D_r - 2(h_r + h_{yr}) \quad (\text{II.40})$$

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé brièvement les étapes de dimensionnement préliminaire d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. L'algorithme de dimensionnement préliminaire du moteur étudié a été mis en œuvre sous forme d'un programme de calcul nous permettant d'établir une esquisse de la conception de cet actionneur. L'objectif c'est de calculer seulement les paramètres géométriques.

La caractérisation détaillée de cette même machine sera effectuée en utilisant un logiciel dédié : l'outil *ANSYS-RMxprt* qui repose lui aussi sur une méthode de calcul analytique développé. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III :
CAO d'un moteur à Induction
sous ANSYS-RMxprt

III.1 Introduction

En partant d'une conception esquisse et préliminaire, *RMxpert* est un outil de conception rapide des machines électriques, basé sur des modèles analytiques, qui permet de calculer les performances statiques des différentes machines électriques et la création d'un projet (géométries *2D* et *3D*, milieux de matériaux différents et conditions aux limites) destinées aux calculs détaillés par éléments finis sous *Maxwell* (*2D* ou *3D*). Cet outil peut également être utilisé pour simuler, analyser et optimiser la conception des différents types de machines électriques.

Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer sur la présentation de cet outil *ANSYS-RMxpert* et son utilisation pour la conception et la caractérisation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil de 30 kW pré-dimensionnée par la méthode classique au deuxième chapitre.

III.2 Présentation de *RMxpert*

RMxpert (Rotating Machine Expert) est un outil de conception des différentes machines électriques de la suite *ANSYS –Maxwell*, qu'on peut utiliser pour le design de machines personnalisé afin de répondre à un cahier de charge bien déterminé. En utilisant la théorie analytique classique des machines électriques basée sur des circuits électromagnétiques équivalents, Il peut calculer les performances de la machine, prendre des décisions de dimensionnement et effectuer de nombreuses analyses. De plus, cet outil est en mesure de configurer automatiquement un projet *Maxwell* complet (*2D /3D*) comprenant la géométrie, les matériaux et les conditions limites. Ceci peut comprendre les symétries, les excitations appropriées, la topologie du circuit de couplage pour une éventuelle analyse électromagnétique transitoire.

Dans ce qui suit, nous allons décrire les différentes étapes de *CAO* d'une machine électrique sous cet environnement *RMxpert* [24].

III.2.1 Création d'une nouvelle conception *RMxpert*

Pour créer un nouveau projet sous *RMxpert*, il suffit de :

1. Cliquez sur '*Fichier > Nouveau*', un nouveau projet est répertorié dans l'arborescence du projet. Il est nommé par défaut *Project*, où *n* est la commande dans lequel le projet a été ajouté à la session en cours.

2. Ou bien cliquez sur 'Projet > Insérer une conception RMxprt' ou cliquez sur l'icône 'RMxprt' dans la barre d'outils. Ainsi, la fenêtre 'Sélectionner un type de machine' apparaît.

III.2.2 Fenêtre de sélection du type de machine

La figure III.1 comprend toutes les machines tournantes AC et DC possibles et prises en charge par RMxprt. Chaque machine ayant ses propres dimensions géométriques, ses spécifications électromagnétiques et propriétés mécaniques prédéfinies. En sélectionnant n'importe quel type de machines, une interface utilisateur graphique (qui comprend cinq fenêtres et quatre barres d'outils chacune ayant des fonctions différentes, la plus importante est la fenêtre du projet) s'ouvre.

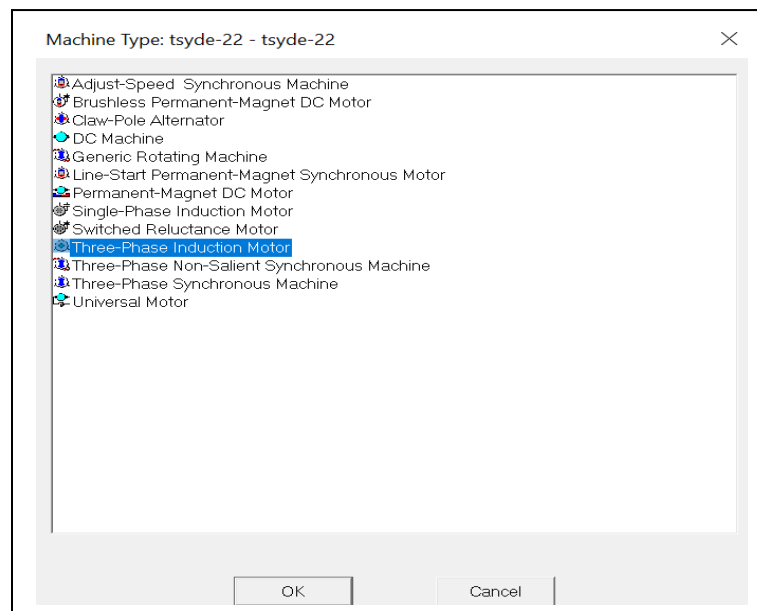


Fig. III.1 Interface de sélection de machines dans RMxprt

III.2.3 Fenêtre de projet

La figure III.2 comprend une liste d'outils déroulants dont les principaux composants sont (dans le cas d'un moteur asynchrone) :

1. Machine

- Stator
 - Enroulement
 - Encoche

- Rotor
 - Enroulement
 - Encoche
 - Arbre
2. Analyse
 - Configuration
 3. Optométrie
 4. Résultats

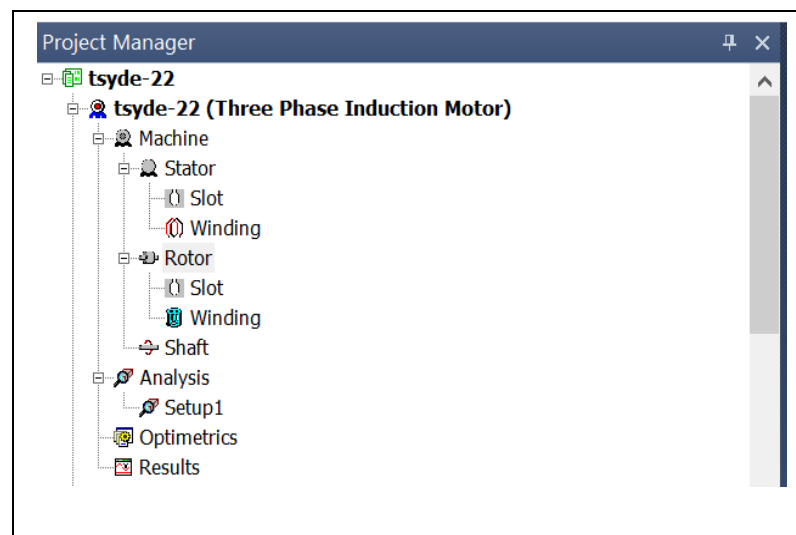


Fig. III.2 Fenêtre de projet

Nous nous limitons dans ce qui suit au paramétrage d'un moteur asynchrone. Pour d'autres types de machines la configuration et le paramétrage du projet varie plus au moins.

III.2.4 Fenêtre des propriétés de la machine

Elle comprend des informations générales illustrées par la figure III.3. On distingue principalement le nombre de poles qui doit être un entier paire, les pertes supplémentaires (dans le fer et dans les enroulements) et la vitesse de référence de synchronisme. Ce sont des des quantités qui doivent être définies (ou estimées) par l'utilisateur.

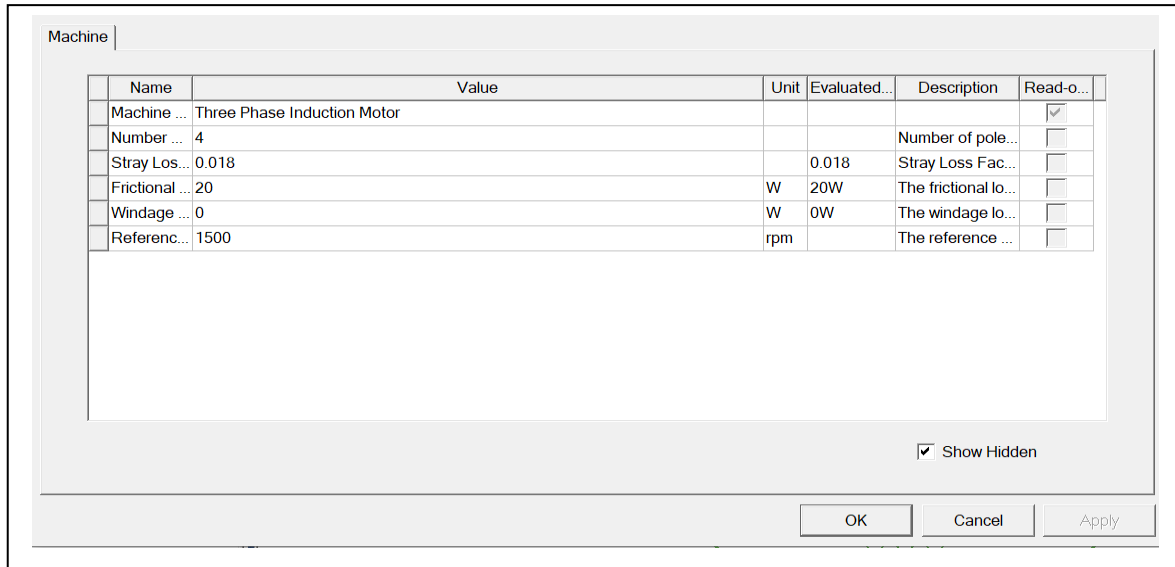


Fig. III.3 Fenêtre des propriétés de la machine

III.2.5 Fenêtre du stator

Le stator est un empilement de laminations à encoches où résident les enroulements polyphasés. La figure III.4 illustre les différents paramètres du stator à définir par le concepteur. On trouve les diamètres extérieur et intérieur ainsi que la longueur transversale et le nombre d'encoches. Bien sûr ces entrées changent avec le type de la machine à étudier. Le facteur d'empilement consiste à quantifier la surface équivalente de l'acier du stator en tenant compte de la zone couverte par le vernis entre les tôles magnétiques. Différents types d'acier ont été caractérisés sous ce logiciel (et peuvent être choisis pour la construction du circuit magnétique), et d'autres types peuvent être ajoutés et modélisés si on connaît leurs caractéristiques. Il existe six types d'encoches (de différentes opologies) fournies par *RMxprt* et qu'on peut choisir pour les machines rotatives.

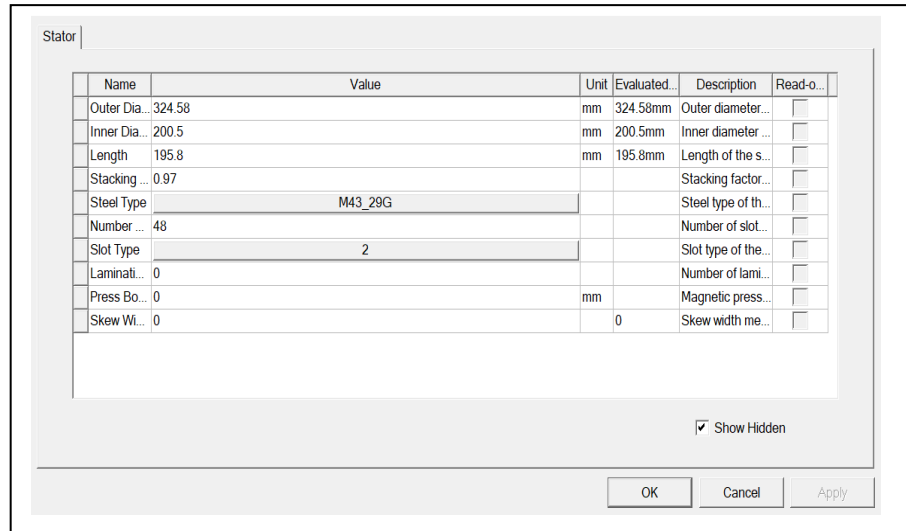


Fig. III.4 Fenêtre des paramètres du stator

III.2.6 Choix et paramétrage des encoches du stator

L'icône '*stator*' d'un projet de *RMxprt*, dans le cas des moteurs asynchrones en particulier, inclut les propriétés des encoches et les propriétés des enroulements. Par exemple, les dimensions de la topologie des encoches choisies sont représentées sur figure III.5.b, tandis que la géométrie de ce modèle d'encoche est représentée sur la figure III.5.a.

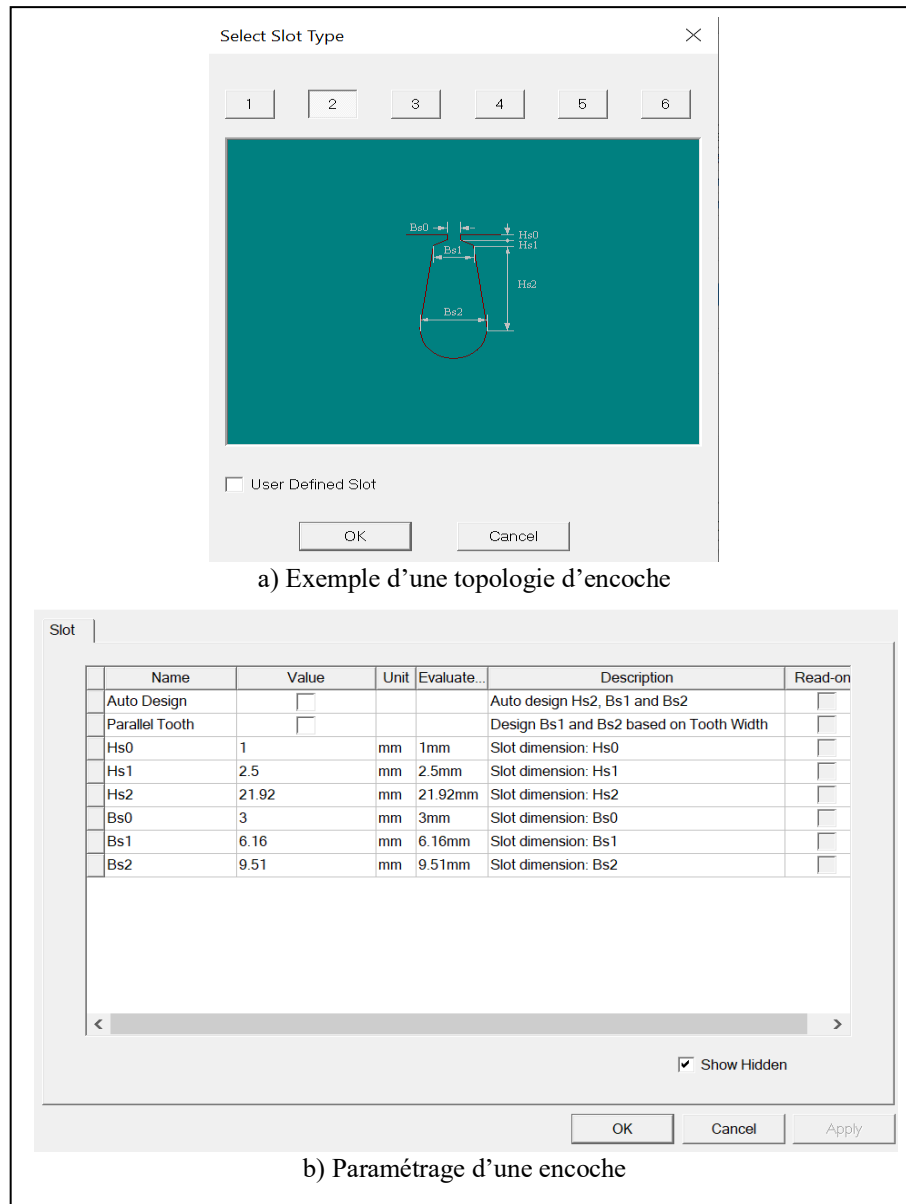


Fig. III.5 Exemple de choix et paramétrage d'une encoche statorique

III.2.7 Fenêtre des propriétés de l'enroulement du stator

Il est indiqué sur figure III.6.b, les différents paramètres concernant l'enroulement du stator d'une machine asynchrone. Le nombre de couches maximal du bobinage est de deux au maximum, le type d'enroulement peut défini de trois manières différentes (imbriqué, ondulé, ou édité par l'utilisateur), voir figure III.6.b. On distingue aussi le nombre de branches en parallèle, nombre de conducteurs par encoche, pas du bobinage (en termes d'encoches), nombre de faisceaux de conducteurs, diamètre du fil de bobinage et l'épaisseur de son isolation.

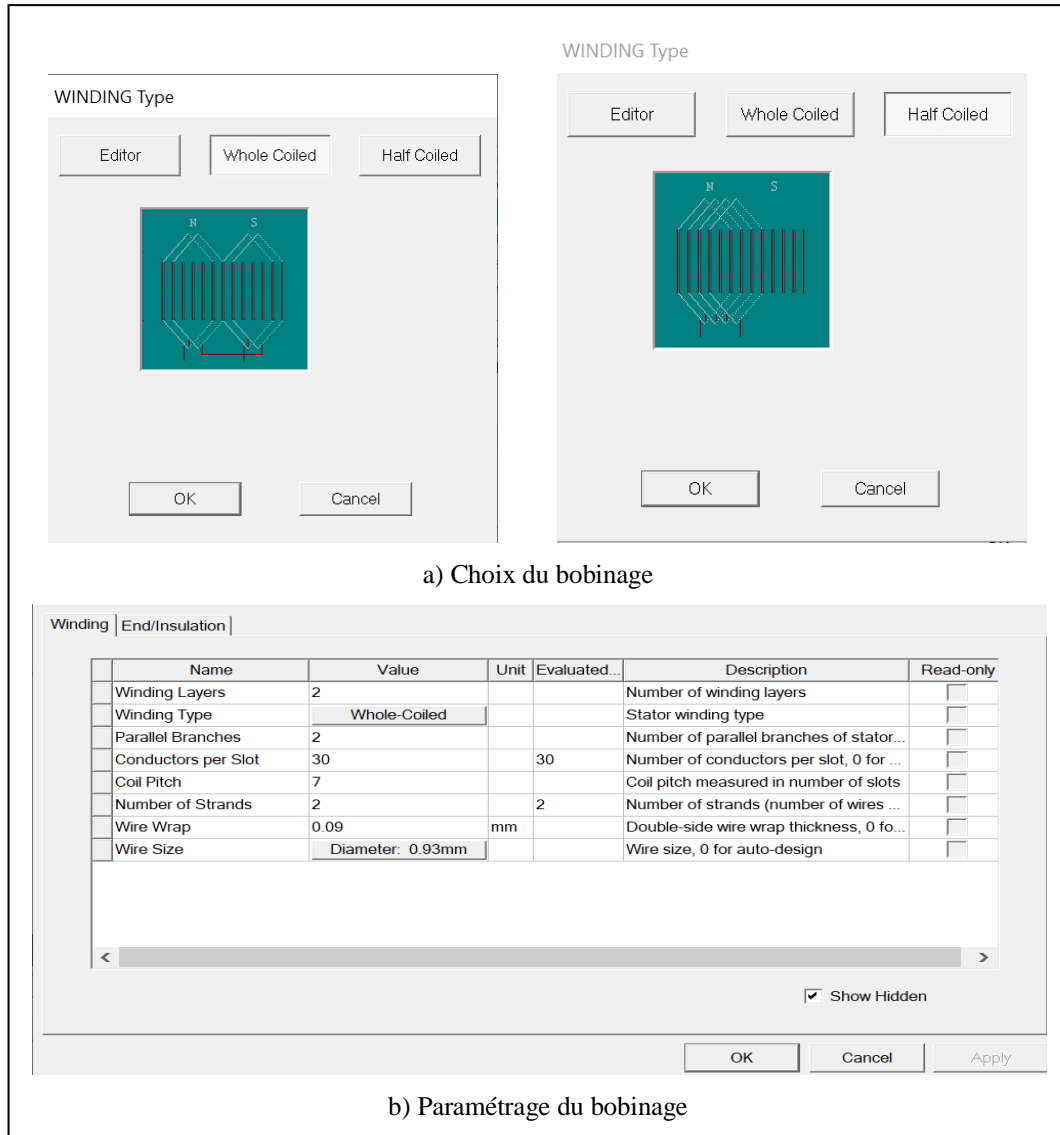


Fig. III.6 Exemple de choix et paramétrage d'un bobinage statorique

III.2.8 Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche

Dans cette rubrique, nous définissons principalement l'épaisseur de l'isolation de l'encoche et le coefficient de remplissage. Le reste des paramètres (épaisseur de la cale isolante et toutes les dimensions de la partie frontale de bobinage peuvent être choisies nulles, dans ce cas le logiciel prendra les valeurs par défauts, voir figure III.7.

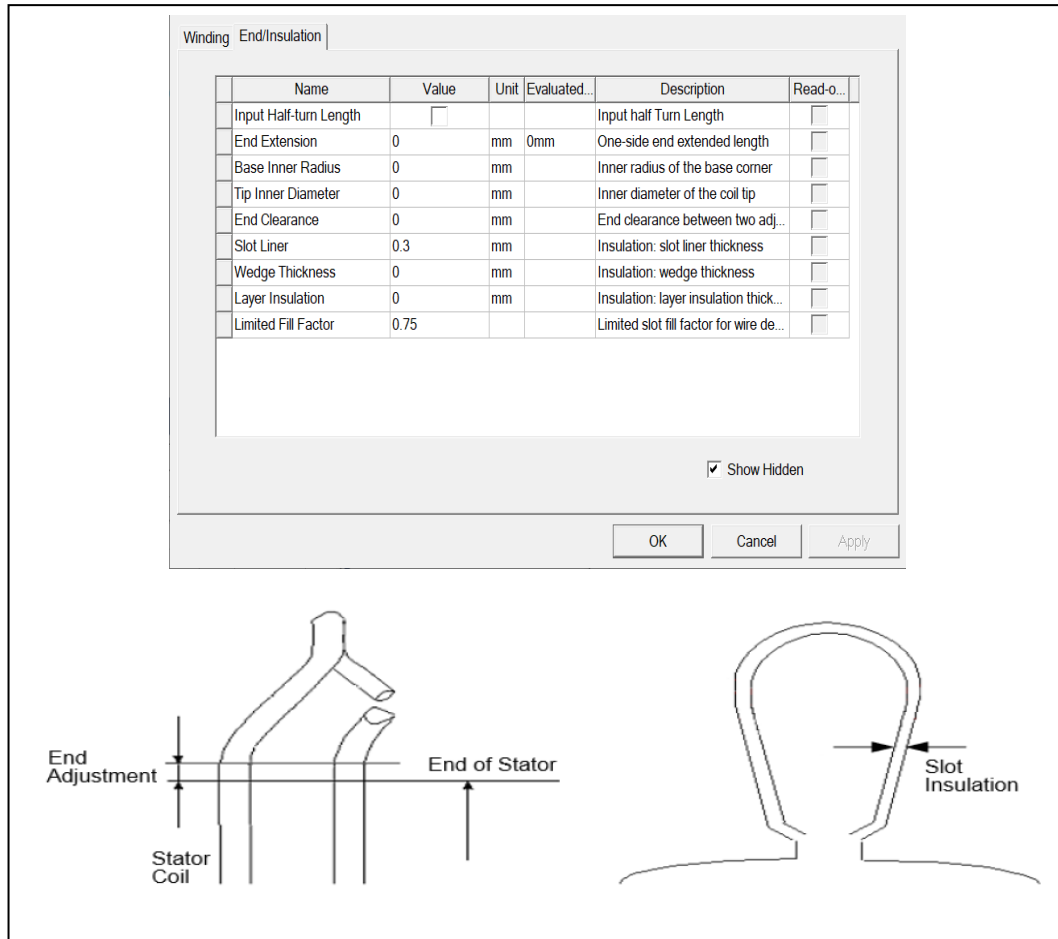


Fig. III.7 Exemple de choix et paramétrage d'un bobinage statorique

III 2.9 Fenêtre du rotor

Les propriétés générales du rotor telles que le diamètre extérieur et intérieur ainsi que la longueur, le nombre d'encoches, leur type et le facteur d'inclinaison, sont des champs à définir par l'utilisateur. Le logiciel décrit différents types d'acier et a également la possibilité pour les ajouts définis par l'utilisateur. De plus, le coefficient d'empilement des tôles ferromagnétiques rotoriques, qui tient compte de l'isolation par vernissage de ces tôles, doit être aussi défini par l'utilisateur. Et enfin, on peut choisir le type de bobinage du rotor dans ce cas à cage (moulée, double cage, ...).

Name	Value	Unit	Evaluated...	Description	Read-o...
Stacking Factor	0.92			Stacking factor of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Number of Slots	44			Number of slots of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Slot Type	2			Slot type of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Outer Diameter	147.3	mm	147.3mm	Outer diameter of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	48	mm	48mm	Inner diameter of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Length	250	mm	250mm	Length of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Steel Type	M19_24G			Steel type of the rotor core	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0		0	Skew width measured in slot num...	<input type="checkbox"/>
Cast Rotor	<input type="checkbox"/>			Rotor squirrel-cage winding is cast	<input type="checkbox"/>
Half Slot	<input type="checkbox"/>			Half-shaped slot (un-symmetric)	<input type="checkbox"/>
Double Cage	<input type="checkbox"/>			Double-squirrel-cage winding	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Fig. III.8 Fenêtre des paramètres du rotor

III.2.10 Fenêtre de paramétrage des encoches du rotor

Pour définir le type d'encoche de rotor, *RMxpert* prend en charge quatre types de modèles d'encoches, certains des champs de données du rotor changent ou deviennent inactifs selon le type sélectionné. La figure III.9.a illustre les différentes topologies des encoches du rotor.

Dans ce cas, les dimensions à saisir dans la fenêtre des propriétés des encoches rotoriques (qu'on peut accéder en double-cliquant sur l'icône '*Machine-Rotor-Slot*' de l'arborescence du projet.

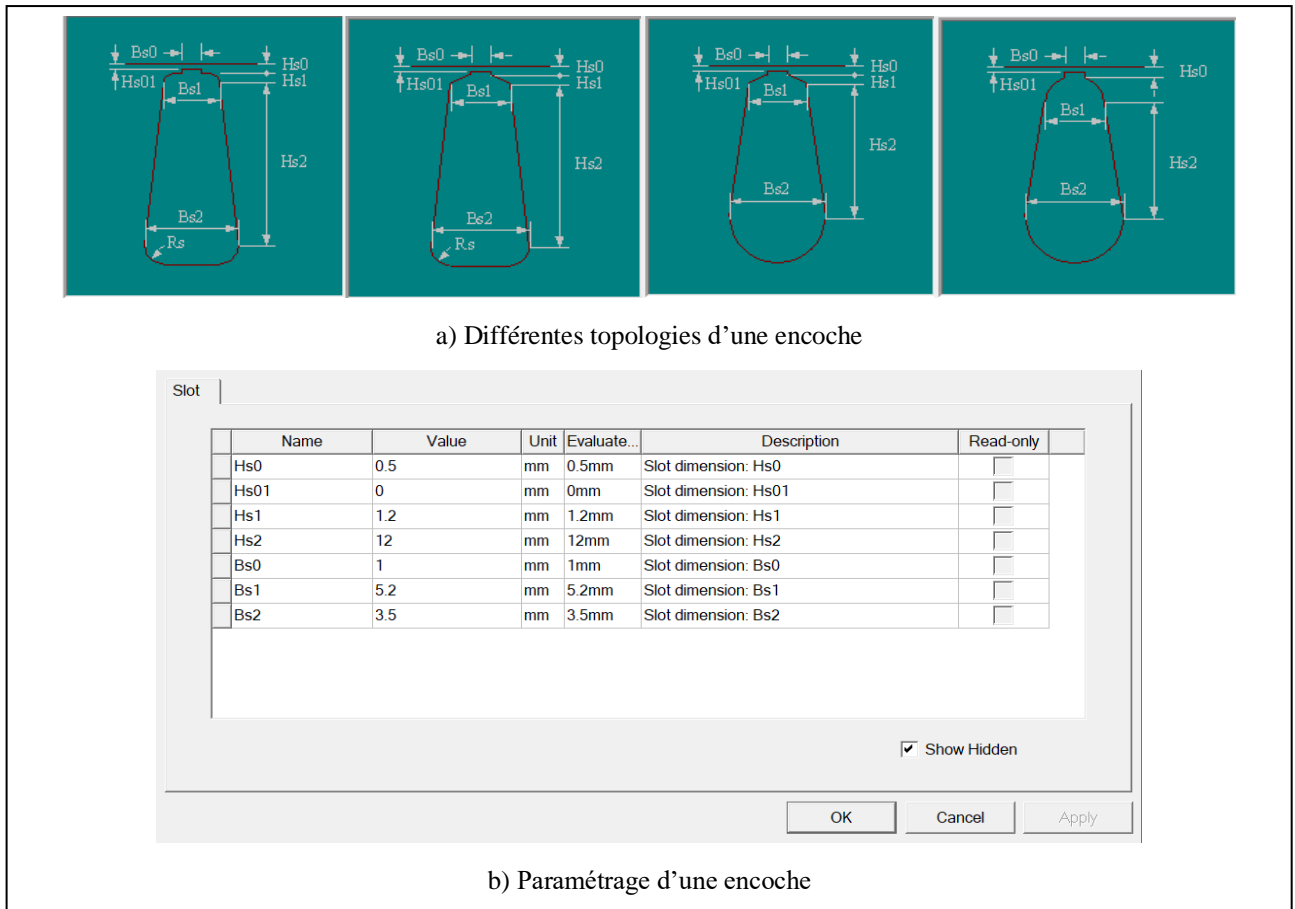


Fig. III.9 Topologies et paramétrage d'une encoche rotorique

III.2.11 Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor

Pour accéder aux données du bobinage du rotor, on double-clique sur l'icône 'Machine-Rotor-Enroulement' du projet *RMxprt*. Ensuite, nous devons définir, le type de matériau des barres conductrices de la cage (dans ce cas de moteur à induction à cage) et les paramètres des anneaux de court-circuit (type de matériau et dimensions), voir figure III.10.

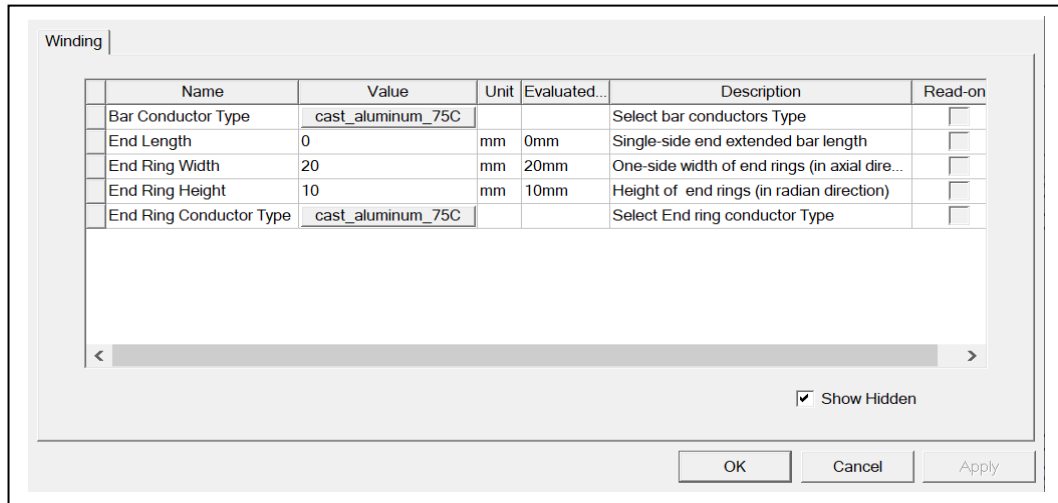


Fig. III.10 Fenêtre de paramétrage de l'enroulement de rotor

III.2.12 Fenêtre de paramétrage de l'arbre rotorique

Dans ce cas, le seul paramètre à définir pour l'arbre de la machine asynchrone est sa nature magnétique ou non.

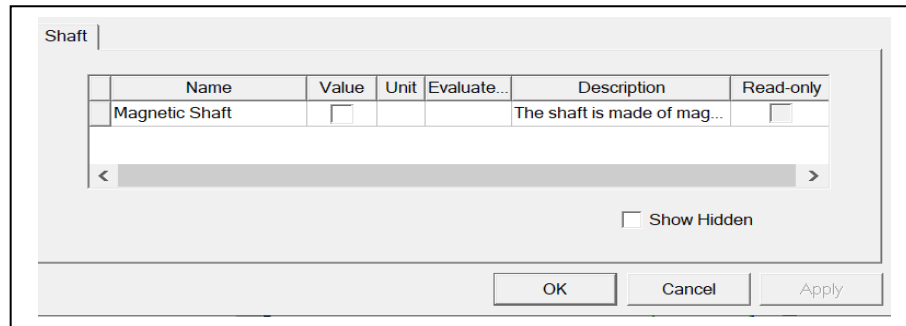


Fig. III.11 Fenêtre de paramétrage de l'arbre rotorique

III.2.13 Fenêtre de configuration d'une analyse

La configuration d'une analyse 'setup' sous *RMxprt* doit être effectuée en définissant quelques paramètres d'entrée/sortie d'une machine électrique, avant de lancer une simulation. Ceci détermine les conditions de fonctionnement du moteur étudié.

Dans le cas d'un moteur asynchrone, on doit définir (voir figure III.12) :

- Le mode d'opération (moteur ou générateur) ;
- Le type de la charge (couple constant, linéaire ou quadratique) ;
- Les grandeurs nominales (puissance, vitesse, tension d'alimentation) ;

- La température de fonctionnement.

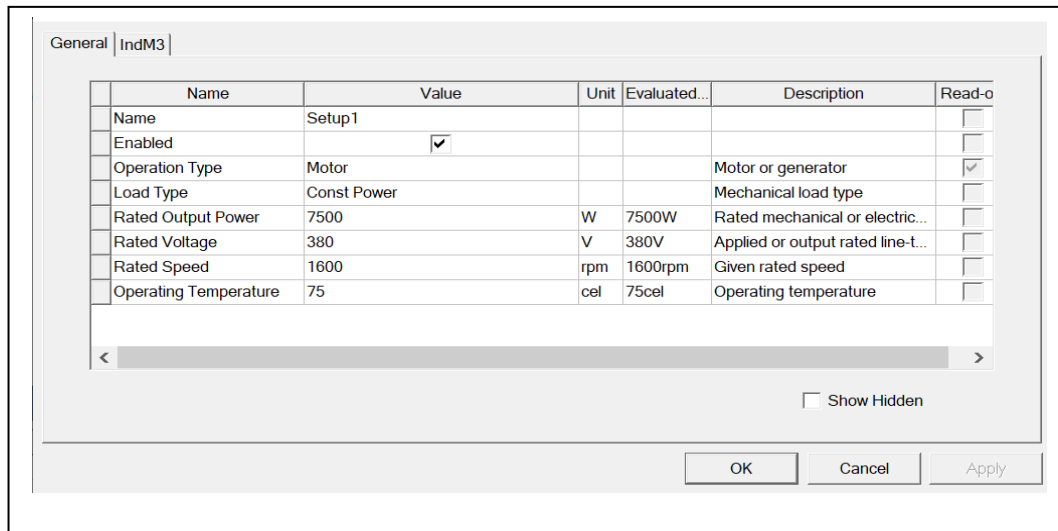


Fig. III.12 Fenêtre de configuration des paramètres d'analyse

III.2.14 Analyse et exploitation des résultats de simulation

Maintenant *RMxp_{rt}* est prêt et éligible pour analyser la machine. Dans cette étape, on procède comme suit pour effectuer une simulation de la machine selon toutes les données saisies auparavant, et surtout selon les paramètres du 'setup' :

- On choisit l'élément de menu *RMxp_{rt} > simulation > validate* pour valider notre machine ;
- On choisit l'élément de menu *RMxp_{rt} > simulations > analyze all* pour démarrer la simulation ;
- On choisit l'élément de menu *RMxp_{rt} > results > solution Data* pour afficher les résultats.

Les résultats obtenus sont répartis sur trois onglets 'Performance', 'Fiche technique de conception' et 'courbes'. Ceux-ci sont présentés avec plus de détails dans les sections suivantes.

III.2.14.1. Performance

Le menu déroulant de cette rubrique (voir figure III.13) permet d'accéder et afficher de nombreuses tables de données différentes. On cite :

- Fonctionnement en régime critique
- Données d'entrée au projet d'éléments finis 'FEA'
- Fonctionnement à rotor bloqué
- Pertes dans les matériaux

- Fonctionnement à vide
- Paramètres électriques en régime nominal
- Données magnétiques en régime nominal
- Autres paramètres en régime nominal
- Performances en régime nominal
- Encoche du stator
- Enroulement du stator

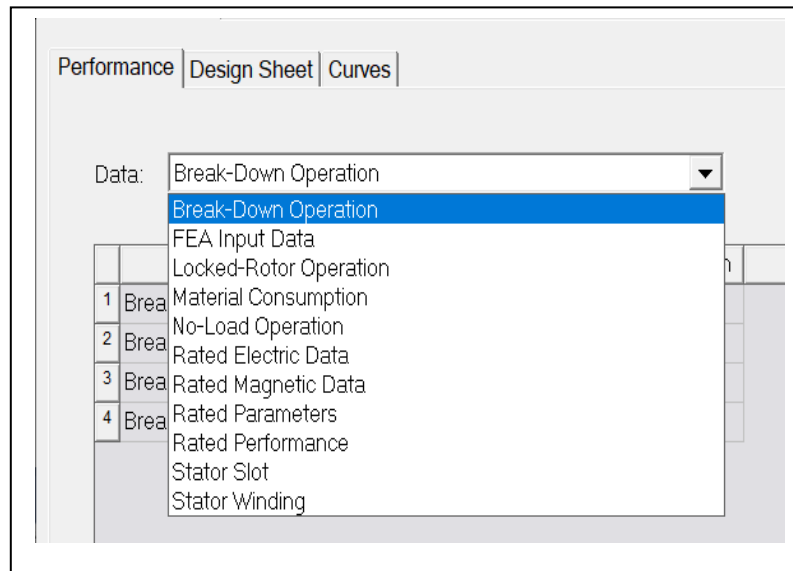


Fig. III.13 Fenêtre de la rubrique 'Performance'

III.2.14.2. Fiche technique de conception

Cette rubrique comprend des tables contenant des informations détaillées sur les caractéristiques, performances et paramètres de la machine conçue sous forme d'une fiche technique détaillée. Voici les données résumées dans cette base de données résultant de la conception :

- Données générales
- Données du stator
- Données du rotor
- Pertes dans les matériaux
- Fonctionnement en charge nominale
- Fonctionnement à vide
- Paramètres d'état stable
- Fonctionnement en régime critique
- Fonctionnement à rotor bloqué (court-circuit)
- Données détaillées de l'opération nominale
- Arrangement de l'enroulement
- Données du projet d'éléments finis 'FEA' en régime transitoires.

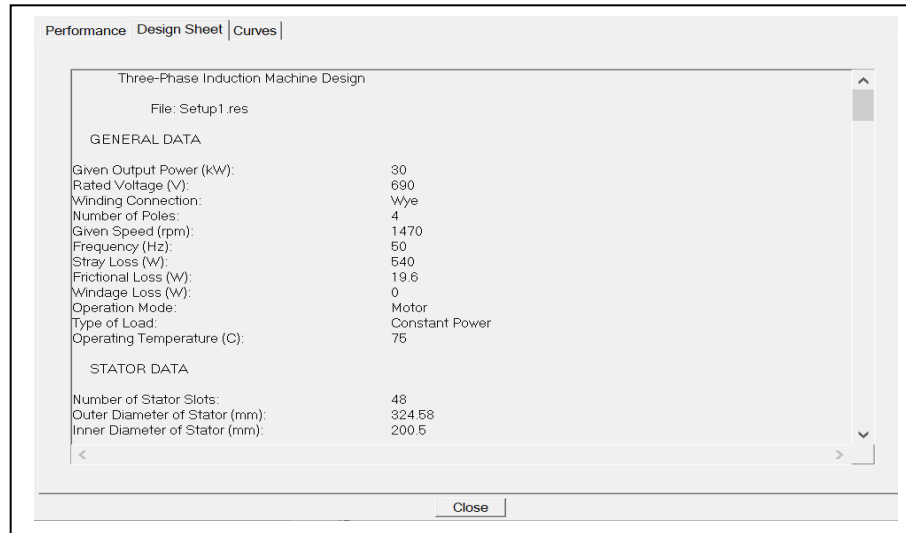


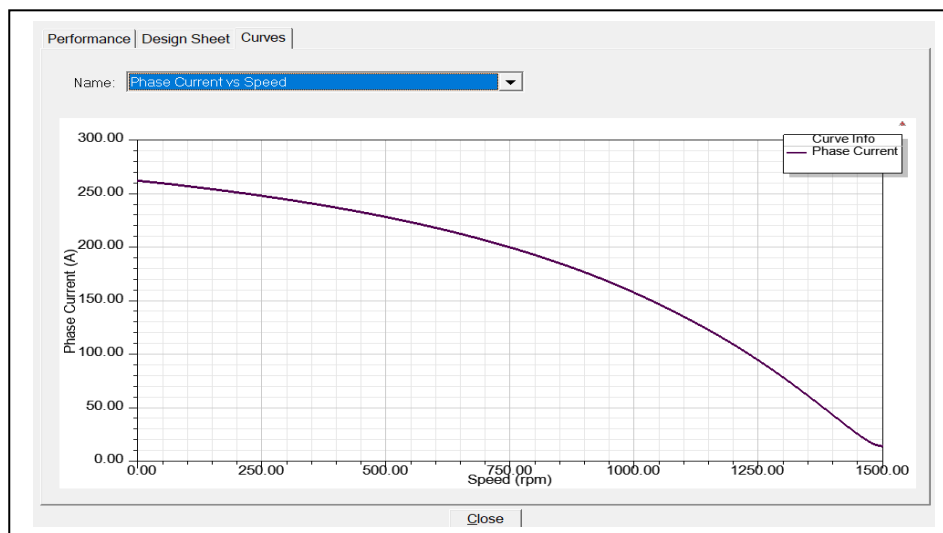
Fig. III.14 Fenêtre de la rubrique 'Fiche technique de conception'

III.2.14.3 Courbes

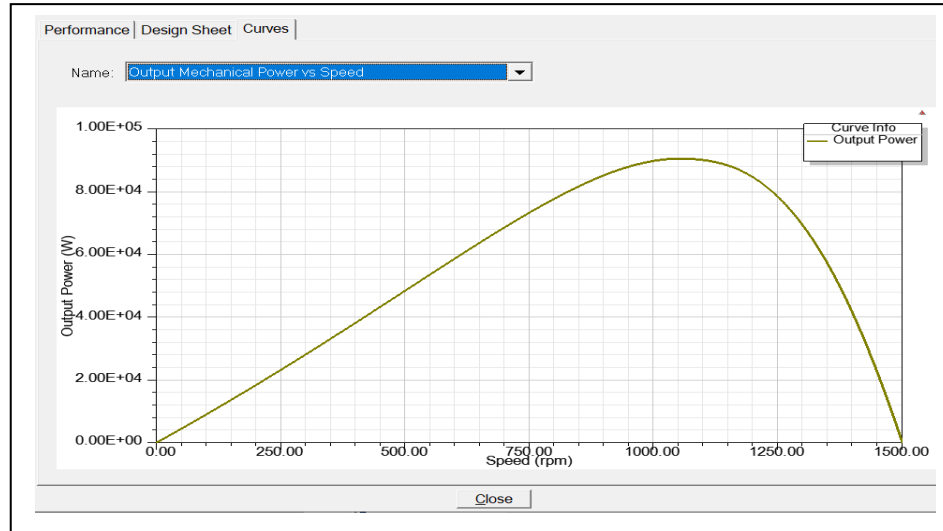
Cette rubrique permet de tracer un ensemble de courbes de la machine conçue (caractéristiques électromécaniques). On cite principalement :

- Courant de phase statorique en fonction de la vitesse
- Rendement (vitesse)
- Puissance mécanique (vitesse)
- Facteur de puissance (vitesse)
- Couple électromagnétique (vitesse)
- Courant de phase statorique (puissance de sortie)
- Facteur de puissance (puissance de sortie)
- Couple électromagnétique (Puissance de sortie).

La figure suivante illustre deux exemples de caractéristiques qu'on peut visualiser dans cette rubrique :



a) Courant de phase en fonction de la vitesse



b) Puissance mécanique en fonction de la vitesse

Fig. III.15 Quelques caractéristiques de la rubrique 'Courbes'

III.3 Exemple d'application

Dans cette partie nous allons concevoir et caractériser un moteur asynchrone triphasé à cage de 30 kW en partant d'un cahier de charge spécifique et un calcul préliminaire des dimensions principales de la machine que nous avons effectué et présenté au chapitre précédent.

III.3.1 Propriétés générales du moteur à caractériser

Nous donnons dans ce qui suit le cahier de charge utilisé pour concevoir ce moteur à induction :

Type de Machine : Moteur à induction triphasé à cage

Puissance de sortie donnée : 30 kW

Tension nominale : 690 V

Vitesse nominale : 1470 tr/min

Fréquence : 50 Hz

Nombre de pôles : 4

Facteur des pertes supplémentaires : 0.018

Pertes de frottements : 20 W

Pertes de ventilation : 0 W

Vitesse de référence (de synchronisme) : 1500 tr/min

Nous avons déjà effectué un calcul préliminaire des dimensions de cette machine asynchrone selon les étapes du chapitre deux.

Maintenant, nous allons introduire ces dimensions et données générales du moteur obtenu au deuxième, dans les différentes rubriques d'un projet créé sous *RMxpert*.

Tout d'abord, nous saisissons les propriétés générales de la machine comme l'illustre la figure suivante :

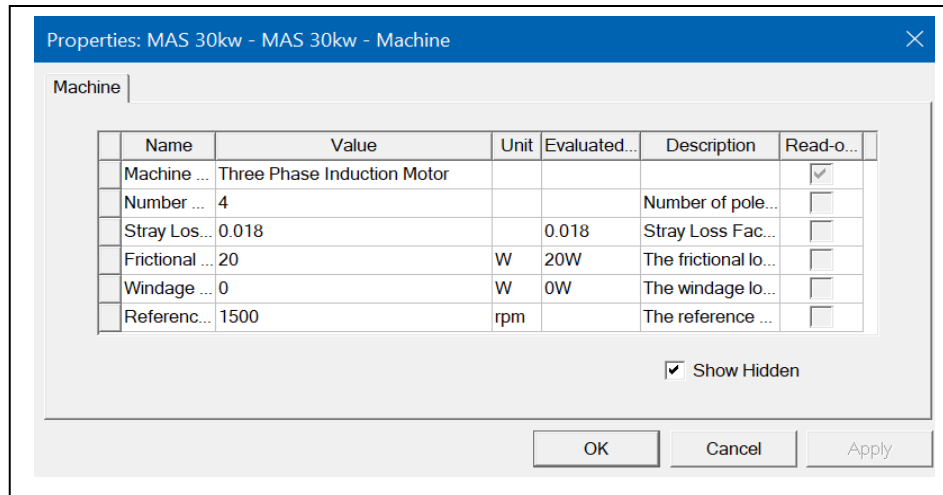


Fig. III.16 Introduction des propriétés de la machine étudiée

III.3.2 Propriétés du stator

Nous saisissons aussi les données et les propriétés du stator, comme l'illustre la figure suivante :

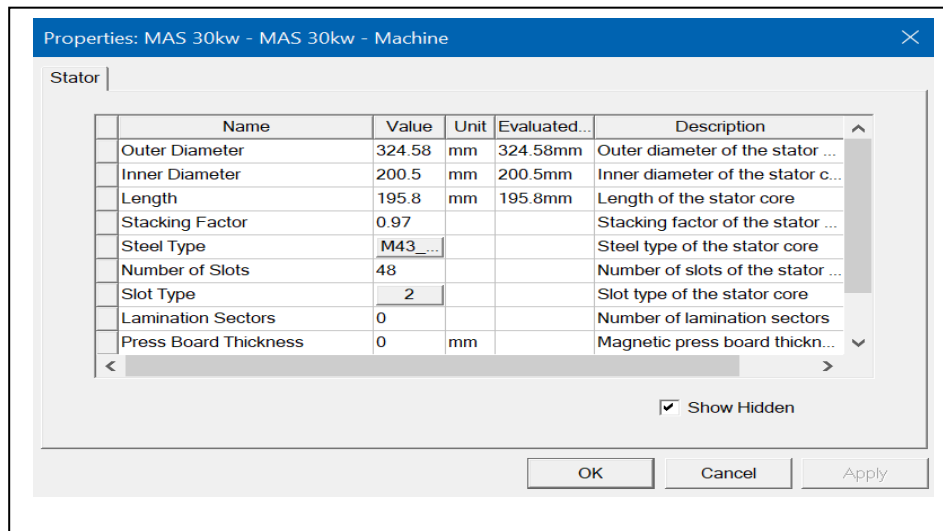


Fig. III.17 Introduction des propriétés du stator

III.3.3 Propriétés des encoches et de l'enroulement statoriques

Nous configurons aussi les propriétés des encoches et du bobinage statorique comme le montre la figure qui suit.

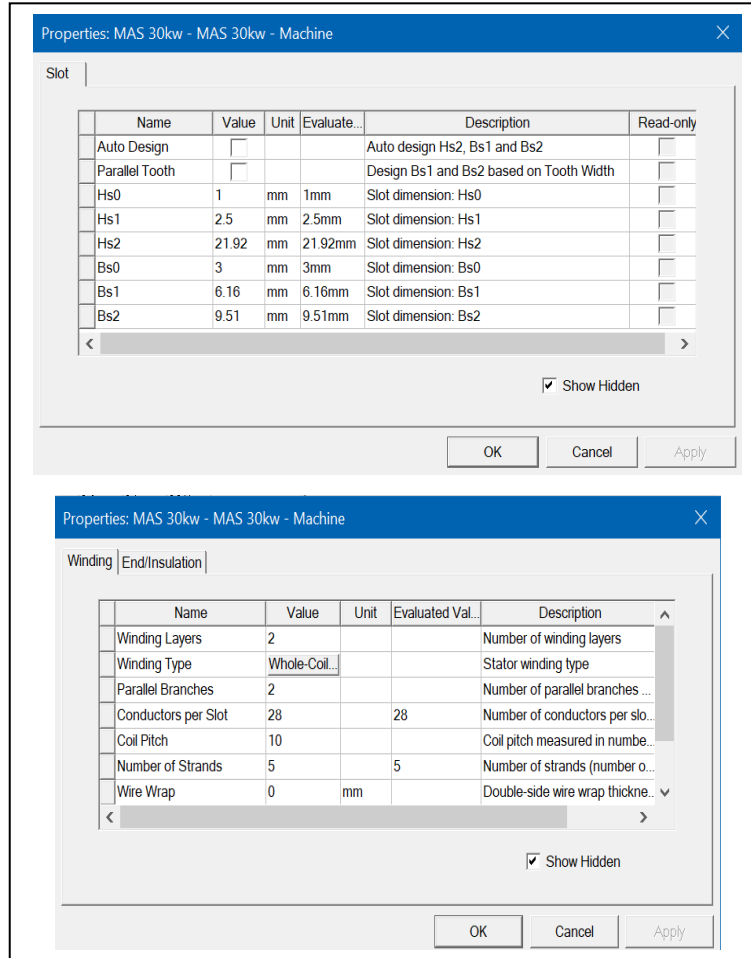


Fig. III.18 Introduction des propriétés des encoches et enroulement du stator

III.3.4 Propriétés du rotor

De même, introduisons les propriétés du rotor, comme l'illustre la figure suivante :

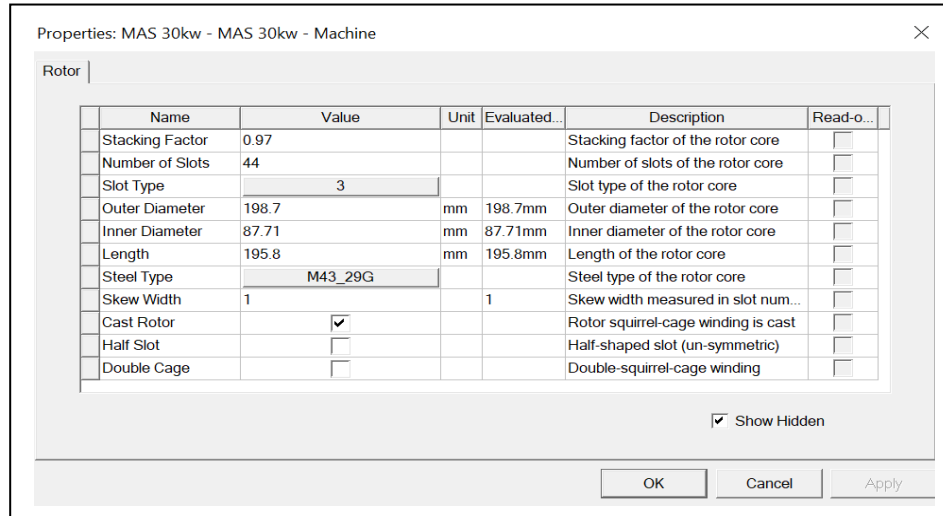


Fig. III.19 Introduction des propriétés du rotor

III.3.5 Propriétés des encoches et de l'enroulement rotoriques

Configurons aussi les propriétés des encoches et du bobinage rotorique, voir la figure suivante :

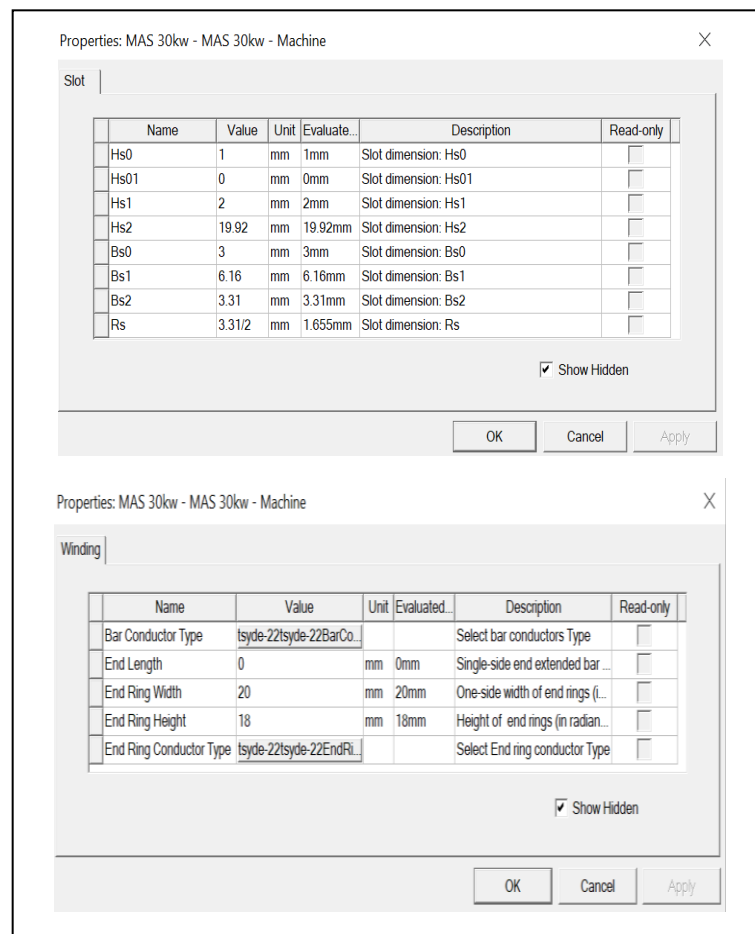


Fig. III.20 Introduction des propriétés des encoches et enroulement du rotor

III.3.6 Résultats de simulation

Après avoir introduite les données nécessaires du moteur étudié dans le projet créé sous l'environnement *RMxprt*, nous devons configurer d'abord le '*setup*' de cet exemple d'application avant de lancer l'analyse et la simulation, voir figure III.21.

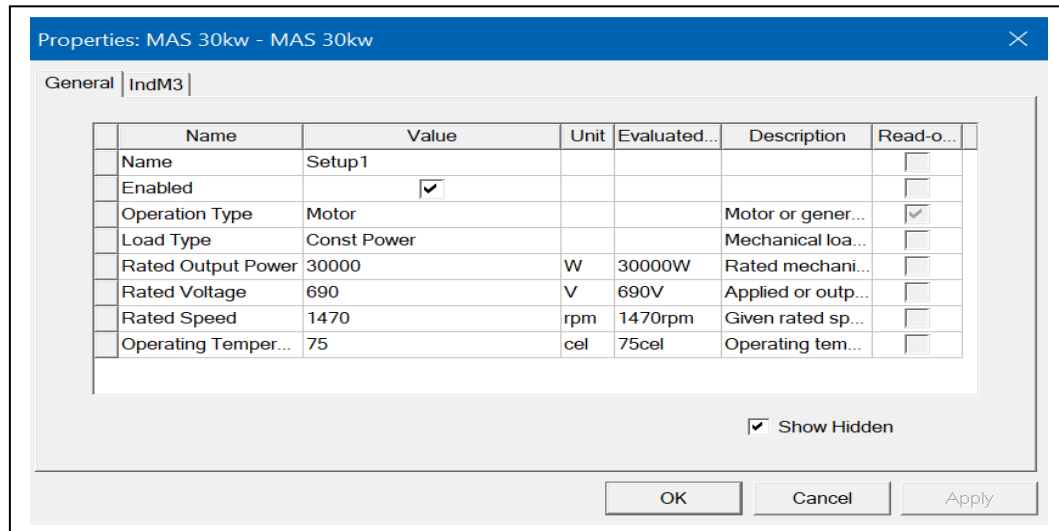


Fig. III.21 Configuration du '*setup*' du projet du moteur étudié

Une fois la validation est effectuée et la simulation est lancée, nous pouvons passer à la présentation et l'exploitation des résultats de simulation obtenus en consultant les trois rubriques des résultats '*results*' du '*setup*', à savoir : *Performance*, *fiche technique* et *courbes*.

III.3.6.1 Performances du moteur étudié

Comme nous l'avons déjà expliqué, cette rubrique rassemble les paramètres et les résultats de plusieurs modes de fonctionnement du moteur étudié, voir figure III.22 qui montre les résultats de simulation du point de fonctionnement critique (de décrochage).

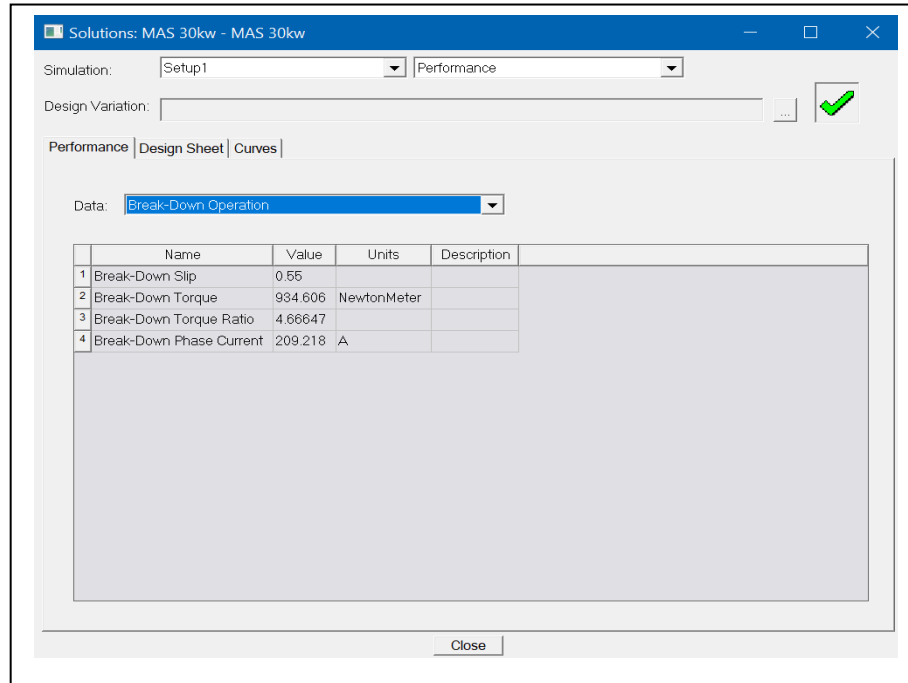


Fig. III.22 Résultats de simulation du point de fonctionnement critique du moteur étudié

Pour plus de détails et à titre d'illustration, on donne les tableaux suivants qui résument les résultats de simulation du moteur étudié dans les cas suivants :

Tableau III.1 Résultats de simulation du point de fonctionnement critique et données d'entrée du projet 'FEA'

Point de fonctionnement critique	Valeur	Unité	Données d'entrée du FEA	Valeur	Unité
Glissement critique	0.55		Branches parallèles du stator	2	
Couple maximal	934.606	<i>N.m</i>	Longueur équivalente du moteur	0.1958	<i>m</i>
Rapport de couple maximal	4.66647		Facteur d'empilage équivalent du stator	0.97	
Courant de phase critique	209.218	A	Facteur d'empilage équivalent du rotor	0.97	
			Fractions unitaires	4	

Tableau III.2 Résultats de simulation du point de fonctionnement à rotor bloqué et nominal

Fonctionnement à rotor bloqué	Valeur	Unité	Fonctionnement en régime nominal	Valeur	Unité
Couple de démarrage	834.692	<i>N.m</i>	Courant statorique	31.8878	<i>A</i>
Courant du stator au démarrage	261.77	<i>A</i>	Courant magnétisant	13.9387	<i>A</i>
Rapport du couple de démarrage	4.16761		Courant du rotor	27.6215	<i>A</i>
Résistance du stator	0.22721	<i>Ohm</i>	Charge électrique spécifique	34019.7	<i>A/m</i>
Réactance de fuites du Stator	0.662717	<i>Ohm</i>	Densité de courant du stator	4060080	<i>A / m²</i>
Résistance du rotor	0.666732	<i>Ohm</i>	Densité de courant des barres rotoriques	3623290	<i>A / m²</i>
Réactance de fuites du rotor	0.586585	<i>Ohm</i>	Densité de courant de l'anneau rotorique	3808350	<i>A / m²</i>

Tableau III.3 Quelques résultats de simulation des matériaux et des paramètres électriques du moteur étudié

Matériaux du moteur	Valeur	Unité	Paramètres en régime nominal	Valeur	Unité
Densité d cuivre du stator	8900	<i>kg / m³</i>	Résistance Statorique	0.22721	<i>Ohm</i>
Densité du matériau de la barre du rotor	2700	<i>kg / m³</i>	Réactance de fuites statoriques	0.728256	<i>Ohm</i>
Densité du matériau de l'anneau du rotor	2700	<i>kg / m³</i>	Résistance rotorique	0.637284	<i>Ohm</i>
Densité de l'acier du stator	7700	<i>kg / m³</i>	Réactance de fuites rotoriques	0.738122	<i>Ohm</i>
Densité de l'acier du noyau du rotor	7700	<i>kg / m³</i>	Réactance magnétisante	27.2942	<i>Ohm</i>
Poids du matériau de l'anneau Rotorique	1.09137	<i>kg</i>	Réactance de fuites d'encoches statoriques	0.483885	<i>Ohm</i>
Poids du cuivre du stator	17.2448	<i>kg</i>	Réactance de fuites d'encoches rotoriques	0.381795	<i>Ohm</i>
Poids du matériau de la barre Rotorique	2.57694	<i>kg</i>	Réactance de fuites d'extrémité statorique	0.15922	<i>Ohm</i>
Poids de l'acier u stator	59.2696	<i>kg</i>	Réactance différentielle de fuites statoriques	0.0851504	<i>Ohm</i>
Poids de l'acier du noyau rotorique	29.3835	<i>kg</i>	Réactance différentielle de fuites rotoriques	0.21838	<i>Ohm</i>
Poids total net du moteur	109.566	<i>kg</i>	Réactance de fuites d'inclinaison	0.0927987	<i>Ohm</i>

Tableau III.4 Résultats de simulation du bilan de puissance du moteur étudié

Performances nominales	Valeur	Unité	Performances nominales	Valeur	Unité
Pertes fer	377.130	W	Puissance d'entrée	33090.300	W
Pertes ohmiques statoriques	693.105	W	Rendement	90.6681	%
Pertes ohmiques rotoriques	1458.640	W	Facteur de puissance	0.854123	
Pertes de frottements et de ventilation	19.0733	W	Couple nominal	200.281	N.m
Pertes dans le cuivre	540	W	Vitesse nominale	1430.5	tr/min
Pertes totales	3087.950	W	Glissement nominal	0.0463353	
Puissance de sortie	30002.4	W			

III.3.6.2 Fiche technique du moteur étudié

Après le calcul *RMxprt* nous donne les résultats sous forme de fiche technique présentée dans la figure suivante :

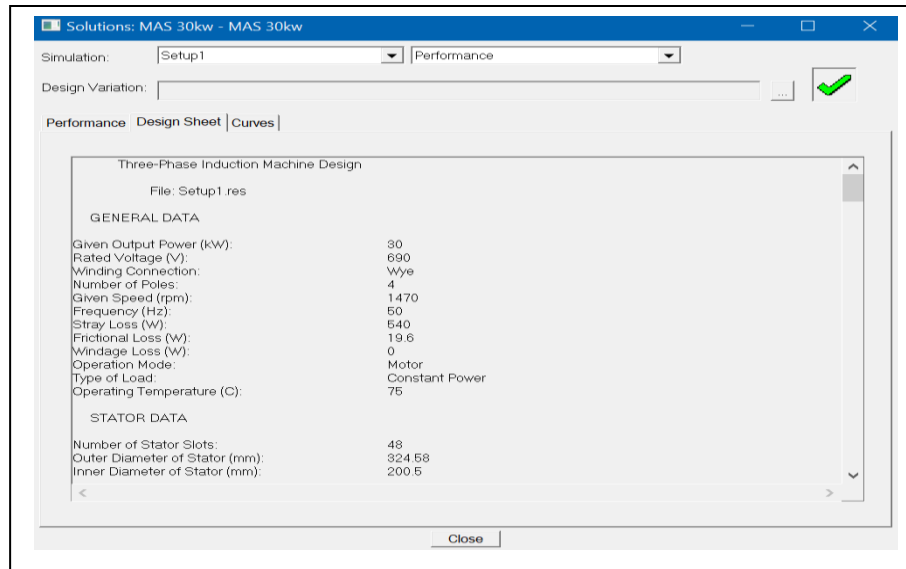


Fig. III.23 Fenêtre de la fiche technique

Après avoir feuilleté la fiche technique détaillée du moteur conçu, nous résumons quelques résultats dans le tableau suivant :

Tableau III.5 Quelques résultats de simulation de la fiche technique détaillée du moteur étudié

Données générales	Valeur	Unité	Données générales	Valeur	Unité
Nombre de pôles	4		Données du stator		
Mode de fonctionnement	Moteur		Longueur du noyau du stator	195.8	mm
Fréquence	50	Hz	Facteur d'empilement du noyau statorique	0.97	
Connexion d'enroulement	Y		Type d'acier	M43_29G	
Tension nominale composée	690	V	Diamètre extérieur du stator	0.32458	m
Puissance de sortie donnée	30	kW	Diamètre intérieur du stator	0.2005	m
Vitesse donnée	1470	tr/min	Nombre de branches parallèles	2	
Pertes supplémentaires	540	W	Type de bobines	21	
Pertes de frottements	19.6	W	Pas de bobine	10	
Pertes de ventilation	0	W	Encoches du stator		
Température de fonctionnement	75	°C	Type d'encoches du stator	2	
Données du rotor			Nombre d'encoches statoriques	48	
Épaisseur de l'entrefer	0.9	mm	hs0	2	mm
Diamètre intérieur du rotor	87.71	mm	hs1	1	mm
Longueur du rotor	195.8	mm	hs2	2.5	mm
Hauteur de l'anneau d'extrémité	18	mm	bs0	21.92	mm
Largeur de l'anneau d'extrémité	20	mm	bs1	6.16	mm
Encoches du rotor			bs2	9.51	mm
Type d'encoches rotoriques	3		Largeur maximale de la dent	7.42287	mm
Nombre d'encoches rotoriques	44		Largeur minimale de la dent	6.94732	mm
hs0	1	mm	Nombre de conducteurs par encoche	28	
hs1	2	mm	Nombre de fils par conducteur	5	
hs2	19.92	mm	Diamètre du fil	1	mm
bs0	3	mm	Épaisseur de l'isolation de l'encoche	0.3	mm
bs1	6.16	mm	Épaisseur de l'isolation de la couche	0.3	mm
bs2	3.31	mm			
Rs	1.655	mm			

III.3.6.3 Disposition de l'enroulement statorique

L'enroulement statorique triphasé du moteur conçu est à 2 couches, il est placé dans 12 encoches par pôle, comme indiqué dans la figure ci-dessous selon la succession suivante : 'AAAAZZZZBBBB'. On donne aussi :

- Angle par encoche (degrés élec.) : 15
- Axe de la phase-A (degrés élec.) : 97.5
- Centre de la première encoche (degrés élec.) : 0

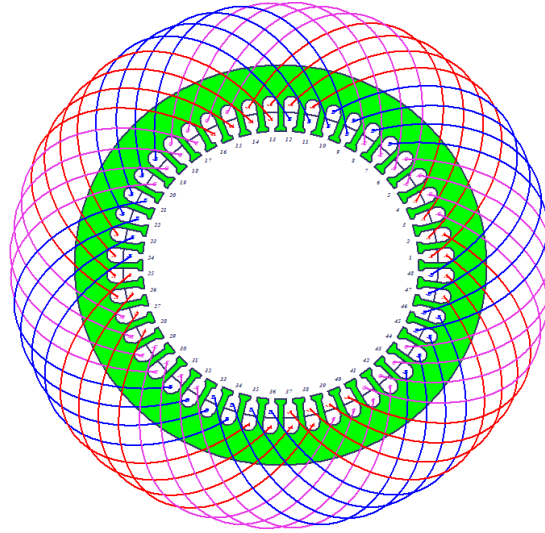


Fig. III.24 Disposition de l'enroulement statorique

III.3.6.4 Quelques caractéristiques du moteur étudié

Dans cette section, nous allons présenter quelques caractéristiques électromécaniques du moteur asynchrone conçu, issues de la rubrique 'curves' des résultats de simulation du 'setup'.

a) Courant de phase statorique en fonction de la vitesse

D'après cette caractéristique, on remarque un très grand courant de démarrage (qui dépasse 200 A) comparativement au courant nominal (31.8 A environ) enregistré pour une vitesse nominale de 1430.5 *tr/min* (différente de 2.7 % environ de la vitesse considérée initialement et qui est de 1470 *tr/min*). D'où la nécessité d'un artifice de démarrage.

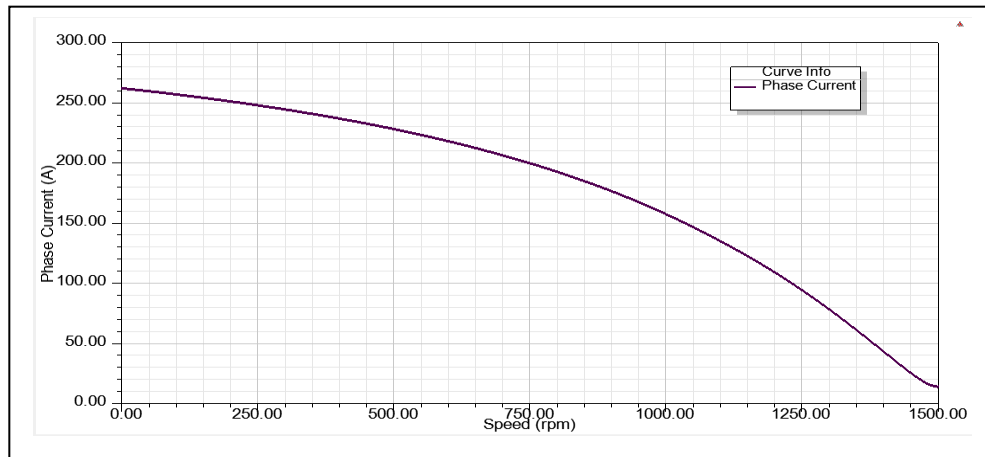


Fig. III.25 Courant de phase en fonction de la vitesse

b) Puissance de sortie en fonction de la vitesse

Cette caractéristique évolue presque linéairement à partir de la vitesse nulle jusqu'aux environs de 1000 *tr/min* (partie instable), où elle commence à devenir concave en atteignant d'abord une puissance maximale (le point critique) de 90.45 *kW*. Ensuite, elle commence à descendre (partie stable) jusqu'à ce qu'elle soit nulle à la vitesse de synchronisme. Par projection, on note que la puissance nominale sur la courbe, correspond bien à une vitesse nominale de 1430.5 *tr/min*.

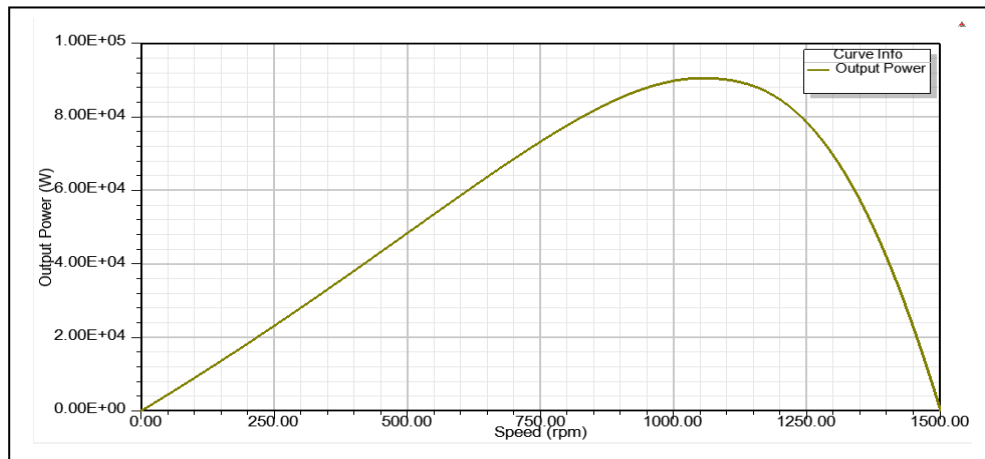


Fig. III.26 Puissance de sortie en fonction de la vitesse

c) Rendement en fonction de la vitesse

D'après cette caractéristique, on peut remarquer qu'au démarrage et au synchronisme, il n'y a pas d'échange d'énergie (rendement nul). Par contre, celui-ci (rendement) est maximal (environ 91.17 %) qui très proche de la valeur maximale, ce qui confirme la bonne conception du moteur étudié.

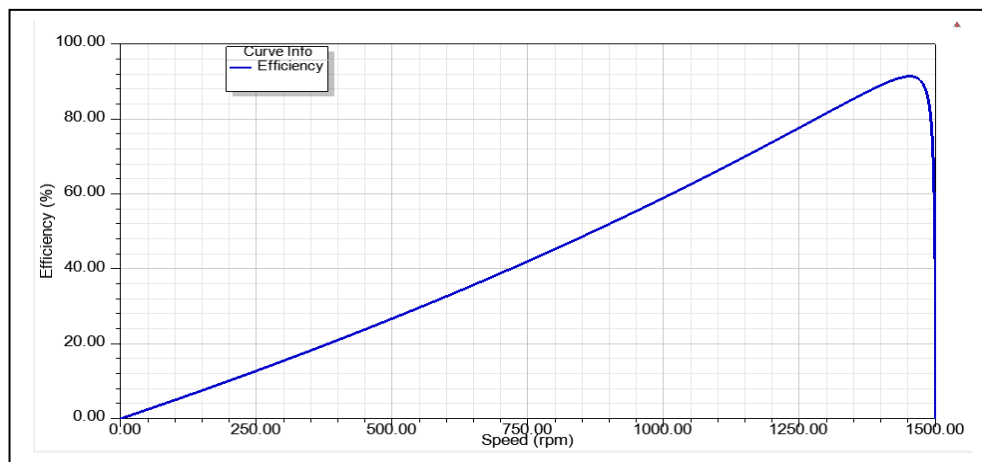


Fig. III.27 Rendement en fonction de la vitesse

d) Couple électromagnétique en fonction de la vitesse

Cette caractéristique nous indique une bonne aptitude du moteur à démarrer sous charge nominale (ce qui correspond aux applications de levage et de pompes et compresseurs volumétriques, ...) grâce à son fort couple de démarrage (835.2 $N.m$) comparativement au couple nominal (200.3 $N.m$). On peut noter aussi une remarquable stabilité du point de fonctionnement puisque le couple maximal (934.6 $N.m$ environ) est très grand par rapport au couple nominal.

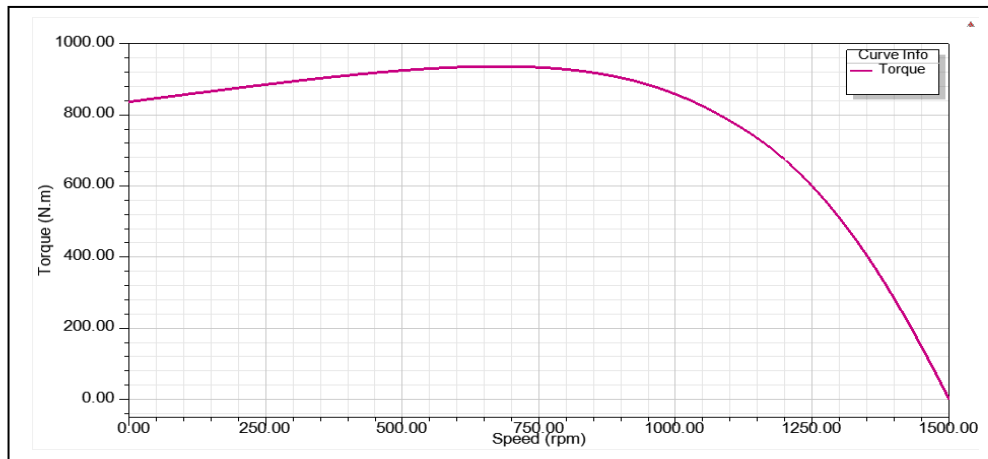


Fig. III.28 Couple électromagnétique en fonction de la vitesse

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les différentes étapes à suivre pour concevoir une machine électrique (nous nous sommes limités au cas d'un moteur asynchrone triphasé à cage) en utilisant un outil de CAO de machines électriques puissant à savoir ANSYS-RMxpert.

Ensuite, nous avons élaboré une conception et caractérisation d'un moteur asynchrone de 30 kW en utilisant cet outil de conception RMxpert, qui effectue des calculs analytiques rapides des performances de la machine et comprend une panoplie de choix des matériaux, types d'encoches, types d'enroulements, ... etc.

Parmi les avantages les plus importants de RMxpert c'est la possibilité de générer les données (géométriques, électromagnétiques et conditions aux limites) nécessaires à construire un projet de CAO d'une machine électrique par éléments finis en régime transitoire. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV :
Validation de la CAO établie
par ANSYS-Maxwell 2D

IV.1 Introduction

Les logiciels d'analyse par éléments finis disponibles sur le marché sont multiples. On cite: *ANSYS-Maxwell 2D/3D*, *FLUX 2D/3D*, *Infolytica Motors Solve*, *SPEED*, *Comsol Multiphysics*, *Quick_eld*, *JMag Designer*, ... etc. Le plus grand avantage d'ANSYS est qu'il utilise des simulations multi-physiques.

En ce qui concerne l'électromagnétique, ANSYS dispose d'une plate forme bien établie constituée principalement par *RMxprt*, *PExprt*, *Maxwell 2D*, *Maxwell 3D*, *Simplorer* avec *Optimetrics* pour l'optimisation. Il est capable d'effectuer des simulations 2D et 3D des différents dispositifs électromagnétiques. Il dispose de solveurs *FEA* (statiques, fréquentiels et temporels), d'un modeleur 3D, et de fonctionnalités de calcul haute performance pour accélérer les calculs de simulation [23].

Dans ce chapitre, le logiciel *ANSYS-Maxwell-2D* sera présenté et utilisé pour valider la conception du moteur à cage d'écureuil conçu précédemment et pour analyser avec finesse (par éléments finis) la dynamique électromagnétique de cet actionneur. La géométrie 2D du moteur étudié sera construite sous *RMxprt* et importé sous l'environnement *Maxwell*. Nous nous sommes limités à l'étude du cas transitoire (*Transient design*) et bidimensionnel (2D) [23].

IV.2 Présentation

ANSYS-Maxwell est le premier logiciel de simulation de champ électromagnétique destiné aux ingénieurs, chargés de concevoir et d'analyser des dispositifs électromagnétiques et électromécaniques 2D et 3D, y compris des moteurs, des actionneurs, des transformateurs, des capteurs et des bobines [22].

Maxwell utilise la méthode précise des éléments finis pour résoudre les problèmes de champs électromagnétiques en régime statiques, dans le domaine fréquentiel et variant dans le temps. L'un des principaux avantages d'*ANSYS-Maxwell* est son processeur automatisé, pour lequel on doit spécifier uniquement la géométrie, les propriétés des matériaux et le résultat souhaité [22].

À partir de là, Maxwell génère automatiquement un maillage approprié, efficace et précis pour résoudre le problème. Ce processus de maillage adaptatif automatique éprouvé élimine la complexité du processus d'analyse et vous permet de bénéficier d'une conception hautement

efficace et facile à utiliser. *ANSYS-PExpert*, *ANSYS-RMxpert* et *SIMPLORER* sont des interfaces de conception incluses dans Maxwell et qui peuvent être utilisés pour étudier des dispositifs électromagnétiques munis d'alimentation électronique et fonctionnant en régime transitoire.

IV.2.1 Création d'un model *Maxwell-2D*

Pour créer un design en *2D* sous l'environnement *Maxwell*, on développe l'arborescence du gestionnaire d'un projet (*RMxpert* par exemple), puis on clique à droite pour atteindre '*Analysis Setup*' et créer un modèle de *Maxwell* '*Create Maxwell Design*'. Cette manière de mener une conception sous *Maxwell* est très facile à réaliser, car elle utilise directement les données issues d'une conception par *RMxpert* (données d'entrée pour *FEA*) pour construire une géométrie *2D* ou *3D* et configurer l'alimentation et les conditions aux limites selon le problème électromagnétique à traiter.

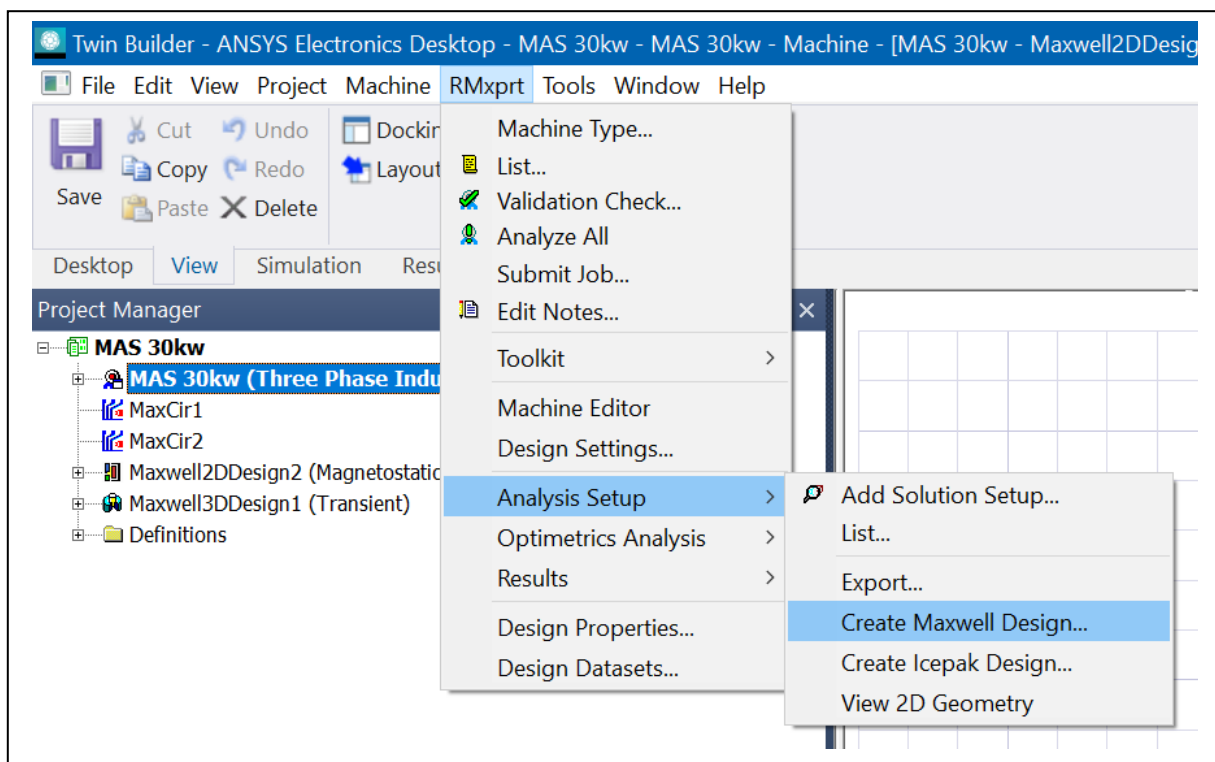


Fig. IV.1 Fenêtre de création d'un design *maxwell 2D* à partir d'un projet *RMxpert*

Maintenant, après avoir construit ce projet de conception *Maxwell-2D* en partant des résultats du projet *RMxpert*, on peut développer l'arborescence du gestionnaire de ce projet *Maxwell* pour ajuster ou modifier les données électromagnétiques du problème et les paramètres

du setup. Illustrons par exemple comment gérer le temps et le pas de simulation du solveur (voir figure IV.2).

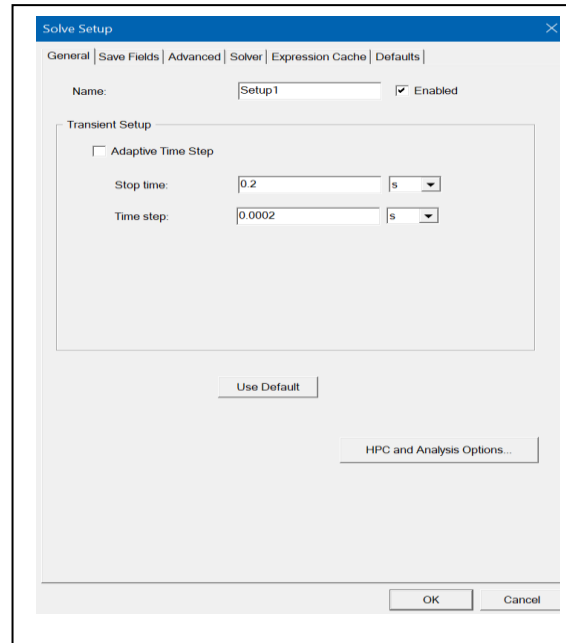


Fig. IV.2 Fenêtre gérant les paramètres temps et pas de simulation

Montrons (et à titre d'exemple également) comment gérer l'effet des courants de *Foucault* dans une analyse transitoire sous Maxwell. Il suffit d'accéder au menu '*Maxwell 2D > Excitations > Set Eddy Effects*', puis on choisit '*Select By Name*' et ensuite on tape le nom '*Bar*'.

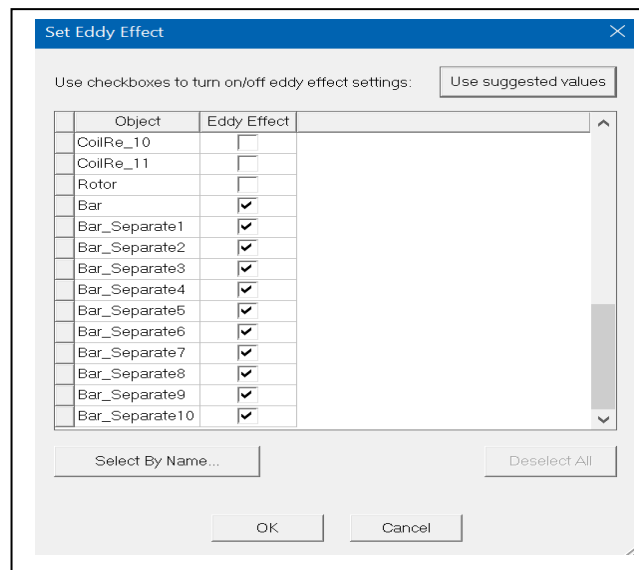


Fig. IV.3 Fenêtre gérant les effets de courants de Foucault dans un problème transitoire de *Maxwell*

IV.2.2 Validation et analyse d'un model *Maxwell-2D*

Après construction, configuration et paramétrage d'une conception sous *Maxwell*, on procède à la validation de ce modèle, en accédant au menu '*Simulation*' puis en cliquant sur '*Validate*'. Pendant cette étape, le logiciel réalise les opérations suivantes :

Configuration du '*design*' ;

- Vérification des paramètres et données du modèle *3D* correspondant ;
- Etablissement des conditions aux limites et affectation des sources d'excitation ;
- Vérification des différents paramètres électromagnétiques du projet ;
- Réalisation du maillage de la géométrie *2D* ;
- Vérification des paramètres d'analyse et de simulation ;
- Validation des paramètres à optimiser (s'il y a lieu) et leur configuration.

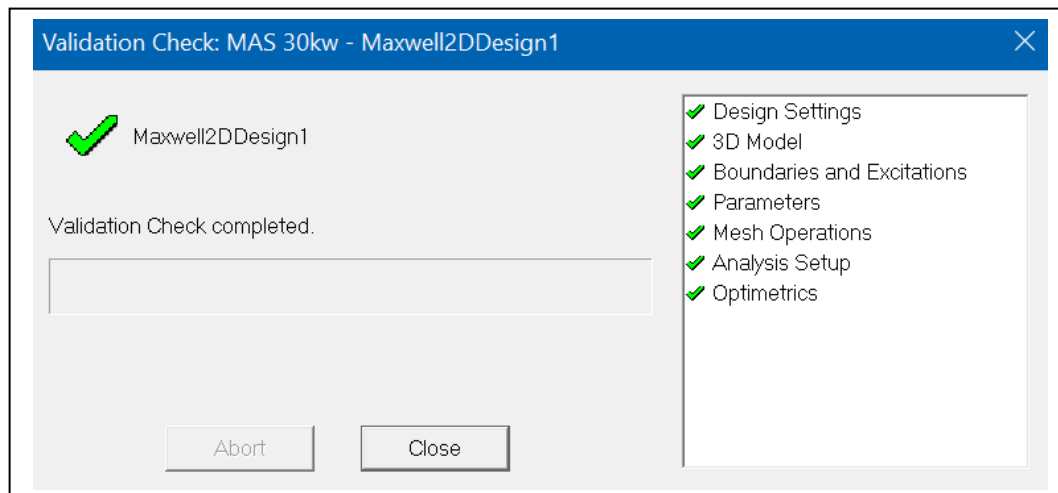


Fig. IV.4 Fenêtre de validation d'un projet de conception sous *Maxwell-2D*

Si cette étape est effectuée avec succès, on peut démarrer la simulation de ce problème *Maxwell 2D* en cliquant sur '*Analyze all*' et on laisse terminer les calculs avant de passer à visualisation et l'exploitation des résultats via le 'post-processeur' de *Maxwell*.

IV.3 Modèle *2D* d'une machine sous *Maxwell-2D*

Les résultats obtenus en utilisant *RMxpert* (par exemple ceux du moteur étudié au chapitre 3), peuvent être exploités et exportés dans un projet *Maxwell 2D / 3D* pour créer un '*design*' prêt à être traité par éléments finis. C'est une grande complexité qui peut être évitée par cet outil

(*RMxprt*) qui est interfacé avec *Maxwell* en lui préparant convenablement et communiquant les données d'entrées d'un problème à traiter par éléments finis.

Le modèle exporté peut être utilisé pour une analyse transitoire sous *Maxwell* (c'est le cas de notre étude). Toutes les validations nécessaires à cette exportation :

- Le réglage des propriétés des matériaux ;
- La considération des symétries possibles ;
- L'établissement des conditions aux limites convenables au problème à traité ;
- L'affectation des sources d'excitation des enroulements ;
- L'établissement du schéma de circuit électrique ;
- La sélection de l'objet en mouvement et le calcul du couple d'inertie et la fonction de mouvement ;

doivent être effectuées avec succès avant de passer au maillage et l'analyse de ce problème.

Des modèles graphiques de la géométrie construite et des données de sortie sont aussi créés. Des exemples de modèle de moteur à courant continu et moteur synchrone, générés automatiquement sous *Maxwell 2D*, sont illustrés par la figure suivante.

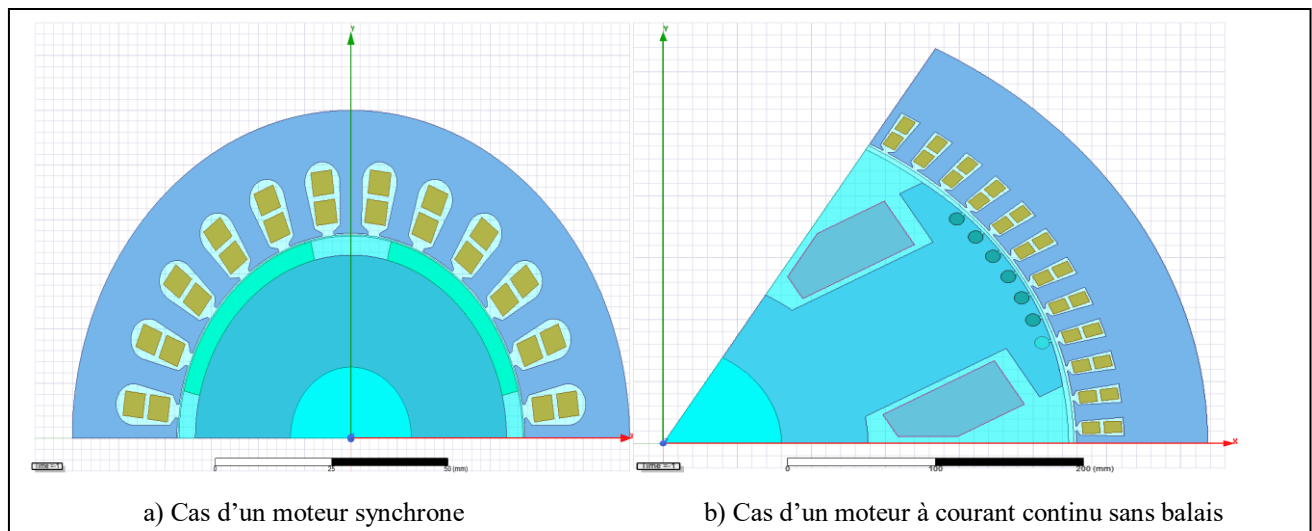


Fig. IV.5 Exemple de géométries 2D importées sous *Maxwell-2D*

IV.4 À propos du maillage sous *Maxwell*

Le maillage est une partie intégrante du processus de calcul par éléments finis. Le maillage influence la précision, la convergence et la vitesse de la solution. En outre, le temps nécessaire pour créer et mailler un modèle est souvent une partie importante du temps qu'il faut pour obtenir des résultats. Le mailleur *ANSYS* est l'un des plus puissants sur marché. Le maillage est une partie intégrante du processus de calcul par éléments finis.

Maxwell maille automatiquement tous les solides (objets du modèle) dans la géométrie avant le lancement du processus de résolution. Dans les solveurs statiques de *Maxwell*, le maillage est automatiquement affiné pour atteindre le niveau de précision dans les calculs de champs. Ceci est appelé raffinement de maillage adaptatif. *Maxwell* offre également une large gamme d'opérations de maillage qui peuvent être utilisées pour réaliser un maillage selon les besoins des utilisateurs.

Une fois le contexte temporel et le type de problème ou de solution sont définis, on passe au maillage de notre modèle 2D. Pour ce faire, on sélectionne dans le menu : 'Edit>Select All' puis on accède à : 'Maxwell 2D>Fields>Plot Mesh' dans 'Create Mesh Plot window'. Voici un exemple de maillage obtenu sous *Maxwell-2D* :

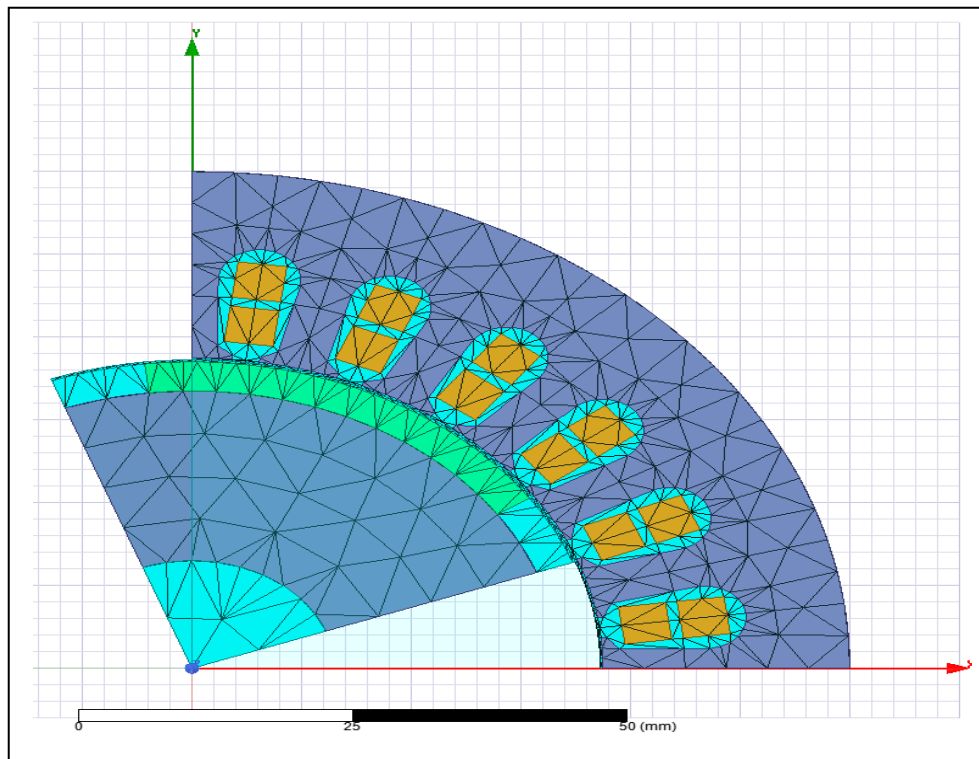


Fig. IV.6 Exemple d'un maillage de géomètre 2D sous *Maxwell*

IV.5 Analyse et exploitation des résultats de simulation

Après construction du problème sous *Maxwell-2D* (importation de la géométrie, du paramétrage, ... ; et leur validation) et maillage de la géométrie résultante, on peut passer à l'analyse de ce problème de conception *2D* établi. Une fois cette analyse est effectuée avec succès, on peut aborder la visualisation et l'exploitation des résultats.

IV.5.1 Géométrie *2D* et *3D* du moteur étudié

Visualisons tout d'abord la géométrie réduite et importée à partir de *RMxpert* sous *Maxwell-2D* et *3D* du moteur étudié, voir figure IV.7.

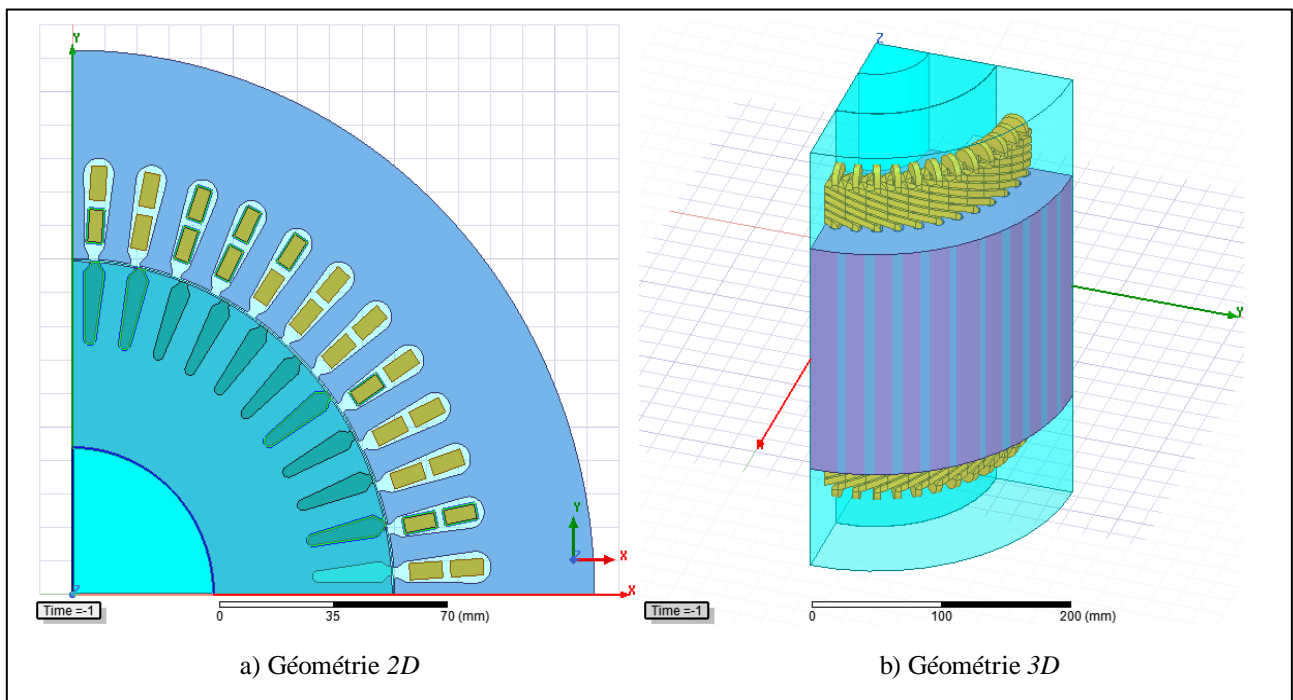


Fig. IV.7 Géométries *2D* et *3D* du moteur étudié sous *Maxwell*

Rappelons que notre étude s'est limitée sur le cas transitoire bidimensionnel faute de temps et de moyens de calcul.

IV.5.2 Maillage du moteur étudié sous *Maxwell-2D*

Visualisons maintenant la géométrie avec son maillage sous *Maxwell-2D* prise à l'instant de simulation *14 ms*, voir figure IV.8.

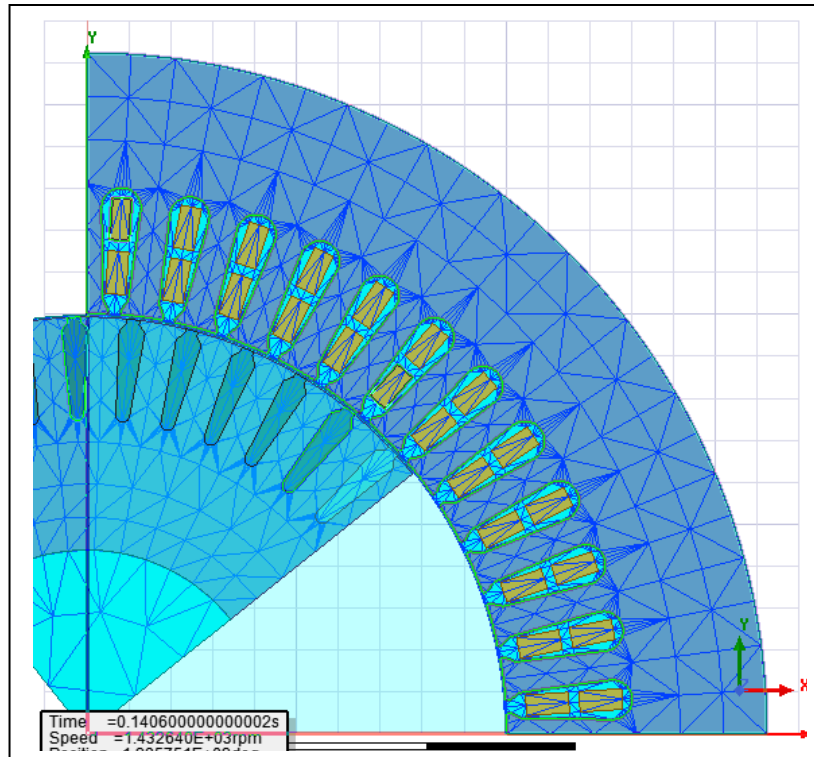


Fig. IV.8 Maillage de la géométrie 2D du moteur étudié sous *Maxwell*

IV.5.3 Résultats et cartographie de champs

Après lancement de l'analyse, nous aurons la possibilité de visualiser une carte de distribution du champ ou de l'induction magnétique sur la géométrie analysée (en mode dégradé, vecteurs ou lignes) avec une échelle des équivalents en termes de couleurs. Cette représentation nous donne une idée générale sur l'état magnétique des différentes zones transversales de la machine. Ceci peut être effectué en choisissant dans le menu : '*Maxwell 2D >Results>Create Field Report >Rectangular Plot*' et on choisit le plot désiré, ensuite on appuie sur '*New Report*'. Voici un exemple de la répartition du champ magnétique sur une section 2D du moteur électrique étudié.

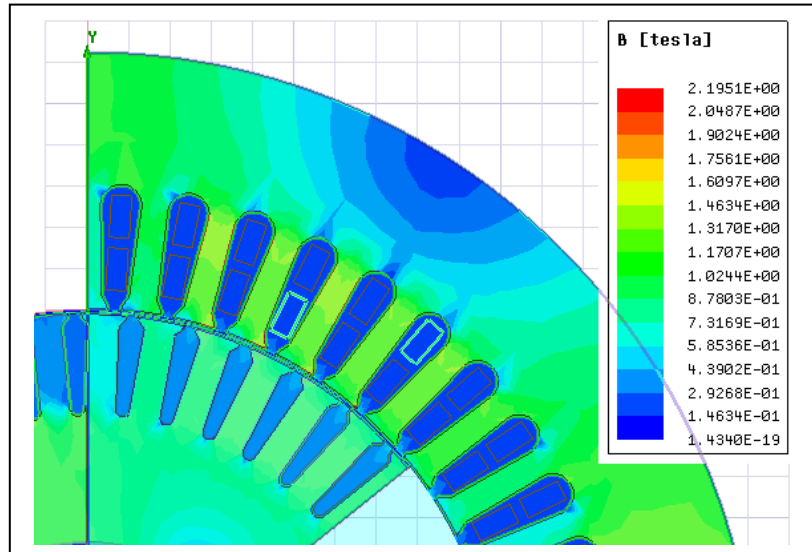


Fig. IV.9 Cartographie de l'induction magnétique sur une section 2D du moteur étudié sous *Maxwell*

IV.5.4 Caractéristiques

Nous avons la possibilité de visualiser et tracer plusieurs caractéristiques temporelles (puisque nous avons considéré dans ce travail une analyse d'un modèle électromagnétique transitoire) telles que les courants, les flux et les tensions induites des phases statoriques, le couple électromagnétique, les puissances électriques et mécaniques, la vitesse de rotation, ... etc.

On donne dans ce qui suit l'exemple des tracés des tensions appliquées au stator de la machine étudiée, les tensions induites dans chaque phase ainsi que les puissances électrique et mécanique respectivement (voir figure IV.10).

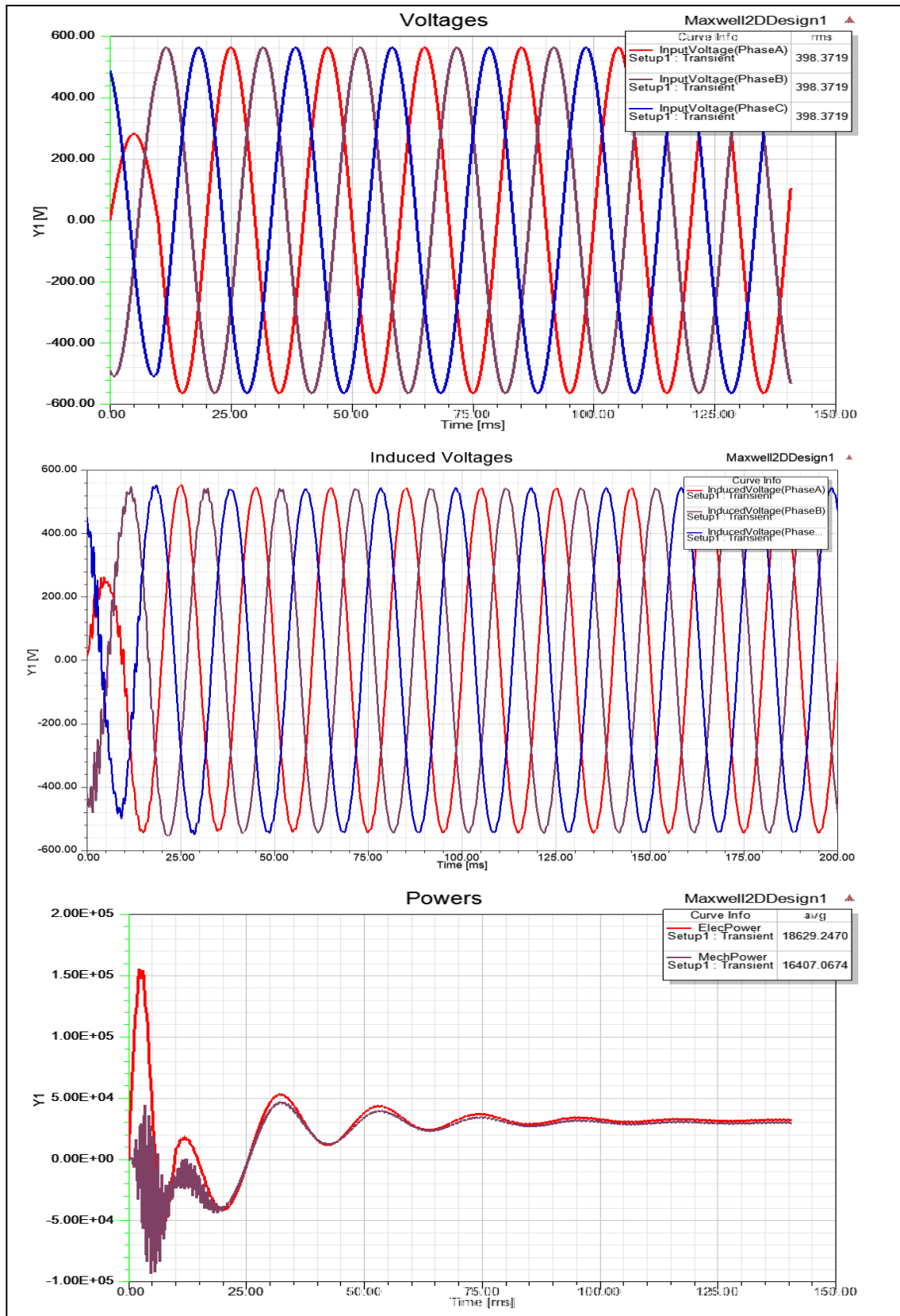


Fig. IV.10 Visualisation de quelques caractéristiques temporelles issues de *Maxwell-2D*

IV.6 Exemple d'application

Maintenant, après présentation du logiciel *Maxwell-2D*, nous allons appliquer les différentes étapes d'établissement, validation et analyse sur le projet *RMxpvt* de notre machine étudiée en partant de données générales destinées au projet de calcul par éléments finis (*Maxwell-2D* dans notre cas). Toutes ces opérations ont été effectuées avec succès et nous avons obtenu les résultats que nous allons présenter et discuter ci-après.

IV.6.1 Géométrie du moteur étudié sous *Maxwell 2D*

Rappelons tout d'abord la géométrie 2D du moteur étudié réduite à un quart d'une section transversale circulaire sous *Maxwell-2D* qui a bien su exploiter toutes les symétries et antisymétries de la machine (rappelons que notre machine est tétra-polaire).

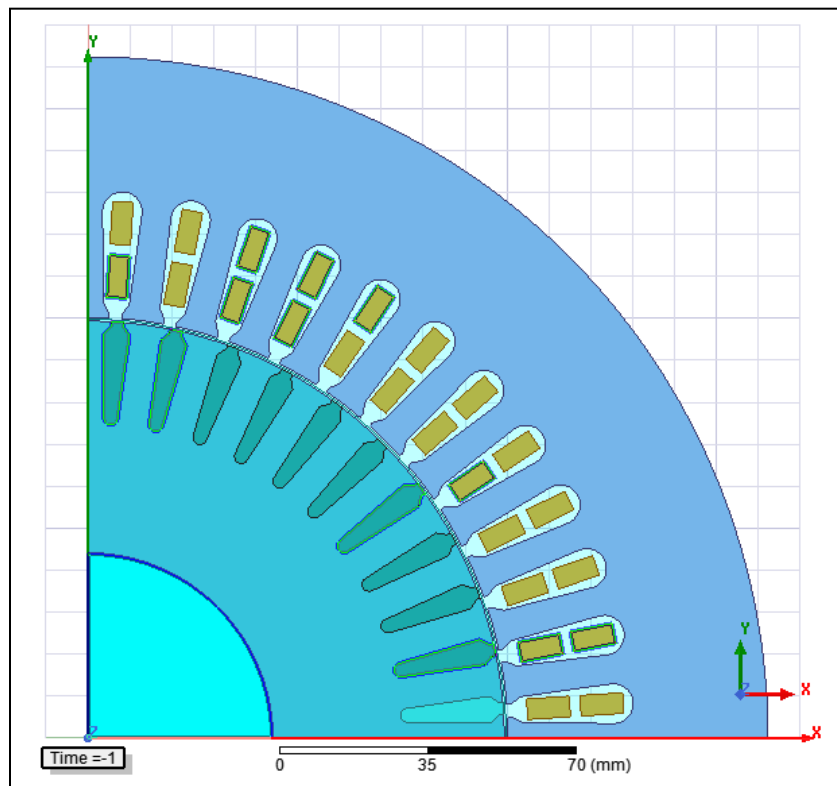


Fig. IV.11 Géométrie du moteur étudié sous *Maxwell-2D*

IV.6.2 Cartographie de champs du moteur étudié

La visualisation des lignes de champ est d'un grand intérêt pour le concepteur. En effet, ces lignes délimitent les tubes de flux et donnent l'image de l'état de saturation des matériaux ferromagnétiques et de la variation des inductions dans les différentes régions du domaine analysé. Elles sont identiques aux courbes équipotentielles, et le flux canalisé entre deux lignes est directement relié à l'écart des potentiels, le coefficient de proportionnalité étant en l'occurrence la longueur de la machine. La figure IV.12 illustre le cas d'une cartographie des vecteurs de l'induction magnétique du moteur étudié.

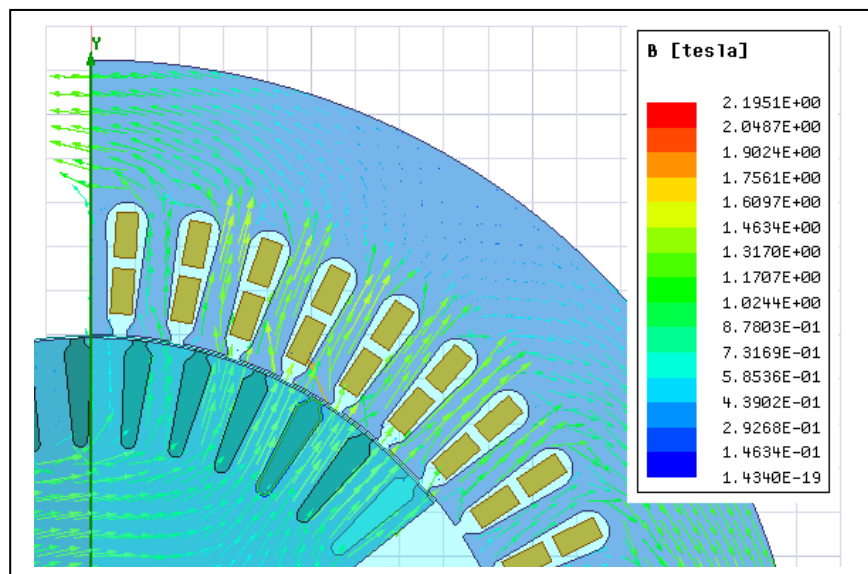


Fig. IV.12 Cartographie des vecteurs de l'induction magnétique sur une section 2D du moteur étudié sous *Maxwell*

IV.6.3 Quelques caractéristiques du moteur étudié

Ci-dessous, nous allons présenter et discuter quelques caractéristiques temporelles du moteur de 30 kW étudié à l'aide de *Maxwell-2D* en régime transitoire électromagnétique. Dans ces conditions, la vitesse mécanique du rotor est supposé constante et égale à 1432.64 *tr/min* (valeur nominale trouvée pendant la réalisation du projet *RMxprt*) sur un intervalle de temps de 200 ms. Les graphiques suivants représentent respectivement l'évolution des trois courants de phases statoriques, du couple électromagnétiques et des flux dans les trois enroulements statoriques.

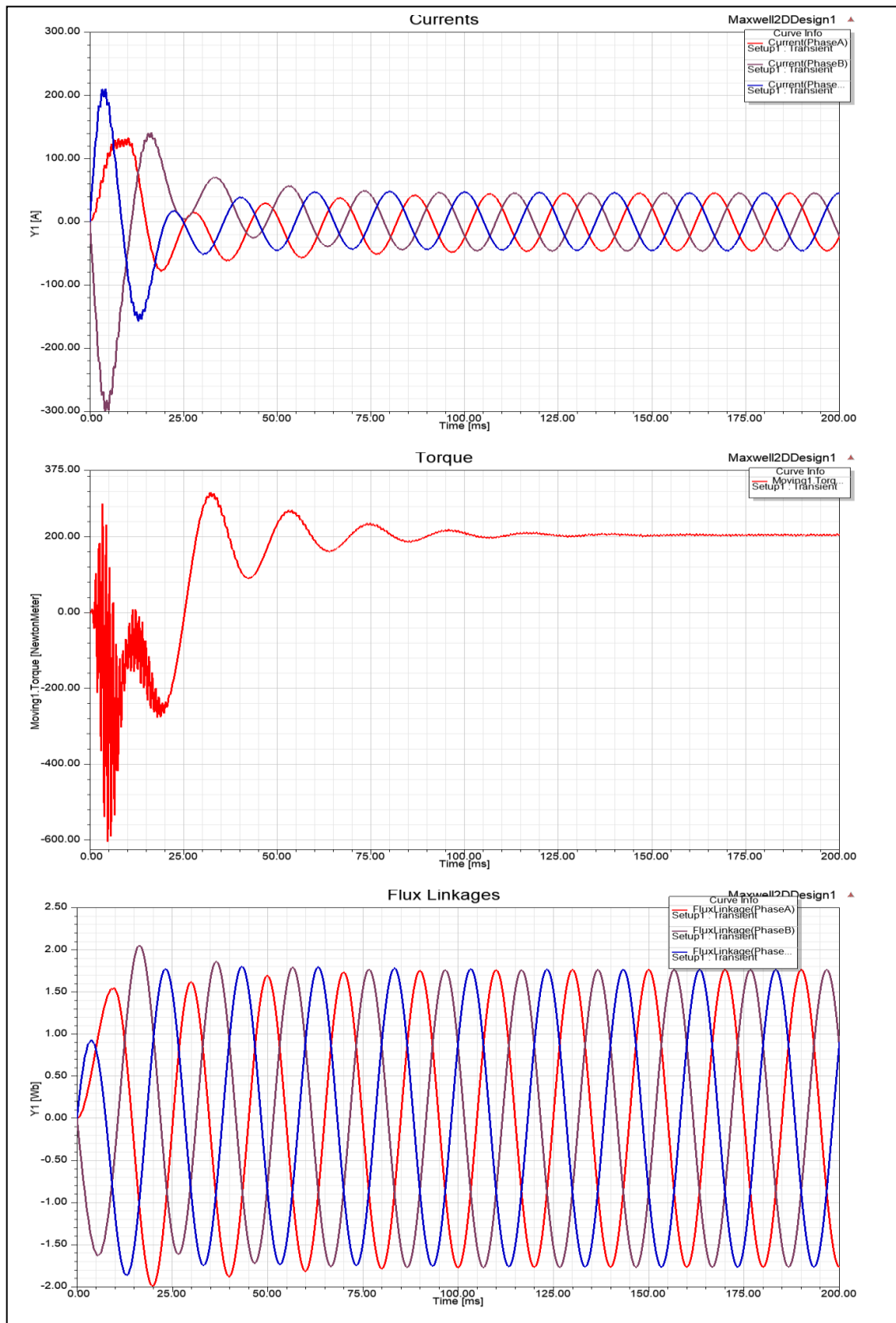


Fig. IV.13 Visualisation de quelques caractéristiques temporelles du moteur étudié obtenues par Maxwell-2D

IV.6.4 Interprétation et comparaison des résultats

On note que les courants des phases statoriques sont bien déphasés, et que l'effet de la saturation sur le courant absorbé par la machine est moins accentué en régime nominal permanent ce qui nous rassure sur la bonne conception de la machine.

Notons que l'application de la tension est accompagnée de grands pics de courant (d'une amplitude avoisinant les 300 A. Ce régime transitoire qui dure environ 100 ms est accompagné également par des ondulations de couple, il caractérise le temps d'établissement des flux dans les trois phases de la machine.

Maintenant nous allons nous baser sur les résultats de Maxwell-2D en régime permanent et dresser une comparaison des résultats obtenus par les méthodes de conception utilisées :

- Méthode classique utilisée pour le dimensionnement préliminaire ;
- *RMxpvt* utilisé pour caractériser la conception initiale établie la première méthode ;
- *Mawxell-2D* considérée comme une méthode de référence puisqu'elle est basée sur le calcul par éléments finis et elle est la plus précise.

Le tableau suivant résume quelques résultats concernant des caractéristiques statiques obtenues par ces trois méthodes :

Tableau IV.1 Comparaison des résultats de *Maxwell-2D* à ceux de la méthode classique et de *RMxpvt*

Caractéristique	Méthode de calcul		
	Méthode classique	<i>RMxpvt</i>	<i>Maxwell-2D</i>
Puissance de sortie (<i>kW</i>)	30.000	30.0024	30.142
Vitesse de rotation (<i>tr/min</i>)	1470	1430.5	1432.64
Couple utile (<i>N.m</i>)	194.35	200.281	200.91
Courant de phase statorique (<i>A</i>)	30.83	31.8878	32.17
Flux magnétique par phase (<i>Wb</i>)	--	--	1.25
Puissance d'entrée (<i>kW</i>)	--	33.0903	33.197
Rendement (%)	--	90.67	90.8

Dans l'ensemble, on peut dire que les caractéristiques principales du cahier de charge initial exigé pour la conception de notre moteur asynchrone de 30 *kW* ont été respectées et validées mise à part la vitesse de rotation qui a changé par rapport à sa valeur de départ de 2.54 %.

Mais une fois de plus faute de temps, on pas pu rectifier ce décalage en minimisant cet écart par optimisation de la conception établie par utilisation du module ‘*optimetrics*’ sous *RMxpvt* ou *ANSYS-Maxwell-2D*.

IV.7 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté tout d’abord un logiciel de CAO des dispositifs électromagnétiques en général et des machines électriques en particulier, à savoir *Maxwell-2D*. En effet, nous avons décrit les étapes nécessaires pour faire un ‘design’ en 2D d’une machine électrique en se basant sur un calcul électromagnétique transitoire par éléments finis.

Le modèle (géométrie, paramétrage, conditions aux limites, affectations des matériaux et des sources, ... etc.) a été rapidement construit grâce à l’interface existant entre *RMxpvt* et *Maxwell* et qui permet nous a permis d’importer un modèle numérique de la machine asynchrone, prêt à analyser par la méthode des éléments finis, sous l’environnement *Maxwell-2D*.

Ainsi, nous avons simulé notre machine asynchrone à cage d’écureuil de 30 kW en deux dimensions (2D). Et nous avons visualisé la géométrie, le maillage et la répartition du champ électromagnétique dans une section transversale 2D de la machine.

Ensuite, nous avons simulé la machine en formulation magnétodynamique (qui tient compte des transitoires électromagnétiques seulement et suppose la vitesse constante). Ceci nous permis d’extraire un ensemble de caractéristiques temporelles (couple électromagnétique, courants de phase, flux magnétique des phases statoriques, puissances utile et absorbées,...) et de valider les résultats obtenus par le biais d’une comparaison avec les résultats du dimensionnement préliminaire et ceux de *RMxpvt*.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Nous avons, au cours de ce travail, abordé le problème de la *CAO* des machines électriques, et plus particulièrement les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.

Nous avons voulu mettre en évidence l'intérêt d'utiliser des techniques de *CAO* modernes des machines électriques de façon générale permettant d'améliorer les performances de celles-ci et facilitant énormément la tâche du concepteur.

Sachant que la conception des machines électriques s'est toujours dépendue sur le calcul analytique, les informations obtenues et les équations empiriques jusqu'à l'introduction de la *CAO* ont été introduits, car ceci facilite le processus de modélisation et de réalisation des projets d'ingénieur, de calcul, réduit l'effort et le temps, réduit le coût et permis une surveillance précise de toutes les propriétés de la machine, ainsi que le suivi de ses propriétés électromagnétiques.

Dans ce travail, nous sommes intéressés au dimensionnement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil selon un cahier de charge spécifique, en utilisant l'une des méthodes les plus populaires, et avec l'aide de deux modules d'un logiciel de *CAO* (*ANSYS-RMxprt*, *ANSYS-Maxwell*).

Dans le premier chapitre, nous avons donné une idée générale des moteurs à induction, leur principe de fonctionnement et leurs différentes caractéristiques, et une brève définition des différentes méthodes de modélisation de ce genre de moteurs.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la procédure de calcul analytique et de dimensionnement préliminaire d'un moteur asynchrone selon la méthode de '*Liwschitz*'.

Ensuite dans le troisième chapitre, après avoir présenté l'outil d'aide à la *CAO* des machines électriques (*RMxprt*), et en se basant sur calcul préliminaire obtenu au chapitre II, nous avons pu obtenir les différentes caractéristiques de la machine conçue, ce qui a donné des résultats très proche du cahier des charges, avec une évaluation rapide et assez précise des

performances de la machine. Cet outil nous a permis aussi de créer une géométrie *2D* (qui est une coupe transversale bidimensionnelle de la machine conçue).

Enfin et au dernier chapitre, après avoir présenté le module *Maxwell 2D* de *ANSYS*, et avec son aide, nous avons pu étudier avec finesse une coupe bidimensionnelle de la machine (exportée du module *RMxprt*), montrant le maillage et le calcul électromagnétique transitoire en utilisant la méthode des éléments finis. Ceci nous a permis de tracer les lignes de champ magnétique et d'induction magnétique à l'intérieur de la machine, leur distribution et leur densité, ainsi que de déterminer les caractéristiques électromagnétique transitoire de la machine. Ces résultats nous ont permis aussi de valider les caractéristiques statiques obtenues précédemment par *RMxprt*. Nous avons pu construire et importer la géométrie tridimensionnelle de la machine étudiée sous *ANSYS-Maxwell 3D*, mais la contrainte 'temps de calcul' nous a limités à l'étude *2D*.

Dans l'ensemble, ces outils de *CAO* nous ont facilités énormément cette tâche délicate de dimensionnement d'une machine asynchrone de *30 kW*. Cette démarche peut être suivie pour concevoir facilement et rapidement des machines de différentes puissances. En outre, des modules très intéressants de ce logiciel puissant peuvent être utilisés pour respecter plus précisément le cahier des charges ou encore améliorer les performances de la machine (*Optimetric*). De plus, les régimes transitoires incluant les phénomènes mécaniques et/ou thermiques peuvent être étudiés sous cet environnement software puissant. On peut projeter également un couplage de la machine conçue avec un convertisseur de l'électronique de puissance via le module *SIMLPOWER*, intégré à la suite électromagnétique de *ANSYS-Maxwell*, peut être effectué pour étudier la dynamique de tout l'entraînement électrique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] C. E. Neagoe, “Etude de Nouvelles Structures de Machines Electriques”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1996.
- [2] A. E. Perret, “Contribution à la Conception de Moteurs Electriques Assistées par Ordinateur”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1984.
- [3] M. Sehili et E. Gueddoudj ‘Conception Assistée par Ordinateur des Machines Asynchrones à Rotor en Court Circuit’, Mémoire d’Ingénieur, Université de M’sila, Algérie, 2005.
- [4] --, ‘Electric Motors | AC & DC Motors - USA Roller Chain’, available at: <https://www.usarollerchain.com/electric-motors-s/5767.htm>
- [5] J.-C. Sabonnadière, ‘Conception Assistée par Ordinateur (CAO) en Génie Electrique’, Techniques de l’Ingénieur, Traité Génie électrique, D 3 585.
- [6] H. E. Demni, ‘Conception en Génie Electrique à l’Aide d’Eléments Caractérisés », Thèse de Doctorat, INPT de Toulouse, France, 2004.
- [7] M. Jufer et J.-C. Sabonnadière, ‘Conception Assistée par Ordinateur (CAO) : Moteur Asynchrone’ , Techniques de l’Ingénieur, Traité Génie électrique, D 3 590.
- [8] A. Chahmi, ‘Identification Paramétrique de la Machine Asynchrone Dédiee au Diagnostic’. thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie - Oran, Algérie, 2017.
- [9] M. Bensmaine et T. Mebarek, ‘Dimensionnement et Simulation d’un Moteur Asynchrone à Cage d’Ecureuil’, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie, 2016.
- [10] R. Redjem, ‘Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques’, Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mentouri - Constantine, Algérie, 2006.
- [11] C. Mokrane et R. Tarik, ‘Conception et Réalisation d’un Moteur Asynchrone Triphasé à Cage d’Ecureuil à Haut Rendement’, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [12] R. P. Bouchard et G. Olivier, ‘Conception de Moteurs Asynchrones Triphasés’, Edition de l’Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, 1997.

- [13] B. Nogarede, 'Machines Tournantes : Principes et Constitution', Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D 3 411.
- [14] J. Saint-Michel, 'Bobinage des Machines Tournantes à Courant Alternatif', Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D 3 420.
- [15] M. Sahoui et O. Benachour, 'Modélisation et Diagnostic de la Cassure des Barres Rotoriques d'une Machine Asynchrone' Mémoire de Master, Université de Blida –Algérie, 2018.
- [16] M. Belatel, 'Etude des Machines Electriques par CAO', Thèse de Doctorat, Université Mentouri – Constantine, Algérie 2009.
- [17] I. Boldea et S. A. Nasar, 'The Induction Machines Design Handbook', Second Edition, Taylor & Francis Group, 2010.
- [18] M. Liwschitz, 'Calcul des Machines Electriques', Tome II, Editions SPES, Lausanne, Suisse, 1970.
- [19] S. Chekroun, A. Benoudjit et B. Abdelhadi, 'Approche Géométrique pour la Conception Assisté par Ordinateur des Machines à Induction', Conference on Electrical Engineering Batna, Algérie, 2002.
- [20] L. Mokrani, 'Contribution à la CAO Optimisée des Machines Electrique, Application au Moteur Linéaire à Induction', Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Batna – Algérie, 2005.
- [21] L. Mokrani, 'Cours de CAO des Machines Electriques', Master 2 'Machines Electriques', Université de Laghouat – Algérie, 2019/2020.
- [22] --, ANSYS Maxwell - Logiciel de Simulation de Champ Electromagnétique par ANSYS | Direct Industry. Disponible à : <https://www.directindustry.fr/prod/ansys/product-9123-504524.html>
- [23] A. Soman, D. R. Holmukhe et D. D. G. Bharadwaj, "Analyzing and Testing of Performance of DSWIM by ANSYS Maxwell", Journal International de Recherche Scientifique et Technologique, Vol. 9, No. 1, 2020.
- [24] --, 'RMxpvt Manual.pdf | Electric Motor | Magnetic Devices', File available at: <https://www.scribd.com/doc/129666336/RMxpvt-Manual-pdf>).