

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

THÈME

**Conception et analyse d'un MSAP application
à un véhicule électrique**

Préparé par :
Bousta Assia
Lakhdari Habiba

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
S.Hasaaine	Pr	Président
S.Zine	MCB	Examineur 1
L. Bessoltane	MAA	Examineur 2
M.Becheikh	MCB	Encadreur

PROMOTION 2022 /2023



Remerciements

Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude.

*Ainsi, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Mr **BECHEIKH Mostefa** pour avoir proposé ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et pour son précieux conseil.*

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation par ailleurs, nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous les amis et collègues pour le soutien moral.



Dédicaces

Je dédie mon travail avant tous à mes chers parents, mon PÈRE qui ne cesse pas de m'encourager, et qui ma toujours soutenu, Ma jolie MÈRE symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour sa tendresse profonde « que Dieu me les protège ».

A mes chers frères et mes sœurs et ses époux.

*A toute ma famille BOUSTA, mes collègues, mes amis
à toute les personnes que j'ai oubliées et que je n'ai pas citées.*

Assia



Dédicaces

*Je dédie ce travail à : A mon chère père
Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour,
son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux
conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma
vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il,
l'expression de mes sentiments et de mon éternelle
gratitude.*

*Mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de
persévérance, de courage et de générosité.*

*A tous les membres de ma famille LAKHDARI, petits et
grands*

A mes chères amies

*A tous mes camarades de la promotion commande
électrique*

Habiba



**SYMBOLES
ET
NOTATIONS**

MCC	Moteur à courant continue	
MAS	Moteur asynchrone	
MS	Moteur synchrone	
MSAP	Moteur synchrone à aimant permanent	
MSRB	Moteur synchrone à rotor bobiné	
VE	Véhicule électrique	
PWM	MLI	
B	Induction magnétique	[T]
H	Le champ magnétique	[A/m]
B_r	Induction rémanente	[T]
H_{cb}	Champ coercitif	A/m
P_b	Puissance maximale	[w]
n_b	Vitesse de base	[tour/minute]
n_{max}	Vitesse maximale	[tour/minute]
V_{cc}	Tension à courant continue	V
V_{phmax}	Tension de phase maximale	V
T_{eb}	Couple de phase	N.m
λ	Conductivité thermique	w/m/k
l_{stack}	La longueur du stator	m
D_{is}	Diamètre intérieure du stator	m
f_t	Force spécifique tangentielle	
B_{gPM}	La densité de flux d'entrefer des particules	T
Ψ_{PMmax}	Flux magnétique	W_b
θ_{er}	L'angle électrique	rad/S
p_1	Nombre de pair de pole	/

W_o	L'ouverture de l'encoche	m
α_{stmin}	L'angle au centre de la dent du stator	degré
α_s	L'angle géométrique de l'encoche	degré
h_{su}	hauteur de l'encoche	m
K_{fringe}	Facteur frangeant	/
g	L'épaisseur de l'entrefer	m
h_{PM}	Largeur des aimants	m
A_{co}	la surface active de l'encoche du stator	m ²
j_{cob}	Densité de courant	A/m ²
τ_s	pas de l'encoche du stator	m
b_{s1}	Largeur supérieure de l'encoche	m
b_{s2}	Largeur inférieure de l'encoche	m
h_{su}	Hauteur d'encoche	m
A_{cof}	La zone d'emplacement active	m ²
h_{ys}	La hauteur de joug	m
B_{ys}	La culasse du stator	T
D_{out}	Diamètre extérieure du stator	m
R_s	Résistance de phase	Ω
ρ_{cc}	Masse volumique	Kg.m ³
l_{turn}	Longueur de tour	m
μ_0	Perméabilité magnétique du vide	H/m
L_m	L'inductance de phase	H

L_{s1}	L'inductance de fuite	H
L_{12}	L'inductance de couplage	H
L_s	L'inductance synchrone	H
P_{cob}	Perte de cuivre	w
I_b	Courant de base	A
B_{ag}	Densité de flux d'entrefer	T
B_{ry}	Densité de flux d'étrier du rotor	T
q_1	Emplacements du stator par pôle et par phase	/
B_{st}	Densité de flux dentaire du stator	T
η_b	Rendement de base	/
E_1	Force électromotrice	joule
S_n	Puissance apparent	VA
$\cos \varphi_b$	Facteur de puissance de vitesse de base	/
I_d	Courant direct	A
I_q	Courant quadratique	A
P_s	Nombre de pole du rotor	/
N_{ss}	Nombre d'emplacement du stator	/

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I <i>Généralités sur les véhicules électriques</i>	3
I.1 Introduction	4
I.2 Historique	4
I.3 Définition	5
I.4 Fonctionnement d'un véhicule électrique	6
I.5 Classification des véhicules électriques	7
I.5.1. Véhicules tout électrique	7
I.5.2 Véhicules électriques à batteries par prise de courant	7
I.5.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible	7
I.5.4 Véhicules hybrides	8
I.6 Système de stockage d'énergie par batterie	8
I.7 Configuration des véhicules électriques	9
I.8 Description générale de la chaîne de traction	11
I.8.1 Le Moteur Electrique d'Entrainement	12
I.9 Avantages et inconvénient des VE	13
I.9.1 Les avantage	13
I.9.2 Les inconvénients	14
I.10 Conclusion	14
Chapitre II <u><i>L'état de l'art d'un MSAP</i></u>	15
II.1 Introduction	16
II.2.1 Définition de La machine synchrone	16
II.2.2 Constitution de la Machine Synchrone	17
II.2.3. Configurations rotoriques de la machine à aimants permanents	17
II.2.3.2 Aimants inséré	19
II.2.3.3 Aimants enterrés	19
II.2.3.4 Aimants à concentration de flux	20
II.3 Principe de fonctionnement de la MSAP	20
II.4 Choix des aimants	21
II.4.a Caractéristique de désaimantation	22

II.4.b Causes de la désaimantation.....	23
II.4.c Les différents types d'aimants permanents.....	23
II.6 Avantages des MSAP par rapport aux autres types de machines.....	26
II.7. Inconvénients de la MSAP	27
II.8 conclusion.....	27
Chapitre III <u> Méthodologie de dimensionnement</u>	28
III.1 Introduction	29
III.2 Principes des bases des conceptions.....	29
III.3 Calcul électromagnétique	29
III.4 Choix des quelques facteurs des dimensionnements.....	29
III.4.1 La charge électrique spécifique	29
III.4.2 Densité de flux d'entrefer d'un aimant permanent	30
III.4.3 La densité de flux dentaire du stator	30
III.4.4 La densité de flux d'étrier du rotor :	30
III.4.5 La densité de flux d'étrier du stator	31
III.5 Méthodologie de conception préliminaire des MSAP pour les automobiles.....	32
III.5.1 Tension de phase maximale.....	32
III.5.2 Diamètre intérieur du stator	32
III.5.3 Dimensionnement des matériaux.....	33
III.5.4 Taille de l'encoche du stator	34
III.6 Paramètre de la machine	37
III.6.1 La résistance de phase	37
III.6.2 Vérification de la capacité du couple maximale.....	39
III.7 Application	39
III.8 Conclusion.....	40
Chapitre IV <i> Application et visualisation du dimensionnement</i>	41
IV.1 Introduction	42
IV.2 Cahier des charges.....	42
IV.2.1Exemple 1 :	42
IV.3 Données générales.....	42
IV.4 Identification de la machine.....	43
IV.5 Stator.....	45

IV.5.1 Fente	45
IV.5.2 Bobinage.....	47
IV.5.3 Logement.....	52
IV.6 Rotors.....	53
IV.6.1 Aimant.....	53
IV.6.2 Polarisation	55
IV.6.3 Matériaux.....	56
IV.6.3.1 Arbre	56
IV.6.3.2 Aimant intérieur.....	56
IV.6.3.3 Circuit magnétique.....	56
IV.6.3.4 Entrefer	56
IV.6.3.5 Masses	56
IV.8 Exemple 2	56
IV.8.1 Données générales	57
IV.8.1.1 Vue radiale.....	57
IV.8.2 Identifiant de l'ordinateur	57
IV.8.3 Stator	58
IV.8.3.1 L'encoche	58
IV.8.3.2 Bobinage.....	60
IV.8.3.3 Matériaux.....	60
IV.8.4 Rotors	65
IV.8.4.1 Aimant.....	65
IV.8.4.2 Polarisation.....	67
IV.8.4.3 Matériaux.....	67
IV.9 conclusion	68
Conclusion générale	70

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les véhicules électriques

Figure 1. 1: Système de propulsion d'un VE.....	5
Figure 1. 2: Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique.....	6
Figure 1. 3: Schéma de principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène	7
Figure 1. 4: Véhicule électrique hybride.	8
Figure 1. 5: Structure de base du groupe motopropulseur du véhicule électrique.	9
Figure 1. 6: illustration conceptuelle de la configuration générale du VE.	9
Figure 1. 7: configurations VE possibles.	10
Figure 1. 8: Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.....	12
Figure 1. 9: Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE.	13
Figure 1. 10: Classification des entraînements par moteur électrique pour VE.....	13

Chapitre II : L'état de l'art d'un MSAP

Figure 2. 1: Chronologie et caractéristiques des machines électriques pour l'application automobile.....	16
Figure 2. 2:Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent	17
Figure 2. 3: Différentes topologies de machines synchrones considérées	18
Figure 2. 4: Moteur industriel à aimants en surface	19
Figure 2. 5: Figure d'une MSAP à aimants enterrés (pôles saillants) et à 2 paires de pôles	20
Figure 2. 6:Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent	21
Figure 2. 7: Classement des matériaux pour aimants permanents	22
Figure 2. 8: Courbe de désaimantation d'un matériau pour aimant permanent.....	23
Figure 2. 9: Aimants Alnico	24
Figure 2. 10: aimant ferrites.....	24
Figure 2. 11: aimant terre rare.....	25
Figure 2. 12: Coûts des différentes familles d'aimants en fonction de leurs performances magnétiques.	25
Figure 2. 13: Principales applications des machines synchrones à aimants permanents	26

Chapitre III : Méthodologie de dimensionnement

Figure 3. 1: Courbes d'aimantation pour quelques matériaux magnétiques doux typiques.....	30
Figure 3. 2: pertes de fer par rapport à la densité de flux.	31
Figure 3. 3: script de dimensionnement.	40

Chapitre IV : Application et Visualisation du dimensionnement

Figure 4. 1: Conception - Vue radiale.	43
---	----

Figure 4. 2: Vue radiale de l'encoche.....	45
Figure 4. 3: Disposition de l'enroulement.	50
Figure 4. 4: Vue radial.....	52
Figure 4. 5: Vue axiale du bobinage.....	53
Figure 4. 6: Vue radiale d'un aimant.....	54
Figure 4. 7: Polarisation-Vue radiale.....	55
Figure 4.8:Vue radiale d'un moteur de toyota Piruis.....	57
Figure 4. 9: Vue radiale de l'encoche.....	59
Figure 4.10:Disposition du bobinage.	62
Figure 4. 11: Vue radiale.....	64
Figure 4 12:Vue axiale du bobinage.....	65
Figure 4. 13: Vue radiale d'un aimant.....	66
Figure 4. 14:Polarisation-Vue radiale.....	67

*Introduction
générale*

Introduction générale

Le développement de la mobilité électrique est en pleine expansion et les véhicules électriques sont de plus en plus présents sur les routes. Cependant, pour répondre aux exigences de performance et d'efficacité énergétique, il est crucial de disposer de moteurs électriques performants et adaptés à cette application spécifique. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire de master qui propose une étude détaillée de la conception et de l'analyse d'un moteur synchrone à aimant permanent dédié aux véhicules électriques.

L'entraînement de machine synchrone à aimant permanent est l'un des meilleurs choix pour une gamme complète d'applications de contrôle de mouvement. Par exemple, le moteur synchrone est largement utilisé dans la robotique, les machines-outils, les actionneurs, et il est envisagé dans des applications de haute puissance telles que les entraînements industriels et la propulsion des véhicules. Il est également utilisé pour des applications résidentielles et commerciales. Le MSAP est connu pour avoir une faible ondulation de couple, des performances dynamiques supérieures, un rendement élevé et une densité de puissance élevée [1].

Les véhicules électriques (VE) sont devenus populaires en tant que contre-mesure d'économie d'énergie. Les moteurs de traction VE doivent avoir un rendement élevé, une densité de puissance élevée, de faibles coûts de fabrication et un volume réduit. Récemment, des moteurs réduits en particulier ont été nécessaires pour améliorer les niveaux de consommation d'énergie électrique et conserver l'espace où le moteur est logé. L'une des méthodes utilisées pour réduire la taille du volume du moteur consiste à augmenter la vitesse du moteur [2].

Ce présent travail fera l'objet d'une conception de la machine synchrone à aimant permanent pour un véhicule électrique. Notre étude est partagée en quatre chapitres, selon l'ordre suivant :

Le premier chapitre présente une généralité sur véhicule électrique, on donne une définition et on expliquant le fonctionnement puis les classifications de VE. Ainsi nous concentrons sur les différentes configurations possibles et les moteurs électriques qui ont utilisés dans VE.

Dans le deuxième chapitre présent l'état de l'art d'un moteur synchrone à aimant permanent, Nous commençons par des généralités sur machines synchrones à aimants permanents.

Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent pour un véhicule électrique. Nous aborderons les différentes étapes de dimensionnement.

Enfin, le quatrième chapitre propose une application du script du moteur synchrone à aimant permanent pour valider les résultats obtenus lors du dimensionnement et de l'analyse. Cette simulation permettra également d'étudier les phénomènes électromagnétiques et thermiques qui se produisent dans le moteur.

Introduction générale

Cette étude permettra ainsi d'approfondir les connaissances sur les moteurs électriques pour les véhicules électriques et de proposer une solution de conception optimale pour répondre aux enjeux de la mobilité électrique.

Chapitre I
Généralités sur les
véhicules électriques

I.1 Introduction

Mais qu'en est-il des véhicules de transport personnel ? Le cadre technique paraît bien différent. Dans ce cas de « véhicule sans fil », le problème du stockage de l'électricité constitue l'un des principaux enjeux. L'utilisation de batteries d'accumulateurs, technologie actuellement privilégiée par les constructeurs, induit des limites techniques intrinsèques et semble nécessiter une optimisation permanente.

Les voitures électriques sont longtemps restées absentes du paysage automobile, vraisemblablement jugées trop peu performantes en comparaison à leurs équivalents thermiques. Les dispositifs de stockage d'électricité, électrochimiques notamment, ont souvent été pointés du doigt, symboles d'une autonomie limitée et condamnée à le rester. Cependant, depuis quelques années, une filière électrique du secteur automobile semble émerger : il n'est plus rare de croiser un modèle 100 % électrique, que l'on peut notamment distinguer par le silence de son moteur.

Les bornes de recharges se multiplient. Des services de voitures électriques en libre-service, tel Autolib' à Paris, sont une réalité et sensibilisent le public à un tel usage. Ce que l'on pouvait considérer, il y a encore 10 ans, comme une attraction curieuse pourrait constituer le proche avenir de l'automobile [3].

I.2 Historique

La voiture électrique est apparue très tôt dans l'histoire de l'automobile, les premières datent des années 1830 (la date exacte est inconnue). Jusqu'à la fin du 19ème siècle, la plupart des automobiles étaient électriques. Le véhicule électrique à batteries, souvent perçu comme ayant une motorisation « nouvelle », est en réalité à peu près aussi ancien que le véhicule à essence. C'est en 1880 que Charles Jean taud, Camille Faure, Gustave Trouvé et Nicolas Raffard réalisent les premiers véhicules électriques. Cette prouesse technologique est rendue possible grâce à l'invention, vingt et un ans plus tôt, de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté et Camille Faure. Mais c'est en 1899 que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux du monde entier. En effet, la « Jamais Contente », pilotée par C. Jenatzy, est la première voiture à dépasser 100km/h. Chemin faisant, la voiture électrique est commercialisée un peu partout. En 1911, on trouve à Paris ainsi qu'à Londres des taxis électriques. Avant la Première Guerre mondiale, un tiers des véhicules américains roulent à l'électricité. En plus d'être écologiques, elles étaient plus performantes et plus silencieuses que leurs rivales. Ce n'est qu'au début du 20e__ siècle que la voiture à essence connaît un succès plus important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence. Les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. Au début des années 60 les états se sont intéressés au développement de ce type de véhicules et il en résulte l'apparition au début des années 90 des

véhicules tel que (La Peugeot 106 construit par le groupe PSA et la EV1 faite par l'américain général Motors). Seules durant les trente dernières années ont apporté des progrès réels, ils concernent principalement le stockage de l'énergie, avec l'apparition sur le commerce des premières batteries au Lithium-Ion. Plusieurs programmes de recherche sur les véhicules électriques ont eu lieu récemment pour déclarer l'arrivée prochaine de cette technologie, en raison de la hausse des prix du pétrole et de l'émergence de certains problèmes environnementaux comme la pollution de l'air dans les zones urbaines, qui résultait de l'utilisation incontrôlée du moteur à essence conventionnel. Cependant, le véhicule électrique semble être une solution prometteuse pour réduire le trafic dans les grandes villes, car ce type de voiture n'induit pas de pollution atmosphérique et sonore [4].

I.3 Définition

Un Véhicule Electrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [5].

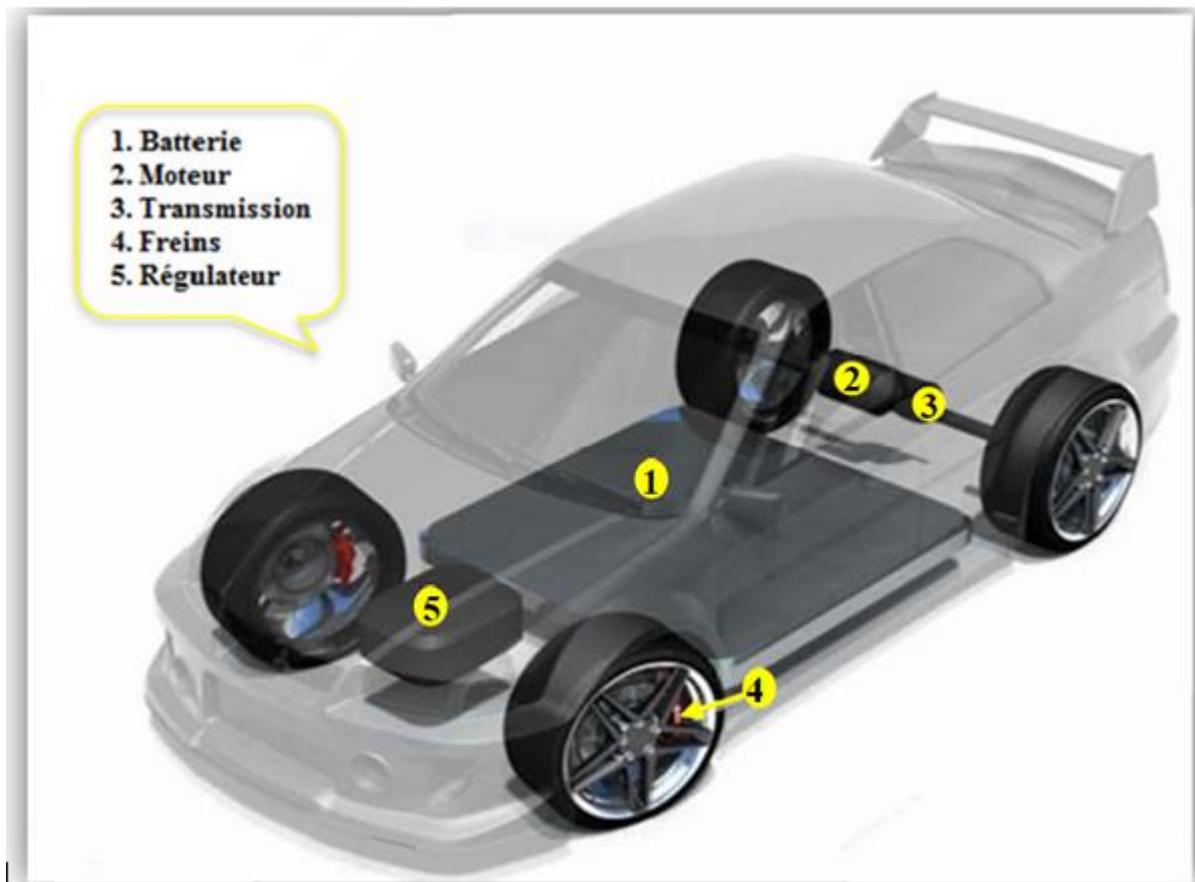


Figure 1. 1: Système de propulsion d'un VE.

I.4 Fonctionnement d'un véhicule électrique

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie.

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC). Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [6].

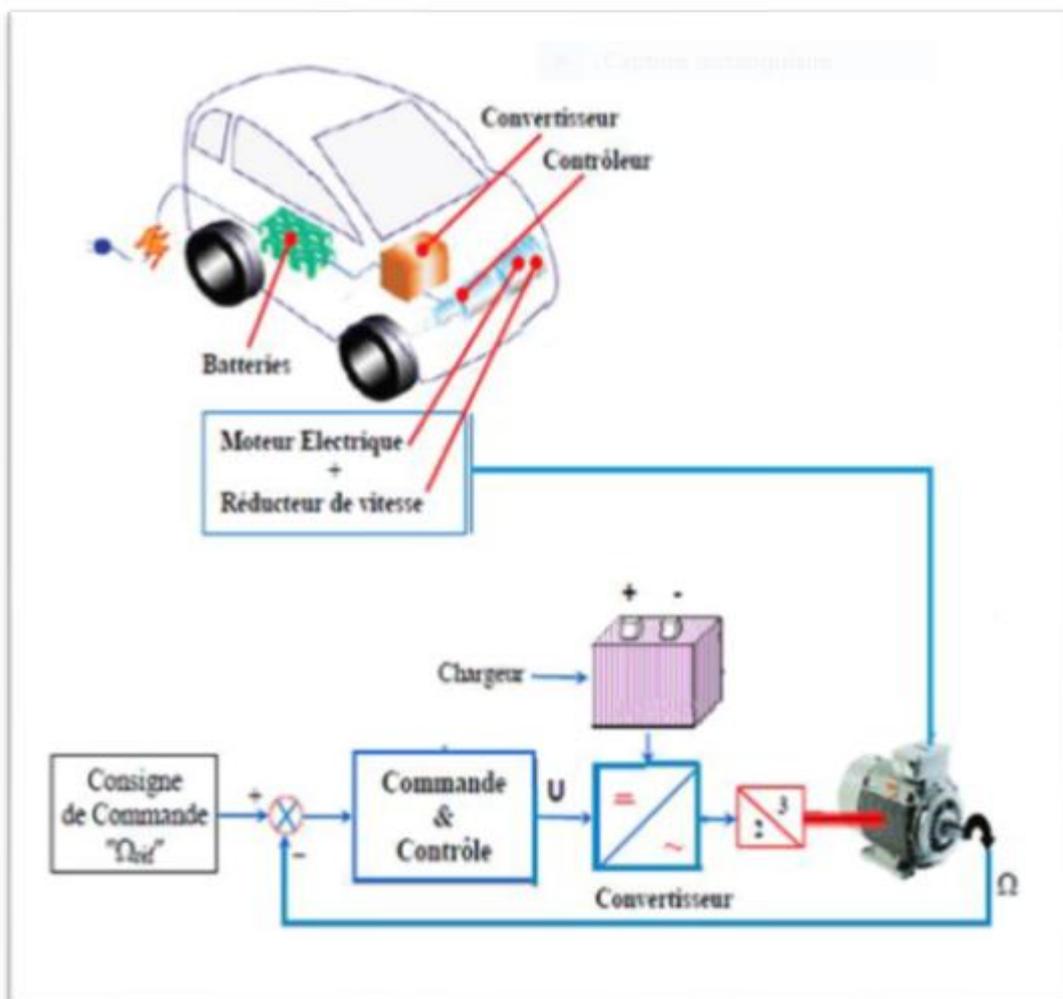


Figure 1. 2: Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique.

I.5 Classification des véhicules électriques

I.5.1. Véhicules tout électrique

Ce sont des véhicules qui n'ont comme sources d'énergies qu'un accumulateur rechargeable par la voie d'une source extérieure. Actuellement les VTE proposés sont exclusivement urbains, leur autonomie est de 70 à 120 Km avec des batteries en Plomb-Acide et cadmium nickel et de 150 à 200 km avec des batteries Nickel-Métal-Hydrure et Lithium. Afin d'accroître leurs autonomies, ces véhicules sont dotés de systèmes de conversions réversibles pour récupérer l'énergie de freinage [7].

I.5.2 Véhicules électriques à batteries par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement [8].

I.5.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

Le véhicule à pile à combustible (V-P à C) ou véhicule à hydrogène possède un réservoir d'hydrogène, une pile à combustible (P à C), un entraînement électrique et une transmission mécanique (figure 4). On peut considérer que c'est un VE où la batterie est remplacée par un réservoir d'hydrogène et une P à C. Cette dernière transforme l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air, en énergie électrique, en chaleur et en eau. Les avantages du V-P à C sont une autonomie et un temps de recharge comparables à ceux d'un véhicule thermique, mais avec un rendement plus élevé (rendement de 50 % pour une P à C).

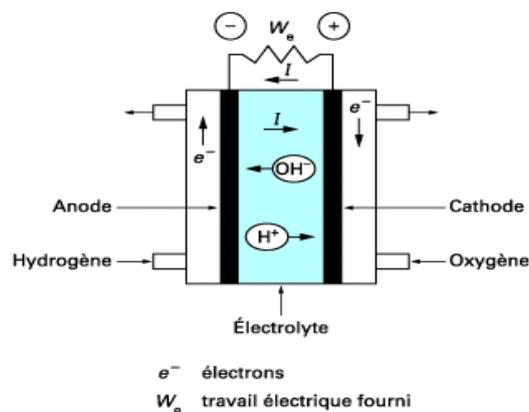


Figure 1. 3: Schéma de principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène [9].

Les inconvénients majeurs sont la durée de vie des P à C, le coût élevé de l'ensemble, la disponibilité de station de recharge en hydrogène, et aussi la production actuelle de l'hydrogène (plus de 90 % à partir de gaz naturel, ce qui est relativement polluant). De nombreux travaux visent à réduire ces limitations. Il est aussi à noter que la P à C n'est pas réversible et donc que l'on ne peut pas récupérer de l'énergie au freinage. De ce fait, ces véhicules sont quasiment toujours équipés d'un stockage secondaire, ce qui les classe, au sens strict du terme dans la catégorie « véhicules hybrides ». Ils sont cependant souvent considérés comme des véhicules « piles à combustible » [10].

I.5.4 Véhicules hybrides

Le véhicule hybride possède au moins deux sources embarquées d'énergie, plusieurs convertisseurs d'énergie, un sous-système de couplage et une transmission mécanique (figure 5). Il existe différentes possibilités de couplage qui seront abordées dans la sous-section suivante. L'objectif est de combiner les technologies « mono-sources » pour bénéficier des avantages de chacune et de réduire leurs inconvénients. Comme les technologies électriques ont de très bons rendements, les véhicules électriques hybrides (VEH) dominent le marché actuel, même s'il existe d'autres possibilités.

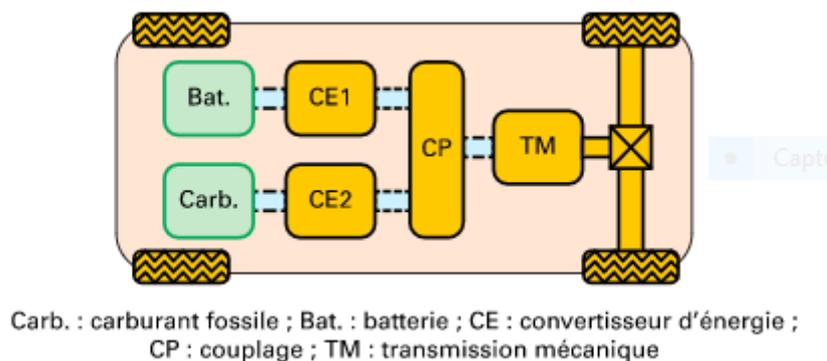


Figure 1. 4: Véhicule électrique hybride.

I.6 Système de stockage d'énergie par batterie

les véhicules électriques étaient principalement convertis à partir du véhicule à moteur à combustion interne sortant en remplaçant le moteur à combustion interne et le réservoir de carburant par un moteur électrique et un bloc-batterie tout en conservant tous les autres composants, comme le montre la figure 1.5. La configuration principale d'un groupe motopropulseur de véhicule électrique. Le groupe motopropulseur en L'unité de travail se compose de trois sous-systèmes principaux: propulsion du moteur électrique, énergie l'approvisionnement et les auxiliaires. Le sous-système de propulsion électrique comprend le véhicule contrôleur, convertisseur électronique de puissance, moteur électrique, transmission mécanique, et roues motrices. Le sous-système source d'énergie comprend la source

d'énergie, l'énergie unité de gestion et unité de ravitaillement en énergie. Le sous-système auxiliaire comprend les unité de direction, unité de climatisation et unité d'alimentation auxiliaire [11].

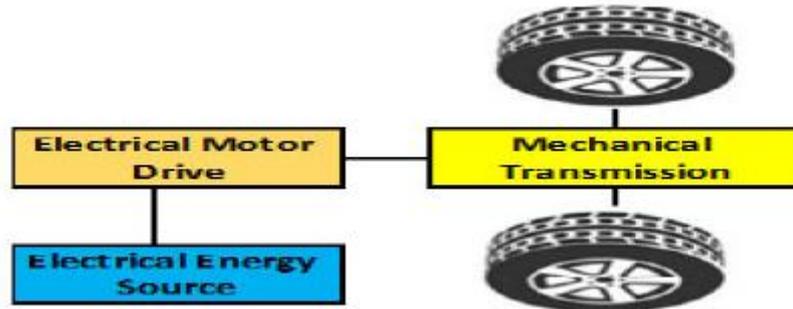


Figure 1. 5: Structure de base du groupe motopulseur du véhicule électrique.

Un concept illustration de la configuration générale des véhicules électriques est présentée à la figure 2. Dans cette figure, le bleu les flèches font référence aux liaisons de commande dans le système EV, les flèches rouges indiquent les liaisons électriques, et les liens noirs indiquent les interconnexions mécaniques.

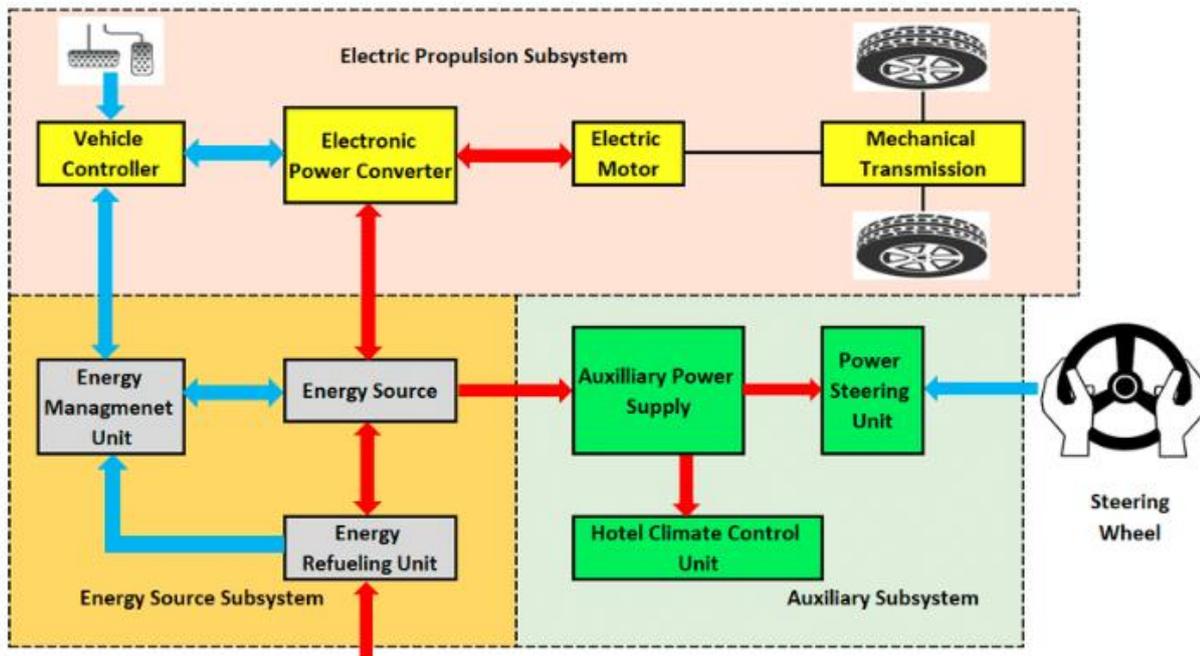


Figure 1. 6: illustration conceptuelle de la configuration générale du VE.

I.7 Configuration des véhicules électriques

Il existe une variété de configurations EV possibles en raison des variations des caractéristiques de propulsion électrique et des sources d'énergie [12], comme le montre la figure 1.7.

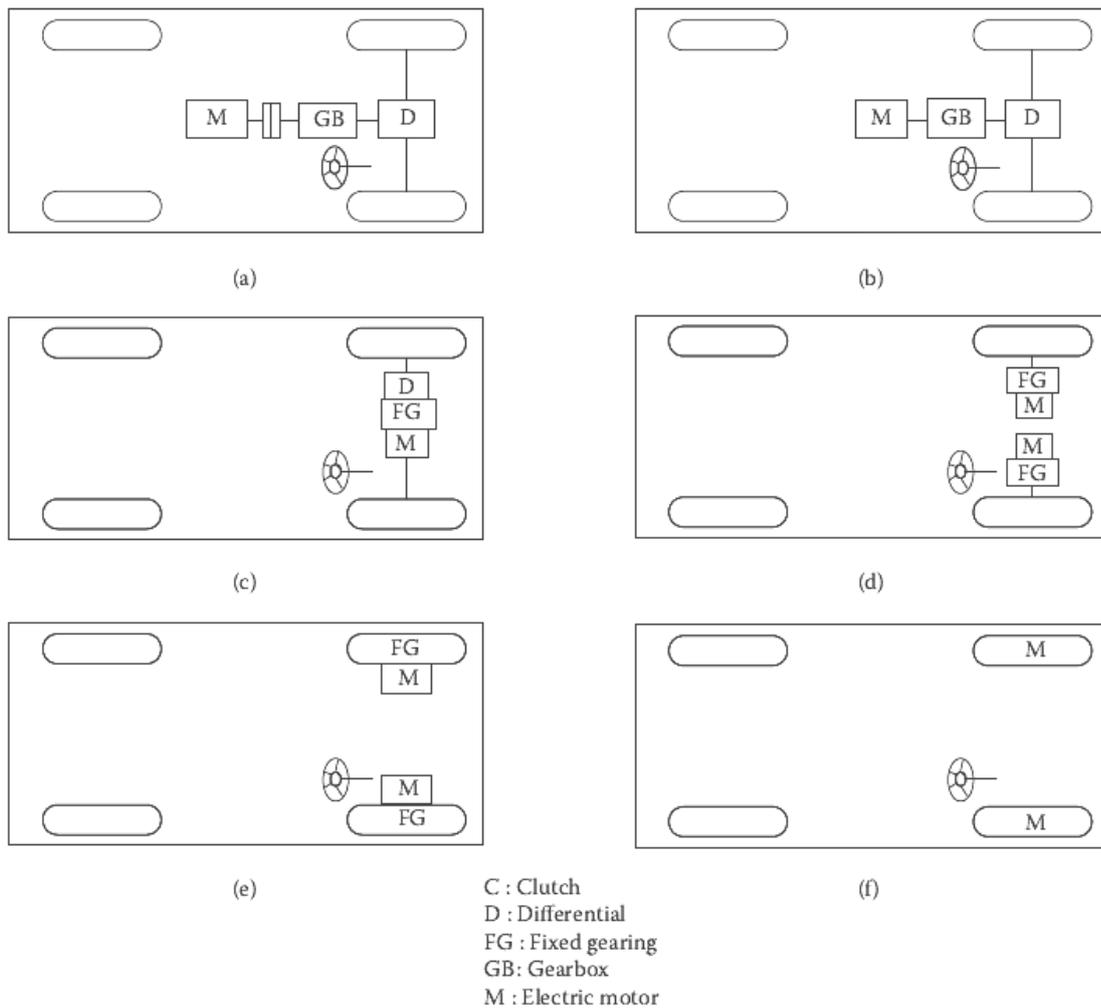


Figure 1. 7: configurations VE possibles.

- La figure 1.7(a) montre la configuration de la première alternative, dans laquelle une propulsion électrique remplace le moteur à combustion interne du groupe motopropulseur de véhicule conventionnel. Il se compose d'un moteur électrique, d'un embrayage, d'une boîte de vitesses et d'un différentiel. l'embrayage et la boîte de vitesses peuvent être remplacés par une transmission automatique. l'embrayage est utilisé pour connecter ou déconnecter la puissance du moteur électrique des roues motrices. la boîte de vitesses fournit un ensemble de rapports de démultiplication pour modifier le profil vitesse-puissance (couple) en fonction de la charge requise. le différentiel est un dispositif mécanique (généralement) un ensemble d'engrenages planétaires), qui permet aux roues des deux côtés d'être entraînées à des vitesses différentes lorsque le véhicule roule sur une trajectoire courbe.
- La figure 1.7(b) représente un moteur électrique à puissance constante sur une longue plage de vitesse, une transmission fixe peut remplacer la boîte de vitesses multi-vitesses et réduire le recours à un embrayage. cette configuration réduit non seulement la taille et le poids de la

transmission mécanique, elle simplifie également le contrôle de la transmission car le changement de vitesse n'est pas nécessaire.

- La figure 1.7(c) similaire au groupe motopropulseur en (b), le moteur électrique, l'engrenage fixe et le différentiel peuvent en outre être intégrés dans un seul ensemble tandis que les deux essieux pointent vers les deux roues motrices. L'ensemble du groupe motopropulseur est encore simplifié et compacté.
- Dans la figure 1.7(d) le différentiel mécanique est remplacé par l'utilisation de deux moteurs de traction. Chacun d'eux entraîne une roue latérale et fonctionne à une vitesse différente lorsque le véhicule roule sur une trajectoire courbe.
- La figure 1.7(e) montre une simplification de la chaîne cinématique, le moteur de traction peut être placé à l'intérieur d'une roue. Cette disposition est ce que l'on appelle la traction intégrale. Un jeu d'engrenages planétaires minces peut être utilisé pour réduire la vitesse du moteur et améliorer le couple du moteur. Le train planétaire mince offre l'avantage d'un rapport de réduction à grande vitesse ainsi que d'une disposition en ligne de l'arbre d'entrée et de sortie.
- En abandonnant complètement tout engrenage mécanique entre le moteur électrique et la roue motrice, le rotor extérieur d'un moteur électrique à basse vitesse dans la roue motrice peut être directement connecté à la roue motrice. Le contrôle de la vitesse du moteur électrique est équivalent au contrôle de la vitesse des roues et donc de la vitesse du véhicule. Cependant, cette disposition nécessite que le moteur électrique ait un couple plus élevé, pour démarrer et accélérer le véhicule comme le montre la figure 1.7(f).

I.8 Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la (figure 1.8). Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique. On s'intéresse ici qu'à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule [13].

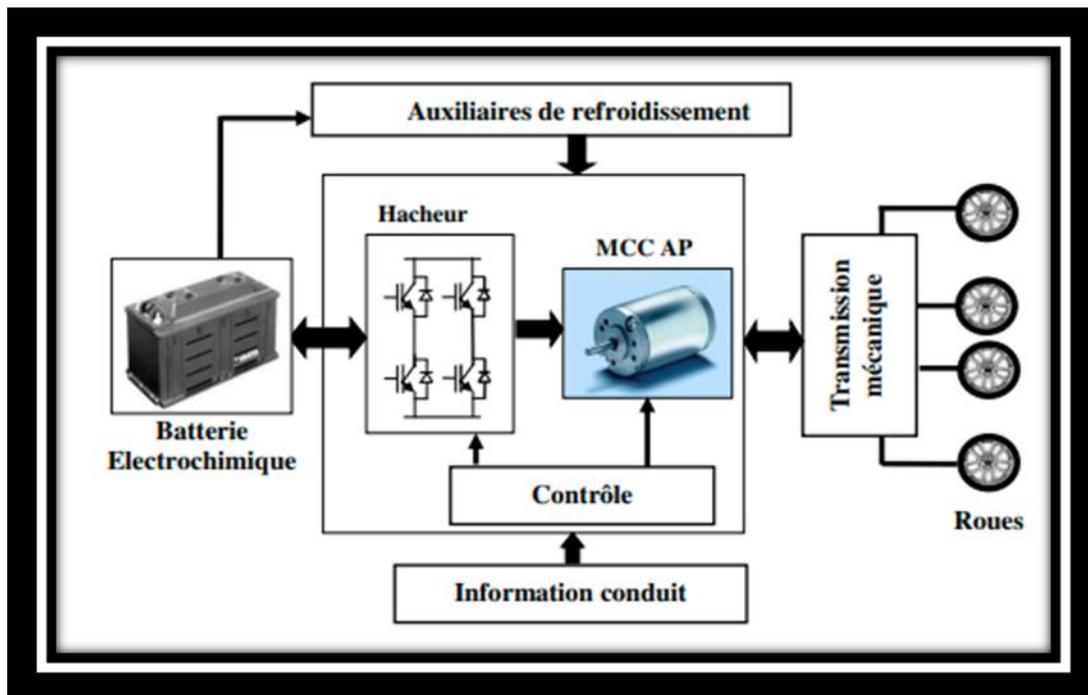


Figure 1. 8: Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.

I.8.1 Le Moteur Electrique d'Entrainement

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [14] :

Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé),

- ✓ Obtenir une vitesse maximale,
- ✓ Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses). Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la figure 1.9 exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse.

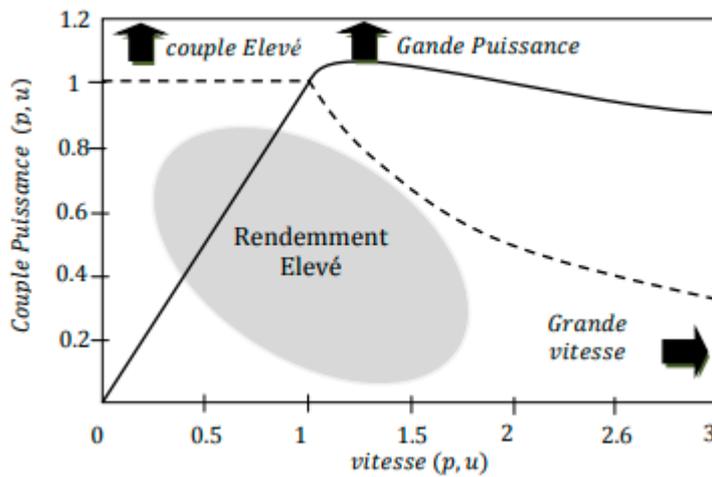


Figure 1. 9: Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE.

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entrainements en tant qu'élément indispensable dans la chaine de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types comme montre la figure ci-dessous :

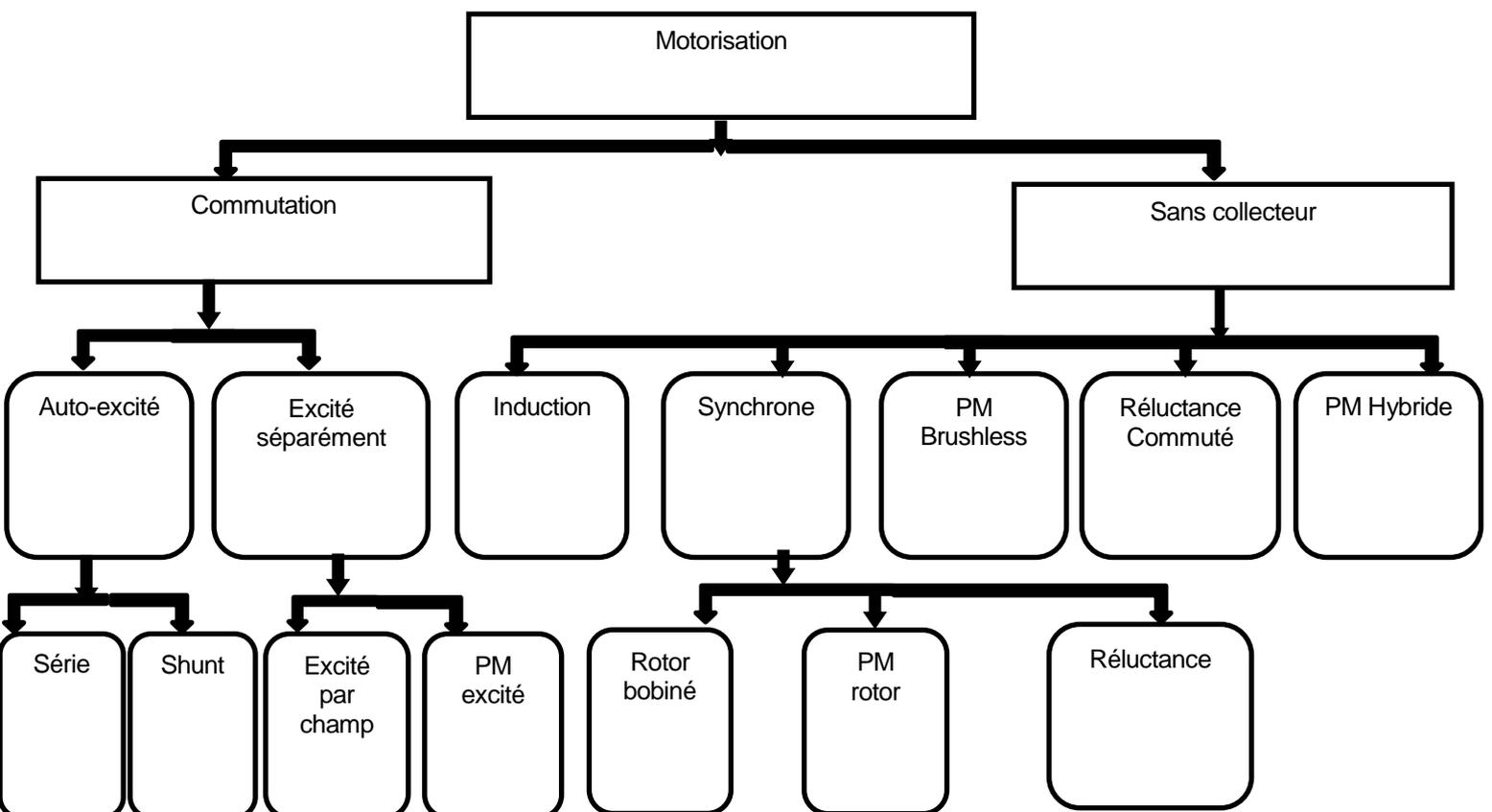


Figure 1. 10: Classification des entrainements par moteur électrique pour VE.

I.9 Avantages et inconvénient des VE

I.9.1 Les avantage

Pas de moteur thermique, cela veut dire pas d'échappement donc pas de rejets de gaz à effet de serre, gaz polluants ou particules venant de la motorisation lorsque l'on roule.

- En France, l'origine en grande partie nucléaire de l'électricité du réseau garantit de faibles rejets de CO₂ durant le cycle d'utilisation de la voiture.
- Pas de nuisances sonores [15].
- Pas de vidange, de filtre à air, de filtre à carburant, d'huile de boîte, etc. Un moteur électrique ne demande presque aucune attention et même les disques et plaquettes de freins durent plus longtemps grâce au freinage des moteurs électriques.
- Le coût d'une charge de batterie en électricité est bien moindre que celui d'un plein de carburant.

I.9.2 Les inconvénients

- Une voiture électrique coûte actuellement cher à développer, à produire et donc à acheter.
- Même si la capacité d'autonomie s'améliore, les distances parcourues avec une voiture électrique sont inférieures à la voiture thermique.
- Programmer un long trajet nécessite de prévoir des détours pour recharger. A cela s'ajoute le temps de charge.
- Plus facile de faire la recharge quand on est propriétaire de maisons individuelles (plus compliqué en immeubles).
- Il faut inciter le recyclage des batteries lithium-ion.
- Durée de vie limitée de la batterie.

I.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du véhicule électrique et tous ses composants. Nous avons ainsi présenté les différentes parties composant la chaîne de traction qui contient les différents moteurs utilisés dans le véhicule électrique.

Le moteur synchrone à aimant permanent a des bonnes performances et des caractéristiques qui nous ont fait le choisir dans notre étude sur le véhicule électrique.

Chapitre II
L'état de l'art d'un
MSAP

II.1 Introduction

Au fil des années, les machines électriques équipant les automobiles ont évolué avec les avancées technologiques de l'industrie. Les premières grandes séries de véhicules ont été conçues autour de MCC, avantageuses pour leur simplicité de pilotage mais ayant un rendement assez faible et un entretien périodique. Plus tard, les MSRB puis les MAS ont été préférées aux MCC en raison du développement dans convertisseurs statiques. Aujourd'hui, les automobiles de grandes séries sont équipées pour beaucoup de MSAP en raison de leur rendement élevé. La Figure 1 retrace l'évolution des machines électriques pour les grandes séries. Au fil des années, les machines n'ont cessé d'évoluer dans le but d'obtenir des performances en rendement, densité de puissance et vitesse maximale plus élevée [16].

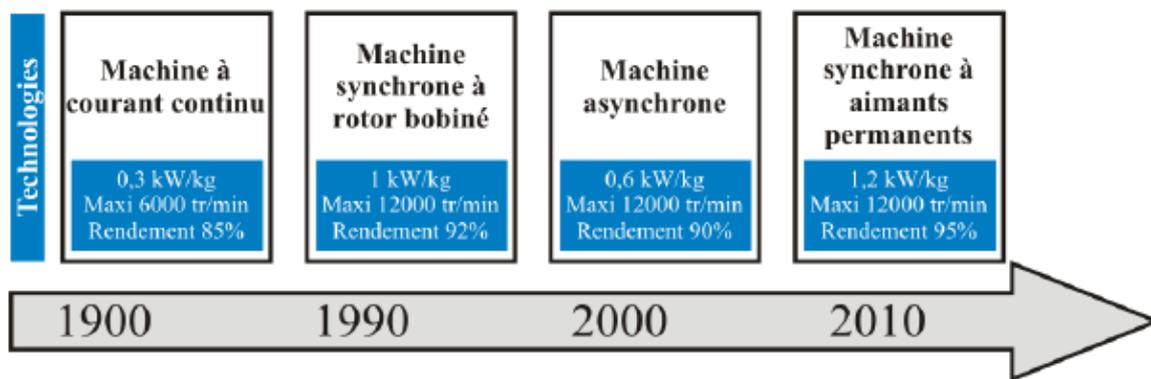


Figure 2. 1: Chronologie et caractéristiques des machines électriques pour l'application automobile.

II.2 Présentation machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

II.2.1 Définition de La machine synchrone

La machine synchrone est un système électrique permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique « génératrice » et inversement « moteur ».

Ce type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques « on parle d'alternateur ». Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone [17].

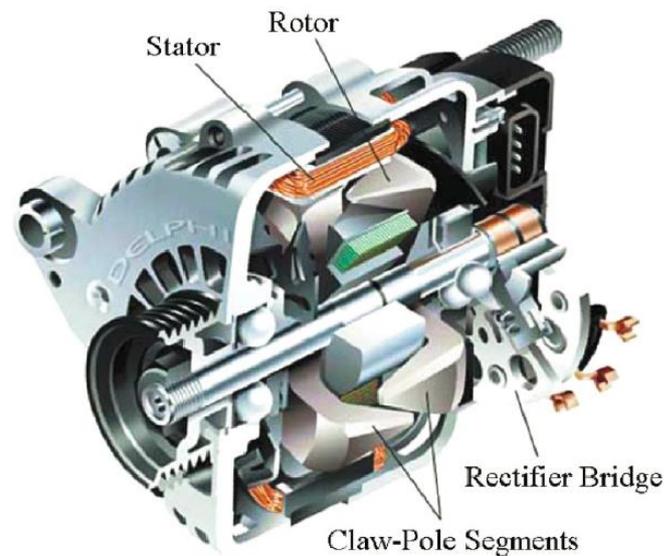


Figure 2. 2:Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [18].

II.2.2 Constitution de la Machine Synchrone

La MS possède deux parties principales : L'inducteur porté le plus souvent par le rotor l'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs

- **Induit (Stator) :** Le stator est formé d'un circuit magnétique feuilleté portant un enroulement triphasé réparti dans des encoches. Ce bobinage constitue l'induit de la machine car il est le siège de forces électromotrices induites par le champ tournant [19].
- **Inducteur (Rotor) :** Le rotor est la partie tournante. Parfois c'est un aimant permanent pour les petites machines, mais en général c'est un électroaimant sous forme d'un cylindre ferromagnétique massif recevant un bobinage qui, alimenté en courant continu (excitation), génère p paires de pôles sud et nord alternés. Il existe des rotors à pôles saillants avec un nombre de paires de pôles p élevé, ou à pôles lisses [20].

II.2.3. Configurations rotoriques de la machine à aimants permanents

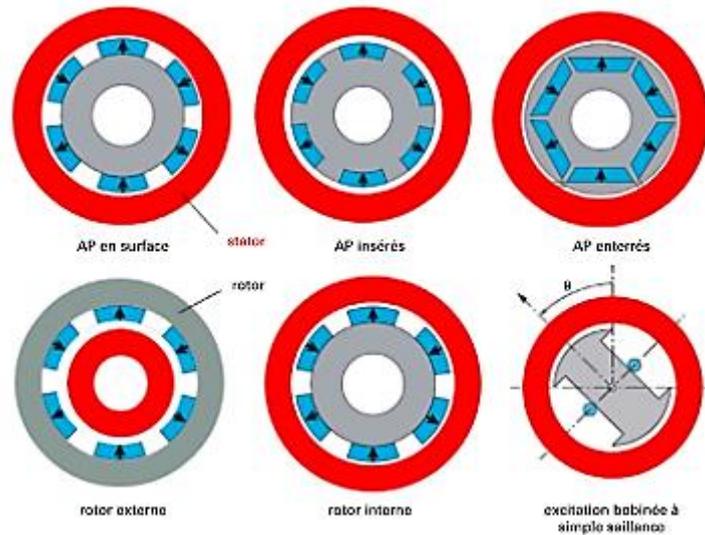


Figure 2. 3: Différentes topologies de machines synchrones considérées [21].

II.2.3.1 Aimants en surface

Leur principale caractéristique est d'une part le manque de saillance ($\gg = 1$) et d'autre part une très faible inductance. Leurs principales applications sont liées à la robotique et aux variateurs à très haute dynamique. De nombreux auteurs l'utilisent comme référence par rapport aux machines à aimants internes [22]. Les AP sont à base de terres rares : $N_d F_e B$ ou $S_m C_o$ (dans la plupart des cas $N_d F_e B$). Avec leur énergie maximale élevée, les AP peuvent fournir des puissances importantes à volume réduit. Mais une attention particulière doit être portée quant à leur limite de désaimantation irréversible qui est liée à la température d'utilisation sachant que, lors de l'alimentation de l'induit et lors des appels brusques de couple, le point de fonctionnement peut descendre au-dessous de la limite de désaimantation [23]. Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe- d et l'axe-q sont, pratiquement les mêmes.



Figure 2. 4: Moteur industriel à aimants en surface [24].

II.2.3.2 Aimants inséré

Cette structure elle est appelée **inset** (terminologie anglaise pour la différencier des autres structures). L'utilisation des AP à base de terres rares offre un bon rapport puissance/masse. Dans ce cas, l'entrefer effectif peut être diminué est donc le contrôle du flux dans l'entrefer est plus facile à réaliser lors de l'alimentation de l'induit, en sachant que cette structure offre aussi un rapport de saillance différent de l'unité. Il n'y a plus besoin du tube de consolidation, mais le risque de désaimantation irréversible reste un problème qui ne peut pas être négligé.

II.2.3.3 Aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe .les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor.la robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesse pour des puissances importantes. L'avantage de cette configuration réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permette aussi d'assurer des niveaux d inductions élevées dans l'entrefer [25].De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation.

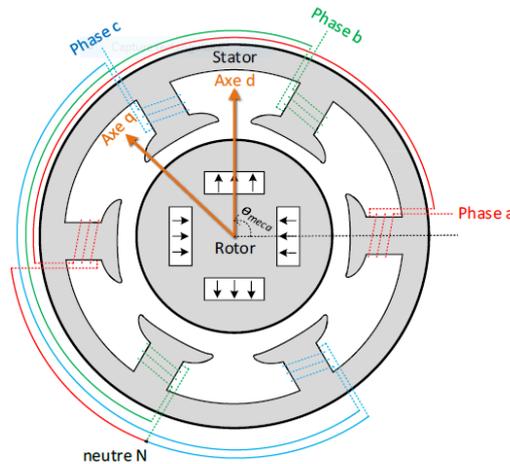


Figure 2. 5: Figure d'une MSAP à aimants enterrés (pôles saillants) et à 2 paires de pôles [26].

II.2.3.4 Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence. Les pôles magnétiques se forment alors à niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer.

II.3 Principe de fonctionnement de la MSAP

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et rotorique ; d'où le nom de machine synchrone. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On note :

$$\omega_r = \frac{\omega}{p}$$

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

- À Le rotor est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable [27].

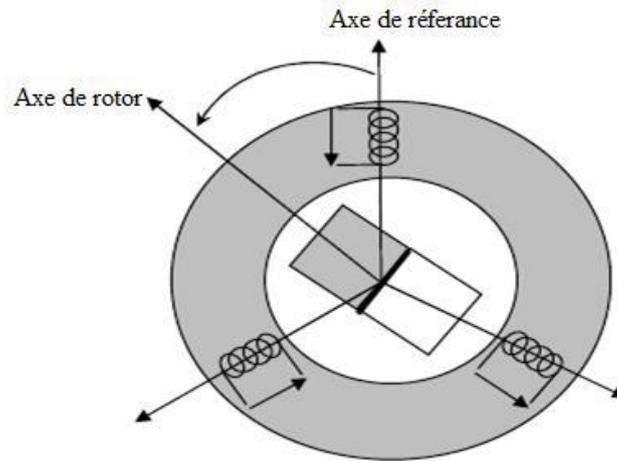


Figure 2. 6: Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [28].

II.4 Choix des aimants

Les aimants des machines synchrones sont fabriqués à partir de poudre de ferrite, de poudre de fer-cobalt ou de terres rares. Un bon aimant doit avoir une induction rémanente et un champ coercitif le plus grand possible [29].

C'est au début des années 30 que sont apparus les premiers aimants permanents appelés Alnico (alliage à base d'Aluminium-Nickel-Cobalt). Ces derniers demeurent le matériau magnétique le plus utilisé durant plusieurs décennies. Depuis les années 50, ils ont été peu à peu remplacés par les aimants à base d'héxaferrite ($AFe_{12}O_{19}$ où $A=Ba, Sr, Pb, \dots$).

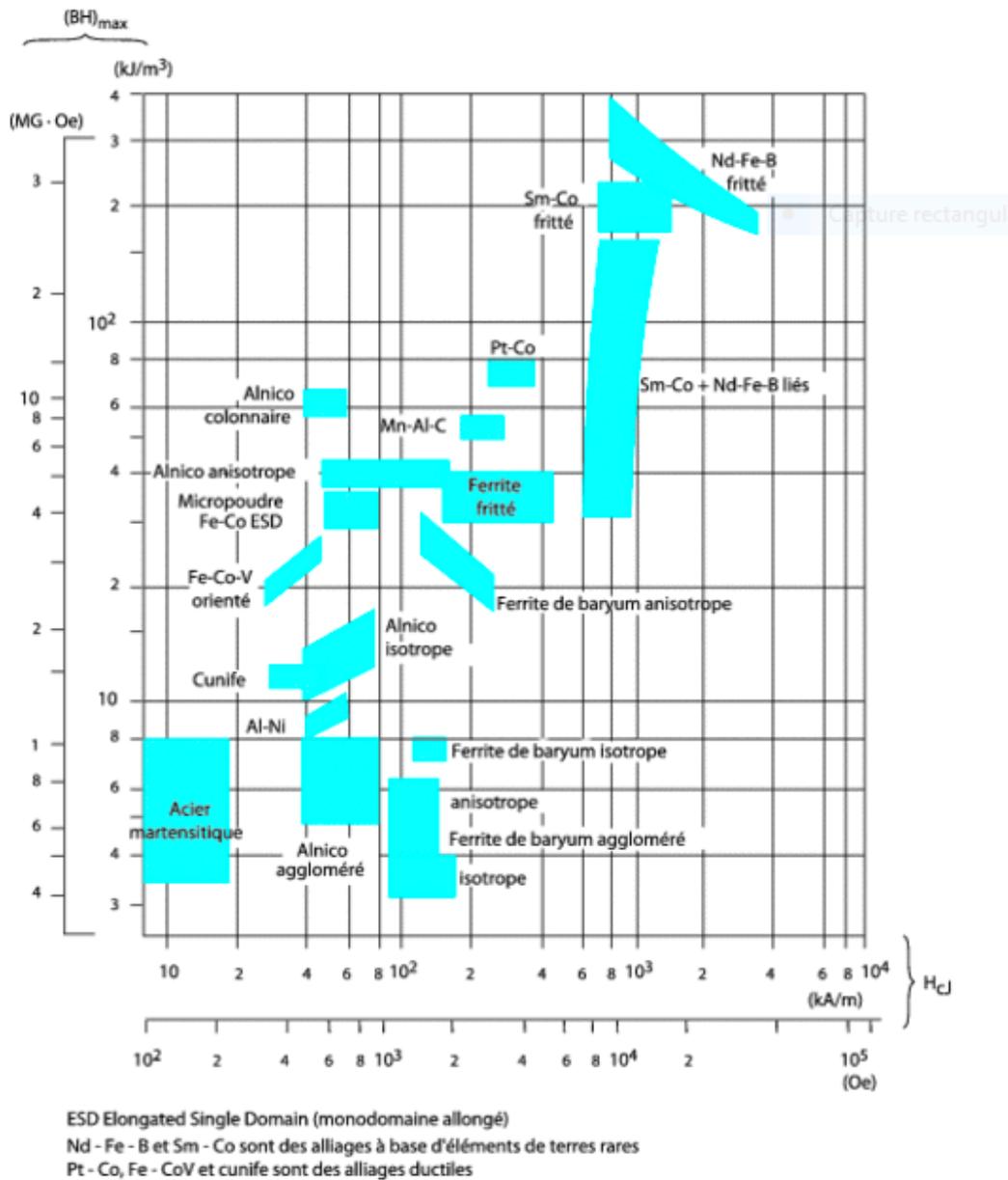


Figure 2. 7: Classement des matériaux pour aimants permanents [30].

II.4.a Caractéristique de désaimantation

Les aimants sont des matériaux magnétiques durs principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (figure I-2).

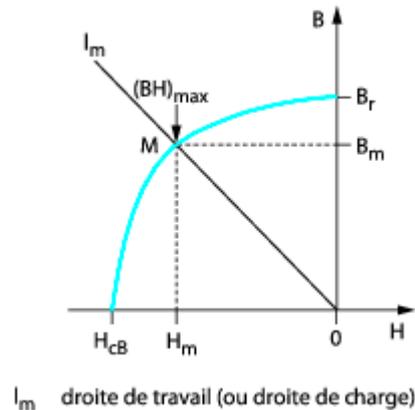


Figure 2. 8: Courbe de désaimantation d'un matériau pour aimant permanent.

Cette courbe est caractérisée par [31] :

- _ L'induction rémanente B_r , correspondant à l'induction résiduelle en circuit fermé. Il peut être représenté à la force d'attraction ;
- _ Le champ coercitif de l'induction H_{cb} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction. Une valeur élevée indique un aimant plus stable et plus résistant ;
- _ Le produit d'énergie volumique $(BH)_{max}$. Plus la valeur est élevée, plus l'aimant est puissant ;
- _ Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{max}$.

II.4.b Causes de la désaimantation

A des températures de fonctionnement qu'on appelle critiques, les grandeurs essentielles de l'aimant, (B_r, H_{cb}) subissent des variations dont les effets se matérialisent par des pertes de flux dans l'entrefer de la machine. On distingue généralement deux sortes de diminutions [32]:

- **Diminutions réversibles d'induction** : elles sont annulées par le retour de l'aimant à la température initiale. Elles s'expriment par le coefficient de la température de la rémanence.
- **Diminutions irréversibles d'induction** : elles sont dues à la dépendance en température du champ coercitif. En effet, à des températures élevées le champ coercitif diminue et l'aimantation de certaines zones ne peut être ramenée à l'état initial. Ces pertes ne sont pas annulées après retour à la température initiale.

II.4.c Les différents types d'aimants permanents

Il existe aujourd'hui principalement quatre familles de matériaux conduisant à l'essentiel des applications sur le marché des aimants permanents.

Ces quatre familles sont dans l'ordre d'apparition : les Alnico, les ferrites durs, les samarium-cobalt et les néodyme-fer-bore.

1. **Les Alnico** : alliages à base aluminium, nickel, cobalt et fer sont apparus dans les années 1930. Ils sont aujourd'hui de moins en moins utilisés en raison de leurs propriétés magnétiques modestes et du coût élevé du cobalt. Grâce à une excellente stabilité thermique, ils conservent quelques rares applications, dans le domaine des hautes températures et sur le marché des appareils de mesures.



Figure 2. 9: Aimants Alnico [33].

2. **Les ferrites-durs** (hexa-ferrites de baryum ou de strontium) ont été découverts dans les années 1950. Ce sont des matériaux céramiques très stables, très faible coût, aux propriétés magnétiques modestes. Bien que relativement anciens, ils font toujours l'objet de nombreuses recherches et demeurent les aimants les plus utilisés aujourd'hui.



Figure 2. 10: aimant ferrites.

3. Les alliages métaux terres rares

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

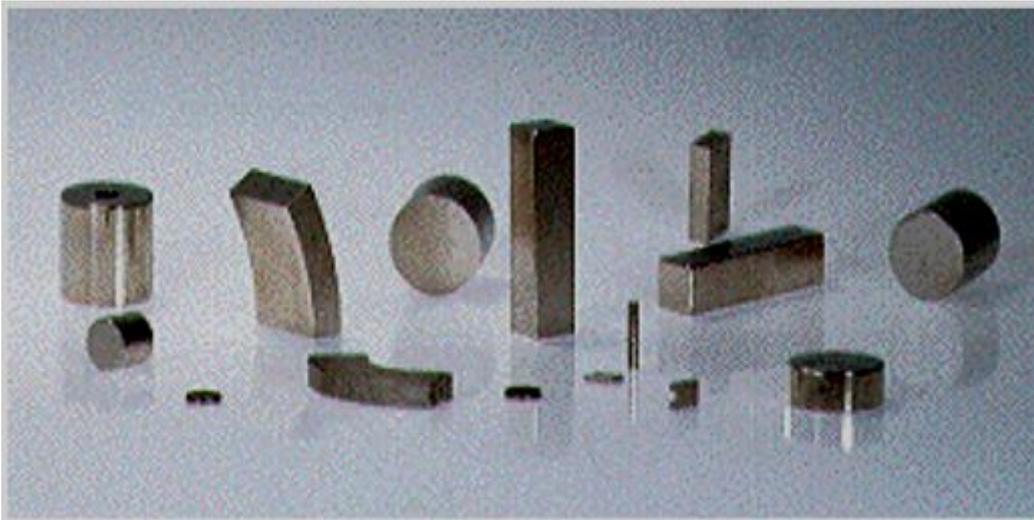


Figure 2. 11: aimant terre rare.

- **Les samarium-cobalt** ont été découverts dans les années 1960. Ils tirent parti des propriétés des phases SmCo_5 et $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Ces aimants présentent des performances magnétiques très supérieures aux deux familles précédentes, mais leur coût constitue un inconvénient majeur. Le cobalt est un matériau cher, stratégique et dont les réserves sont concentrées dans un nombre réduit de pays. Le samarium est l'une des terres rares les plus chères. Relativement stables en température et résistants à la corrosion, ces aimants conservent d'importantes applications dans les domaines où les conditions d'utilisations difficiles (notamment les hautes températures) sont prépondérantes par rapport au coût.
- **Les néodyme-fer-bore** sont apparus dans les années 1980. Ils présentent les meilleures performances magnétiques du marché. Ils sont moins chers que les aimants de la famille samarium-cobalt qu'ils ont supplantés dans de très nombreuses applications. Très sensibles à la corrosion, ils sont protégés par des revêtements de surface et ne peuvent être utilisés à haute température [34].

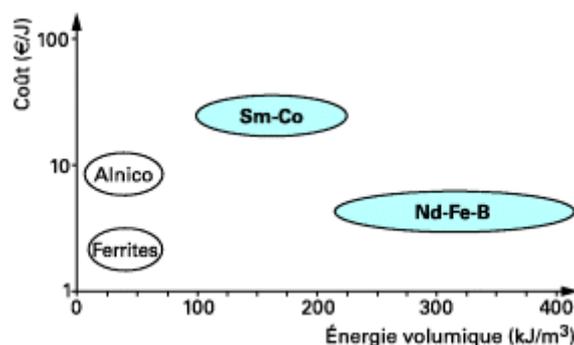


Figure 2. 12: Coûts des différentes familles d'aimants en fonction de leurs performances magnétiques.

II.5 Domaines d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction [35].

- Il fonctionne comme compensateur synchrone.
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.

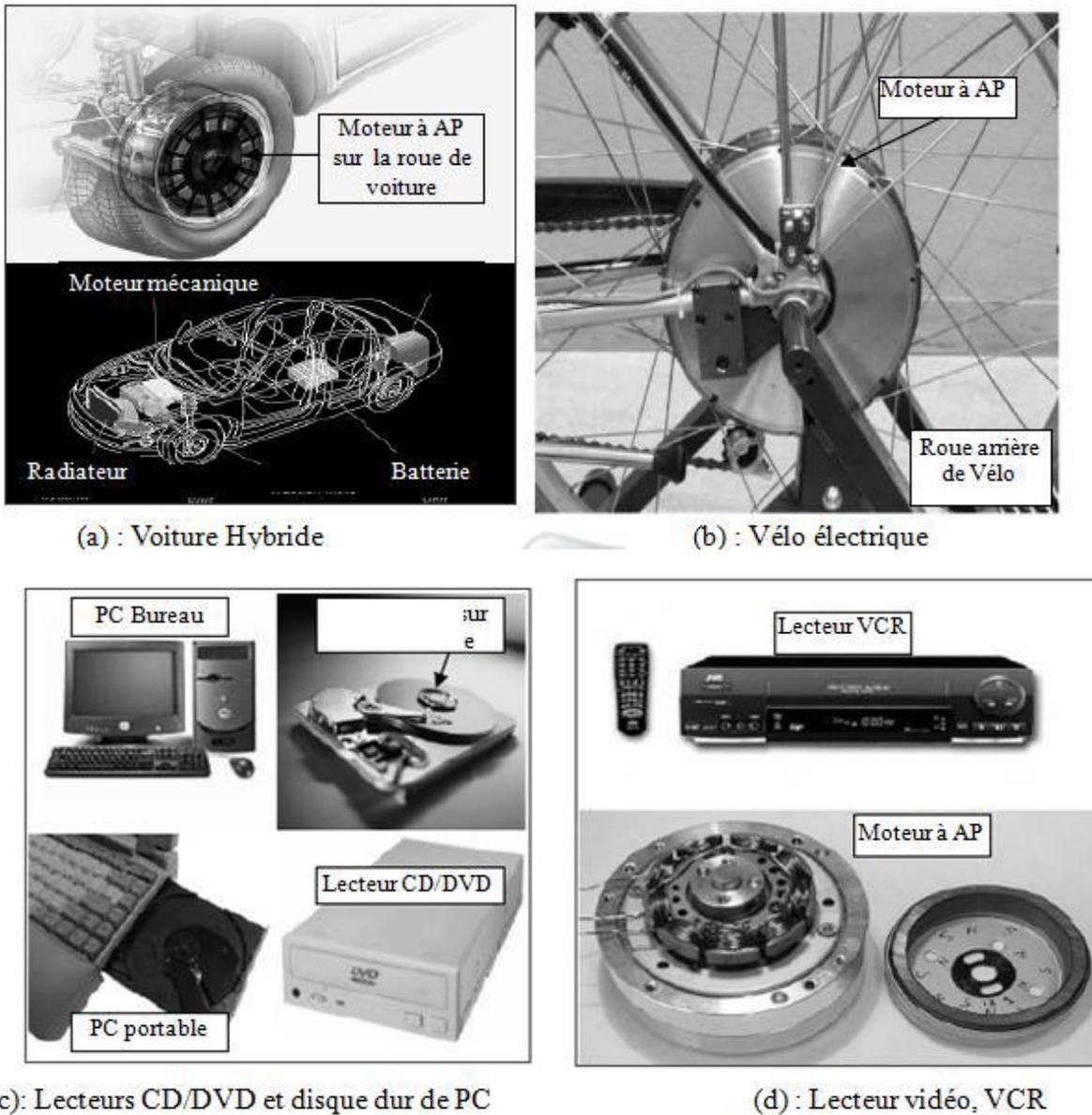


Figure 2. 13: Principales applications des machines synchrones à aimants permanents [36].

II.6 Avantages des MSAP par rapport aux autres types de machines

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.
- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure Compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité)
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses [37].

II.7. Inconvénients de la MSAP

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation [38].

II.8 conclusion

En conclusion, le moteur synchrone à aimants permanents est une technologie de choix pour les véhicules électriques en raison de son rendement élevé, sa puissance et son couple constants, ainsi que sa légèreté. Ce type de moteur est également plus efficace que les moteurs à induction ou les moteurs à courant continu en termes de pertes de puissance et de maintenance. Cependant, les coûts initiaux de conception et de fabrication peuvent être plus élevés en raison des aimants permanents utilisés. Malgré cela, le potentiel pour une plus grande efficacité énergétique, une réduction des émissions de gaz à effet de serre et une autonomie accrue pour les véhicules électriques en fait une option prometteuse pour l'avenir de la mobilité électrique. Dans le chapitre suivant on va faire un dimensionnement de ce moteur pour véhicule électrique.

Chapitre III
Méthodologie de
dimensionnement

III.1 Introduction

Le moteur synchrone à aimant permanent est largement reconnu comme un choix privilégié pour la propulsion des véhicules électriques. Le développement de ces moteurs est en constante évolution pour répondre aux demandes croissantes de performance, d'efficacité et de fiabilité. Le dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent pour un véhicule électrique est un processus complexe qui implique une compréhension approfondie des caractéristiques du moteur, des exigences de performance du véhicule et des contraintes du système d'alimentation électrique. Ce chapitre va explorer les étapes clés du dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent pour une application de véhicule électrique, en mettant l'accent sur les défis et les considérations importantes qui doivent être pris en compte tout au long du processus.

III.2 Principes des bases des conceptions

Un principe de base de conception d'un moteur synchrone à aimants permanents est l'utilisation d'aimants permanents pour créer un champ magnétique stable dans le stator du moteur. Les aimants permanents génèrent un flux magnétique constant, ce qui permet d'éliminer la nécessité d'un enroulement d'excitation dans le stator [39].

III.3 Calcul électromagnétique

Pour déterminer les dimensions de la machine synchrone il faut prendre compte des caractéristiques techniques et des contraintes électromagnétiques.

III.4 Choix des quelques facteurs des dimensionnements

La première étape du choix des charges électriques et magnétiques consiste en des charges générales ou Optimisation de la conception des machines électriques. Pour les MSPS, ces chargements sont décrits comme suit [40] :

III.4.1 La charge électrique spécifique : J_1 (A/m) représente la valeur effective totale de l'ampère tourne dans les encoches du stator par longueur de périphérie du stator. J_1 Concerne la charge thermique et densité de couple. De grandes valeurs de J_1 conduisent à une grande densité de couple, et par conséquent à une machine de plus petite taille, ce qui peut entraîner une surchauffe de la machine et une réduction efficacité. Lorsque la densité de couple élevée est ciblée dans la conception, la tangentielle spécifique Force, concept peut être préféré. Elle est mesurée en N/cm² et varie de 0,1 N/cm² dans les micromoteurs à 10 N/cm² dans les conceptions à densité de couple plus grandes.

III.4.2 Densité de flux d'entrefer d'un aimant permanent: (B_{ag}) (T), varie de 0,2 T dans les micromoteurs à 1 T dans les grands moteurs. Conceptions de densité de couple. Ensemble, B_{ag} , J_1 et f_{tp} déterminent le volume de la machine pour un couple de base donné (T_{eb}).

III.4.3 La densité de flux dentaire du stator : B_{st} (T), détermine le degré de saturation magnétique dans la machine, elle varie de 1,2 à 1,8 T, en général, pour le silicium-laminé. Coeurs de stator.

III.4.4 La densité de flux d'étrier du rotor : B_{ry} (T), est importante dans la machine avec un grand nombre de poteaux (et d'un grand diamètre) lorsque les aimants permanents ne sont plus placés directement sur l'arbre.

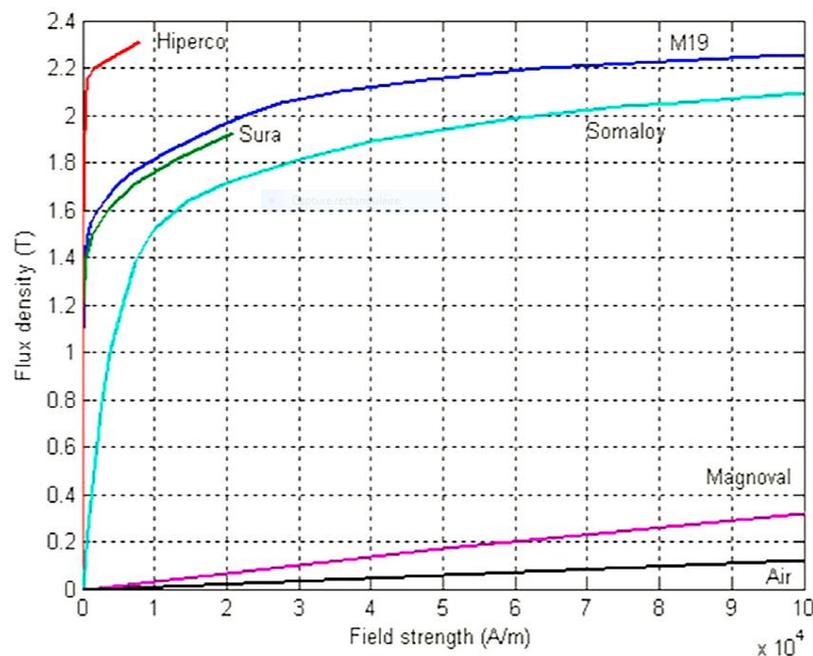


Figure 3. 1: Courbes d'aimantation pour quelques matériaux magnétiques doux typiques.

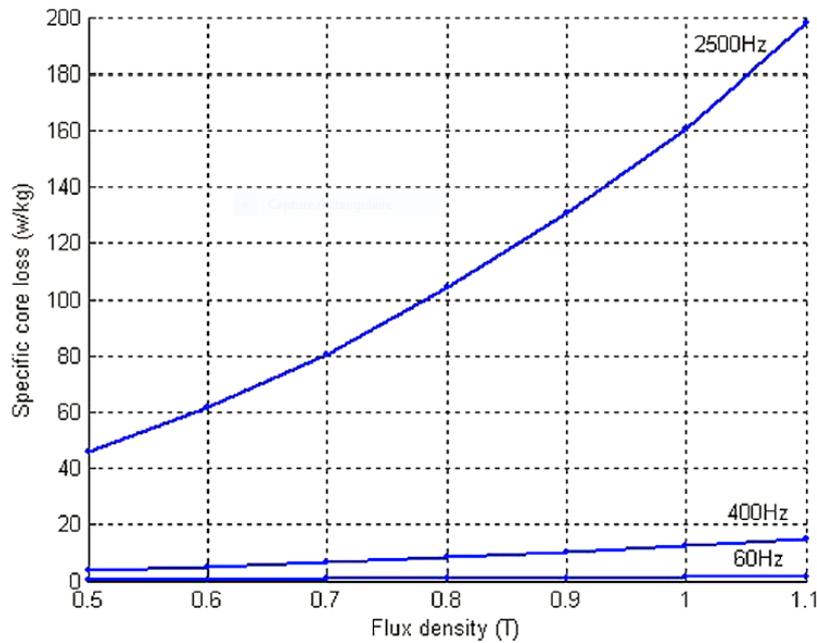


Figure 3. 2: pertes de fer par rapport à la densité de flux.

Comme l’entrefer magnétique de la machine (qui comprend l’épaisseur des particules de surface) est grand, L’influence de la saturation magnétique des dents est plutôt faible et, par conséquent, une grande la valeur de B_{st} peut être choisie; en revanche, si B_{st} est grand les pertes de cœur seraient également importantes (figure 3.2).

III.4.5 La densité de flux d’étrier du stator : B_{sy} (T), est choisie comme compromis entre le niveau de la saturation magnétique et des limitations dues aux pertes de cœur. Petites valeurs de B_{sy} peut conduire à une taille et un poids de machine plus importants, surtout si le nombre de Les pôles sont petits.

Optimisation	Minimum	Maximum		
Variable	Valeur	Valeur	Unité	Commentaire
J_1	15	30	K_A/m	Spécifications spécifiques de charge électrique
B_{ag}	0.45	0.75	T	Densité de flux d’entrefer
B_{st}	1	2	T	Densité de flux dentaire du stator
B_{sy}	0.9	1.9	T	Densité de flux d’étrier du stator
B_{ry}	0.9	2.1	T	Densité de flux

				d'étrier du rotor
q_1	2	4		Emplacements du stator par pôle et par phase
W_o	1	5	Mm	Largeur d'ouverture de l'encoche du stator

Tableau III.1: Limite des variables d'optimisation.

III.5 Méthodologie de conception préliminaire des MSAP pour les automobiles

Le dimensionnement préliminaire donnera les principales dimensions de la machine, ainsi que les informations sur les enroulements Configuration et distribution [41].

III.5.1 Tension de phase maximale

La tension de phase maximale d'un moteur synchrone à aimants permanents est directement liée à la tension d'alimentation du moteur.

$$V_{phmax} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \times V_{cc} \quad (II.1)$$

III.5.2 Diamètre intérieur du stator

Le couple de base dépend de plusieurs facteurs, notamment la conception du moteur, la configuration des aimants permanents, les dimensions physiques du moteur et les caractéristiques magnétiques des aimants utilisés.

$$T_{eb} = \frac{P_b}{2\pi \times n_b} \quad (II.2)$$

Le rapport entre la longueur de la cheminée et le diamètre intérieur du stator est :

$$\lambda = \frac{l_{stack}}{D_{is}} \quad (II.3)$$

Pour $l_{stack}/D_{is} = 1$

Le diamètre intérieur du stator est généralement déterminé en fonction du couple et de la puissance de sortie souhaités, ainsi que des contraintes d'encombrement et de refroidissement. Il peut être calculé en prenant en compte des facteurs tels que la densité de courant admissible, le nombre de pôles, le matériau du stator et d'autres considérations de conception.

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2 \times T_{eb}}{\lambda \pi \times f_t}} \quad (II.4)$$

III.5.3 Dimensionnement des matériaux

Considérons que la liaison de flux de particules dans le stator, 2 bobines par phase, varie sinusoïdale avec le maximum de:

$$\psi_{PMmax} = B_{gPM} \times b_{PM} \times l_{stack} \times 2n_c \quad (II.5)$$

$$\psi_{PM}(\theta_r) = \psi_{PMmax} \times \sin \theta_{er} ; \theta_{er} = p_1 \times \theta_r \quad (II.6)$$

$$B_{gPM} = \frac{B_r}{1 + K_{fringe}} \times \frac{h_{PM}}{g + h_{PM}} \quad (II.7)$$

Le couple pour $I_d=0$ et $I_q=I_b$ est

$$T_{eb} = 3 \times p_1 \times \frac{\psi_{PMmax}}{\sqrt{2}} \quad (II.8)$$

D'après l'équation (II.5) et (II.8) $n_c I_b$ a tourné (RMS) par bobine

$$n_c I_b = \frac{T_{sb} \times \sqrt{2}}{3 \times p_1 \times \psi_{PMmax}} \quad (\text{II.9})$$

III.5.4 Taille de l'encoche du stator

La zone active de l'encoche du stator représente la section de l'encoche où est placé le bobinage du stator. Elle représente la partie de la fente qui est activement utilisée pour générer le champ magnétique nécessaire à l'interaction avec les aimants permanents du rotor au fonctionnement du moteur. Cette zone est située dans les fentes du stator, qui sont des espaces entre les dents du stator.

La taille et la forme de la zone active de l'encoche peuvent varier en fonction de la conception spécifique du moteur et des exigences de performance. Une conception optimisée de l'encoche du stator permet d'obtenir un flux magnétique uniforme et efficace, ce qui améliore les performances du moteur en termes de couple, de rendement et de stabilité de fonctionnement.

$$A_{co} = \frac{2n_c I_b}{K_{fill} \times j_{cob}} \quad (\text{II.10})$$

L'emplacement du stator se réfère au nombre de zones où les bobines du stator sont placées pour générer le champ magnétique tournant. Chaque emplacement est associé à une paire de bobines. Donc le nombre d'emplacement du stator est

$$N_{ss} = q_1 \times P_s \times m \quad (\text{II.11})$$

La largeur de l'encoche est un paramètre important dans la conception du moteur et peut avoir un impact sur ses performances, on a deux type :

- ✓ La largeur inférieure de l'encoche est

$$W_{s1} = \frac{\pi D_{is}}{N_{ss}} \quad (\text{II.12})$$

- ✓ La largeur supérieure de l'encoche est

$$W_{s2} = W_{s1} \frac{B_{ag}}{B_{st}} \quad (\text{II.13})$$

La zone de créneau actif est importante car elle détermine la quantité de cuivre utilisée pour les bobines du stator et influence la puissance et le rendement du moteur. Une zone de créneau plus grande permet généralement d'obtenir une meilleure puissance et une meilleure efficacité, mais elle peut également entraîner une augmentation de la taille et du coût du moteur.

$$A_{\text{cof}} = \frac{W_{s1} + W_{s2}}{2} \times h_{su} \quad (\text{II.14})$$

L'étrier est la partie du stator du moteur qui entoure le rotor et contient les bobinages nécessaires pour créer un champ magnétique tournant. La hauteur de l'étrier est généralement déterminée en fonction de la densité de bobinage nécessaire pour obtenir la puissance souhaitée, ainsi que d'autres facteurs de conception tels que les contraintes d'encombrement et de refroidissement.

$$h_{ys} = \frac{B_{gPM} \times \tau_{PM}}{2B_{ys}} \quad (\text{II.15})$$

C'est $\tau_{PM} > b_{PM}$ pour éviter la saturation magnétique sous charge ainsi, le diamètre extérieure du stator est :

$$D_{\text{out}} = D_{is} \times 2h_{su} \times 2h_{sw} \times 2h_{ys} \quad (\text{II.16})$$

Le nombre de pole de rotor est :

$$P_s = 2p_1 \quad (\text{II.17})$$

L'angle géométrique de la fente fait référence à l'ouverture angulaire de l'encoche du stator dans laquelle les bobines sont placées. Cet angle détermine la largeur de la fente et peut varier en fonction de la conception spécifique du moteur.

$$\alpha_s = \frac{\pi}{N_{ss}} \quad (\text{II.18})$$

L'angle de la dent se réfère à l'ouverture angulaire de chaque dent du stator du moteur. Les dents sont les parties saillantes situées entre les encoches du stator et sont conçues pour concentrer le flux magnétique.

$$\alpha_{so} = 2 \sin^{-1} \frac{S_o}{D_{is}} \quad (\text{II.19})$$

L'angle sommet de la dent se réfère à l'angle formé par les côtés inclinés de la dent du stator. Cet angle est généralement mesuré à partir de l'axe de la fente jusqu'au sommet de la dent. Une conception appropriée de l'angle sommet de la dent contribue également à minimiser les pertes d'énergie et à améliorer les performances globales du moteur.

$$\alpha_{st} = \alpha_s - \alpha_{so} \quad (\text{II.20})$$

L'angle au centre d'une dent se réfère à l'angle mesuré au centre de la dent du stator par rapport à l'axe de l'encoche du stator. Cet angle est généralement utilisé pour décrire la géométrie des dents et la distribution du flux magnétique dans le stator

$$\alpha_{stmin} = 2 \sin^{-1} \frac{W_{st}}{D_{is}} \quad (\text{II.21})$$

L'ouverture de l'encoche fait référence à la largeur de l'espace entre les dents adjacentes du stator. Cela concerne spécifiquement les encoches situées entre les dents où les bobines sont placées.

$$W_o = D_{is} \times \sin\left(\alpha_s - \frac{\alpha_{stmin}}{2}\right) \quad (\text{II.22})$$

Diamètre extérieure du rotor est :

$$D_{ro} = D_{is} - 2g \quad (\text{II.23})$$

L'épaisseur du rotor se réfère à la dimension radiale du rotor, c'est-à-dire la distance entre la surface extérieure du rotor et son axe de rotation.

$$h_{ry} = \frac{B_{ag} \tau_p}{B_{ry} \pi} \quad (\text{II.24})$$

Diamètre intérieure du rotor est :

$$D_{ri} = D_{out} - 2(h_{pm} + h_{ry}) \quad (\text{II.25})$$

$$h_s = h_{sy} - \frac{D_{is} + D_{out}}{2} \quad (\text{II.26})$$

III.6 Paramètre de la machine

III.6.1 La résistance de phase

La résistance de phase d'un moteur synchrone à aimants permanents fait référence à la composante de résistance du circuit électrique d'une phase du moteur synchrone, où les aimants permanents sont utilisés pour créer le champ magnétique, et s'écrit sous la forme suivante :

$$R_s = \rho_{cc} \frac{I_{turn} \times 2n_c}{(n_c I_b / \rho_{cc})} \quad (II.27)$$

L'inductance de phase est influencée par plusieurs facteurs, tels que la géométrie du moteur, le nombre de spires dans les bobines, la perméabilité magnétique du matériau utilisé, ainsi que la position du rotor par rapport au stator.

$$L_m = 2 \times n_c^2 \times \mu_0 \times \frac{(\tau_s - b_{os})}{h_{pm} + g} \times l_{stack} \quad (II.28)$$

L'inductance de fuite se réfère à l'inductance qui se produit en raison du flux magnétique qui ne se propage pas à travers le circuit magnétique principal du moteur, mais qui s'échappe dans l'entrefer entre le stator et le rotor. Cette inductance de fuite est également appelée inductance mutuelle ou inductance de dispersion.

$$L_{s1} = 0.3 * L_m \quad (II.29)$$

L'inductance de couplage est un paramètre clé dans la modélisation et l'analyse des moteurs synchrones à aimant permanent. Il affecte les caractéristiques de fonctionnement électromagnétique du moteur, notamment la réponse dynamique, le couple produit, la stabilité et l'efficacité globale. Une connaissance précise de l'inductance de couplage est essentielle pour la conception et le contrôle précis du moteur.

$$L_{12} = -L_m/3 \quad (II.30)$$

Donc l'inductance synchrone est :

$$L_s = L_m - L_{12} + L_{s1} \quad (\text{II.31})$$

Nous pouvons maintenant calculer les pertes de cuivre pour le couple

$$P_{cob} = 3R_s \times I_b^2 \quad (\text{II.32})$$

Négliger le fer et les pertes mécaniques, l'efficacité à la puissance de base et à la vitesse sera :

$$\eta_b = \frac{P_b}{P_b + P_{cob}} \quad (\text{II.33})$$

$$E_1 = \frac{W_{1b} \times \psi_{pmax}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{phm} = \sqrt{(E_1 + R_s \times I_b)^2 + (W_{1b} \times L_s \times I_b)^2} \quad (\text{II.35})$$

Le courant de base de phase est :

$$I_b = (n_c \times I_b) / n_c \quad (\text{II.36})$$

La puissance d'entrée apparente est :

$$S_n = 3V_{phmax} \times I_b \quad (\text{II.37})$$

Ainsi le facteur de puissance de la vitesse de base est :

$$\cos \varphi_b = \frac{P_b}{\eta_b \times S_n} \quad (\text{II.38})$$

III.6.2 Vérification de la capacité du couple maximale

La capacité du couple maximal d'un moteur synchrone à aimant permanent dépend de plusieurs facteurs, notamment la conception du moteur, la taille et la qualité des aimants permanents utilisés, ainsi que les caractéristiques du circuit magnétique et du système d'entraînement.

$$(T_e)_{n_{\max}} = \frac{P_b}{2\pi \times n_{\max}} \quad (\text{II.39})$$

Donc le courant nécessaire est :

$$\frac{(I_q)_{n_{\max}}}{I_b} = \frac{(T_e)_{\max}}{T_{eb}} \quad (\text{II.40})$$

Nous pouvons maintenant vérifier quel couple peut être produit à un courant nominal

$$I_d = \sqrt{I_b^2 - ((I_q)_{n_{\max}})^2} \quad (\text{II.41})$$

$$V_s = \sqrt{(E_1 + R_s \times I_q - W_{1\max} \times L_s \times I_d)^2 + (R_s \times I_d + W_{1\max} \times L_s \times I_q)^2} \quad (\text{II.42})$$

III.7 Application

On a appliqué les étapes de dimensionnement dans script MATLAB comme montre la figure :

```

Editor - C:\Users\User\Desktop\Dim_msap.m
Dim_msap.m
1 - Vphmax=(sqrt(2)/pi)*Vcc % Tension de phase maximale
2 - Teb=Pb/(2*pi*(nb/60)) % Le couple de base
3 - Dis=((2*Teb)/(lamda*pi*ft))^(1/3) % Diamètre interieur du stator
4 - hpm=4*g
5 - lstack=lamda*Dis % Longueur de la pile du stator
6 - Bgpm=(Br/(1+Kfring))*(hpm/(hpm+g)) % la densité de flux d'entrefer des particules
7 - psi_phmax=Bgpm*bpm*lstack*2*nc
8 - Acc=(2*nc*Ib)/(Kfill*jcob) % Taille de la fente du stator
9 - ps=2*pl
10 - Nss=ql*m*ps % nombre d'emplacement du stator
11 - taux_s=(pi*Dis)/(Nss/2)
12 - wsl=(pi*Dis)/Nss % largeur inferieur de la fente
13 - ws2=wsl*(Bag/Bst); % largeur superieur de la fente
14 - Acof=((wsl+ws2)/2)*hsu % la zone créneau actif
15 - taux_pm=pi*Dis
16 - hys=(Bgpm*taux_pm)/(2*Bys) % Hauteur de l'étrier du stator
17 - Dout=Dis+2*hsu+2*hs2+2*hys % Le diamètre extérieur du stator
18 - Dro=Dis-2*g % Diamètre extérieure de rotor
19 - tauxp=(pi*Dis)/pl
20 - hry=(Bag/Bry)-(tauxp/ps)
21 - Dri =Dout-2*g % Diamètre intérieure de rotor
22 - hs=((Dout-Dis)/2)-hys

```

Figure 3. 3: script de dimensionnement.

III.8 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à l'étude et dimensionnement de machines synchrones à aimants permanents pour un véhicule électrique qu'une tâche complexe qui nécessite une analyse approfondie des besoins de performance, l'autonomie, la fiabilité et l'intégration dans le système global du véhicule, qu'elle dépend de plusieurs facteurs tels que la puissance requise, la vitesse maximale, le couple maximal, le poids du véhicule, l'efficacité énergétique et le coût. Il est important de choisir un moteur de taille appropriée pour garantir des performances optimales et une longue durée de vie. Les moteurs à aimant permanent sont souvent préférés pour leur efficacité énergétique et leur faible entretien.

Chapitre IV

Application et Visualisation du dimensionnement

IV.1 Introduction

La prédiction des performances d'un système global de la conception de l'appareil à son efficacité opérationnelle finale en utilisant les outils et méthodes de conception les plus efficaces, est la clé de l'innovation pour les organisations « Flux Motor » est un outil logiciel autonome flexible qui se concentre sur la préconception des machines électriques tournantes. Il permet à l'utilisateur de concevoir et de créer des moteurs à partir de pièces standard ou personnalisées, ainsi que d'ajouter intuitivement des enroulements et des matériaux pour effectuer une sélection de tests et comparer le comportement de la machine s'adressant à un large éventail d'utilisateurs. A l'aide de ce logiciel nous appliquant le script 'Dim .m ' qui donne les résultats et des informations précise sur le moteur qui nous étudie.

IV.2 Cahier des charges

Le cahier des charges d'un moteur est composé de deux parties complémentaires d'une part, la spécification des performances qui définira la caractéristique électromécanique 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.

IV.2.1 Exemple 1 :

Le circuit magnétique à dimensionner est celui d'un moteur synchrone triphasé à aimant permanent, dont les données comme suit :

- ✓ Puissance de base $P_b = 100 \text{ w}$
- ✓ Vitesse de base $n_b = 1800 \text{ tr/min}$
- ✓ Vitesse maximale $n_{\text{max}} = 3000 \text{ tr/min}$
- ✓ Puissance à vitesse maximale = P_b
- ✓ Tension $V_{\text{cc}} = 14 \text{ V}$

IV.3 Données générales

Vue radiale

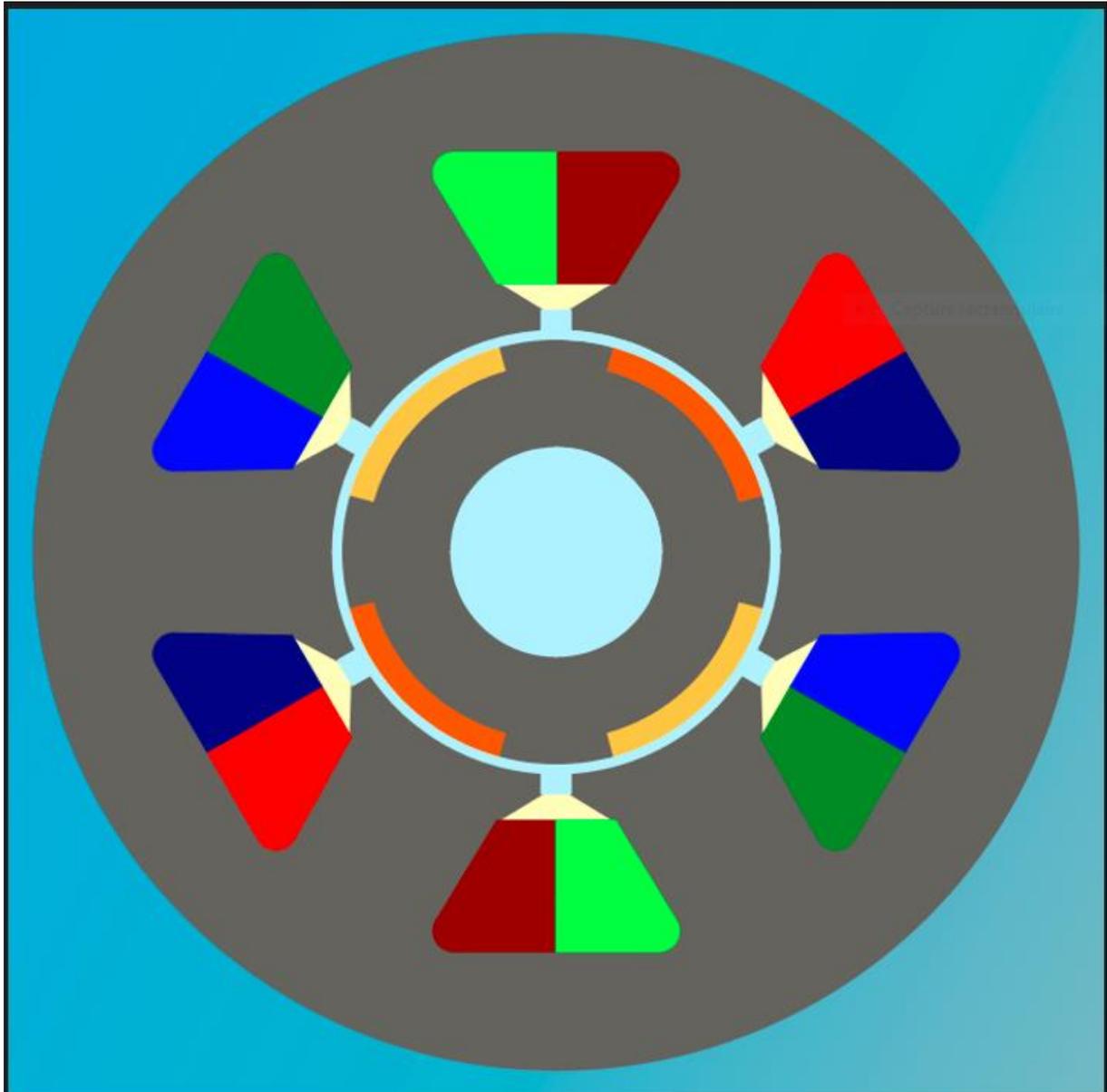


Figure 4. 1: Conception - Vue radiale.

IV.4 Identification de la machine

Classification	
Moteur	M02_06S04P_1
Catalogue	Utilisateur Synchrone
Famille	Synchrone
Type	Aimant permanent

Sous-type	Rotor intérieur
Nombre de phase	3 phases

Stator	
Diamètre extérieur (mm)	75
Diamètre intérieur (mm)	32
Longueur (mm)	32
Nombre d'encoches	6
Matériel	REF.M330_35A
Matériau conducteur	REF. Cuivre

Entrefer	
Longueur (mm)	0.5

Rotor	
Diamètre extérieur (mm)	31
Diamètre intérieur (mm)	15
Longueur (mm)	32
Nombre de pôles	4
Matériel	REF.M330_35A
Matériau de l'aimant	REF.Smco_1040_1800

Arbre	
--------------	--

Type	Aucun
Matériel	-

IV.5 Stator

IV.5.1 Fente

Vue radiale

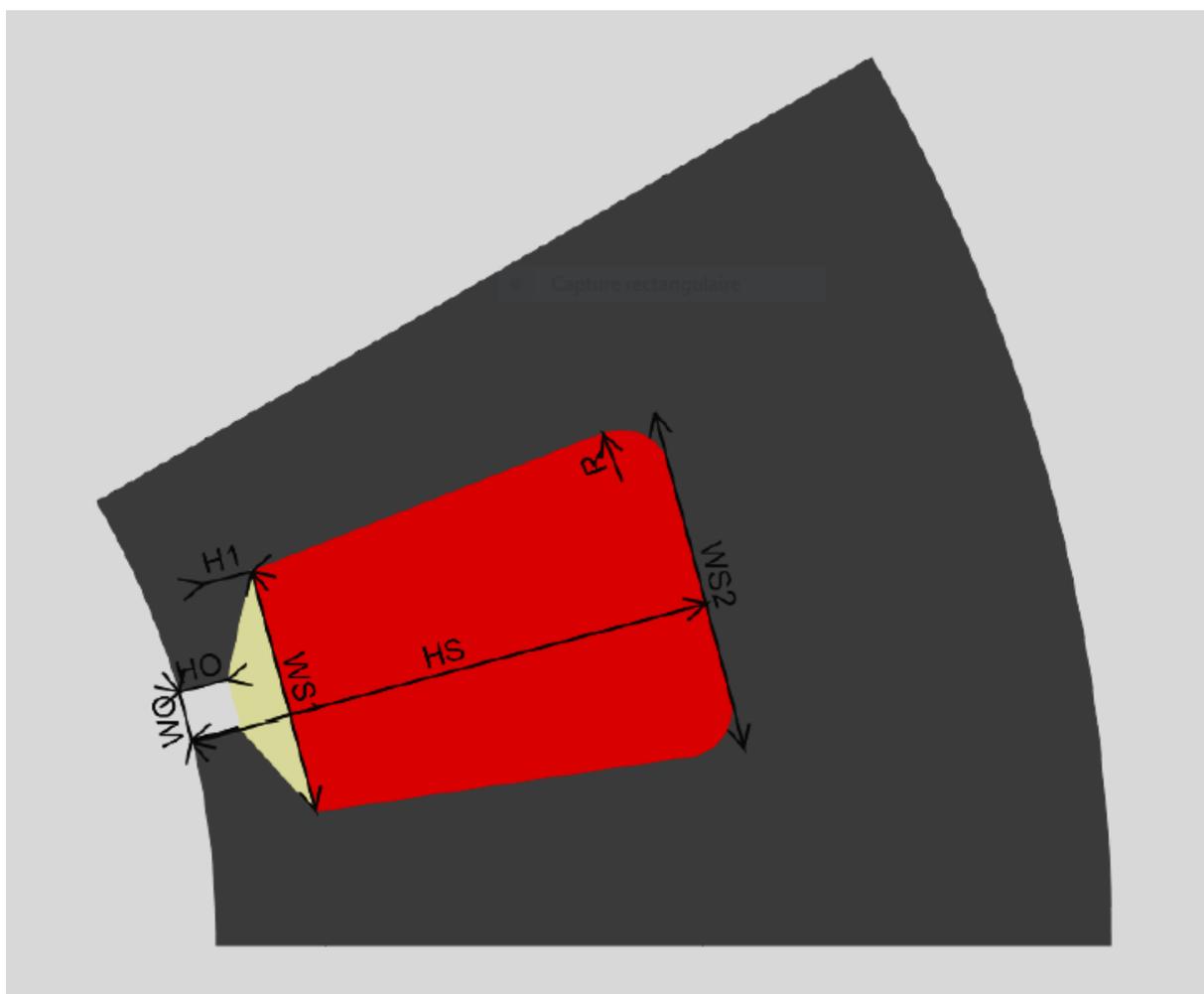


Figure 4. 2: Vue radiale à fente

Entrées

Rotor	
Diamètre extérieur (mm)	31
Diamètre intérieur (mm)	15

Longueur (mm)	32
Nombre de pôles	4
Matériel	REF.M330_35A
Matériau de l'aimant	REF.Smco_1040_1800

Entrées :

Nom	Valeur
H_s (mm)	13
W_{S2} (mm)	20
H_1 (mm)	2
W_{S1} (mm)	8.5
H_0 (mm)	1.5
W_0 (mm)	2
R(mm)	1.5

Sorties :

Nom	Valeur
W_{T1} (mm)	12.108
W_{T2} (mm)	11.758
Poids (mm)	11.933
W_S (mm)	14.25

$V(\text{deg})$	31.608
$D(\text{mm})$	114.677

IV.5.2 Bobinage

Condition d'enroulement

Entrées

Nom	Valeur
Connexion d'enroulement	Etoile
Nombre de couches	2
Nombre de chemins parallèles	1
Mode de définition	Expert
Disposition de la bobine	Adjacent
Séquence de phase	Dans le sens des aiguilles d'une montre
Nombre de doublons	2

Paramètre

Nom	Valeur
Nombre de tour par bobine	45
Topologie filaire	Circulaire
Topologie du conducteur	Circulaire
Fil (mm)	0.002
Topologie	Forme en U
Rallonge CS (mm)	1
Extension totale CS (mm)	2
Référence température (deg)	20
Nombre de fils en main	1
Diamètre du fil (mm)	0.3
Diamètre du conducteur (mm)	0.34
Rallonge OCS (mm)	1
OCS total extension (mm)	2

Facteur de résistance	1
Facteur d'inductance	1

Données principales**Caractéristiques**

Nom	Valeur
Nombre d'emplacement/pole/phase	0.5
Enroulement	0.866
Distribution	1
Conducteur total (mm)	28130.483
Axial hors tout	36
Conductivité (mm ²)	6.362
L'encoche (mm ²)	142.65
Brut (%)	4.46
Filet (%)	13.09
Fausser	1
Nombre de conducteur par phase	180
Connexion bobine (mm)	1124.974
Fil conducteur (mm ²)	0.007069
Libre (mm ²)	123.978
Conductivité du conducteur (mm ²)	0.007069
Isolation (mm ²)	12.311
Tour moyen (mm)	100.02
Terrain	0.866
Nombre de tours en série par phase	90

Résistances

Nom	Valeur
Phase	2.287
Fin d'enroulement	0.8821
Ligne-Ligne	4.574
Enroulement d'extrémité CS	0.4868

Partie droite sinueuse	1.405
Enroulement final OCS	0.3953

Inductance

Nom	Valeur
Fin d'enroulement	6.233×10^{-5}
Enroulement d'extrémité	3.116×10^{-5}

Masse

Nom	Valeur
Totale (Kg)	1.992×10^{-2}
Isolation des fils (Kg)	4.924×10^{-4}
Conducteur électrique (kg)	1.768×10^{-2}
Isolation totale (kg)	2.246×10^{-3}
Cale d'isolation (kg)	1.754×3

Visualisation**Disposition du bobinage**

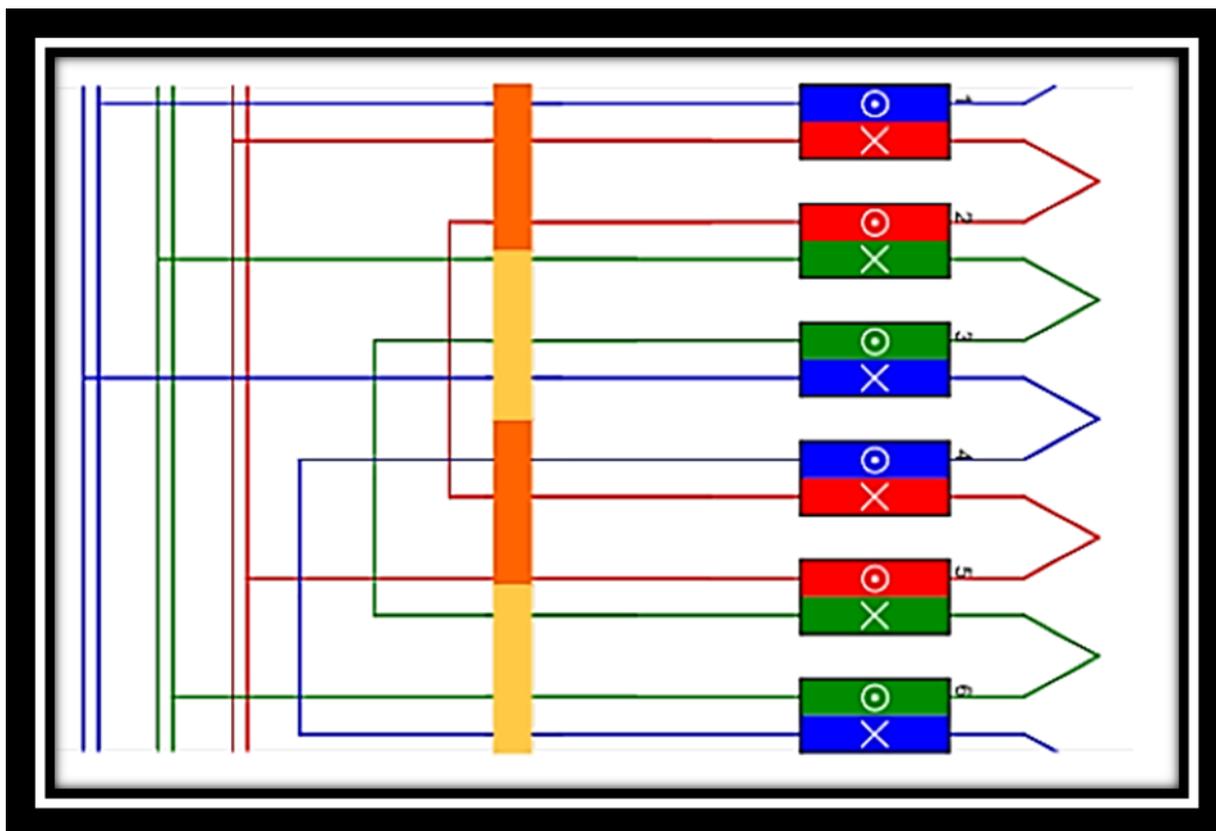
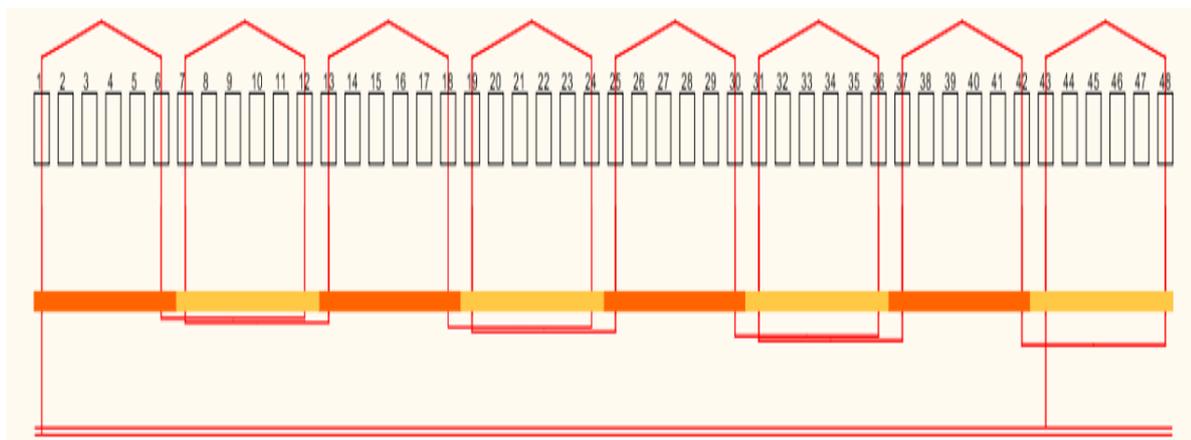


Figure 4. 3: Disposition de l'enroulement.

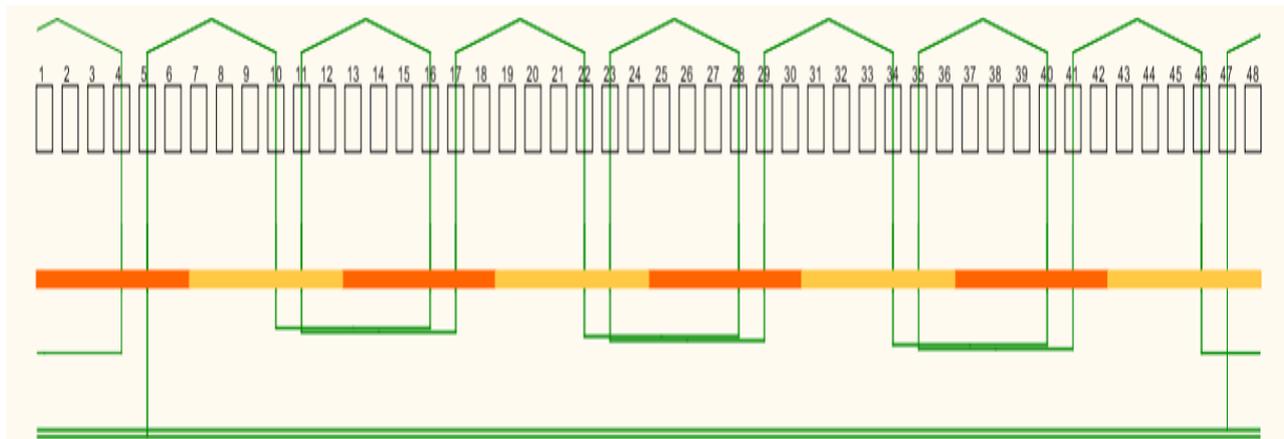
Tableau de connexion des enroulements

La phase 1



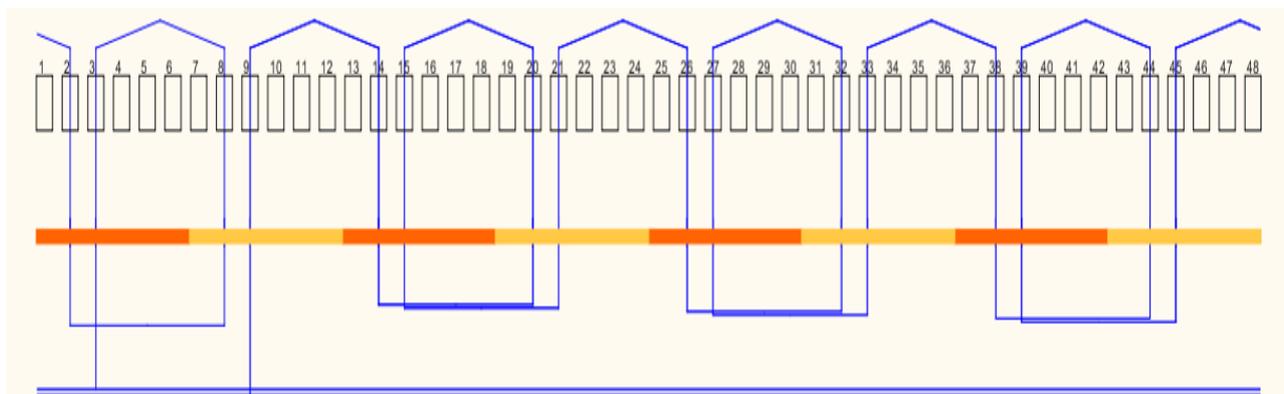
Bobine	Entrée de l'encoche	Sortie de l'encoche
1	1(droite)	2(gauche)
2	4(droite)	5(restants)

La phase 2



Bobine	Entrée de l'encoche	Sortie de l'encoche
1	2(droite)	3(restants)
2	5(droite)	6(gauche)

La phase 3



Bobine	Entrée de l'encoche	Sortie de l'encoche
1	3(droite)	Encore 4
2	6(droite)	1(gauche)

Vue radiale

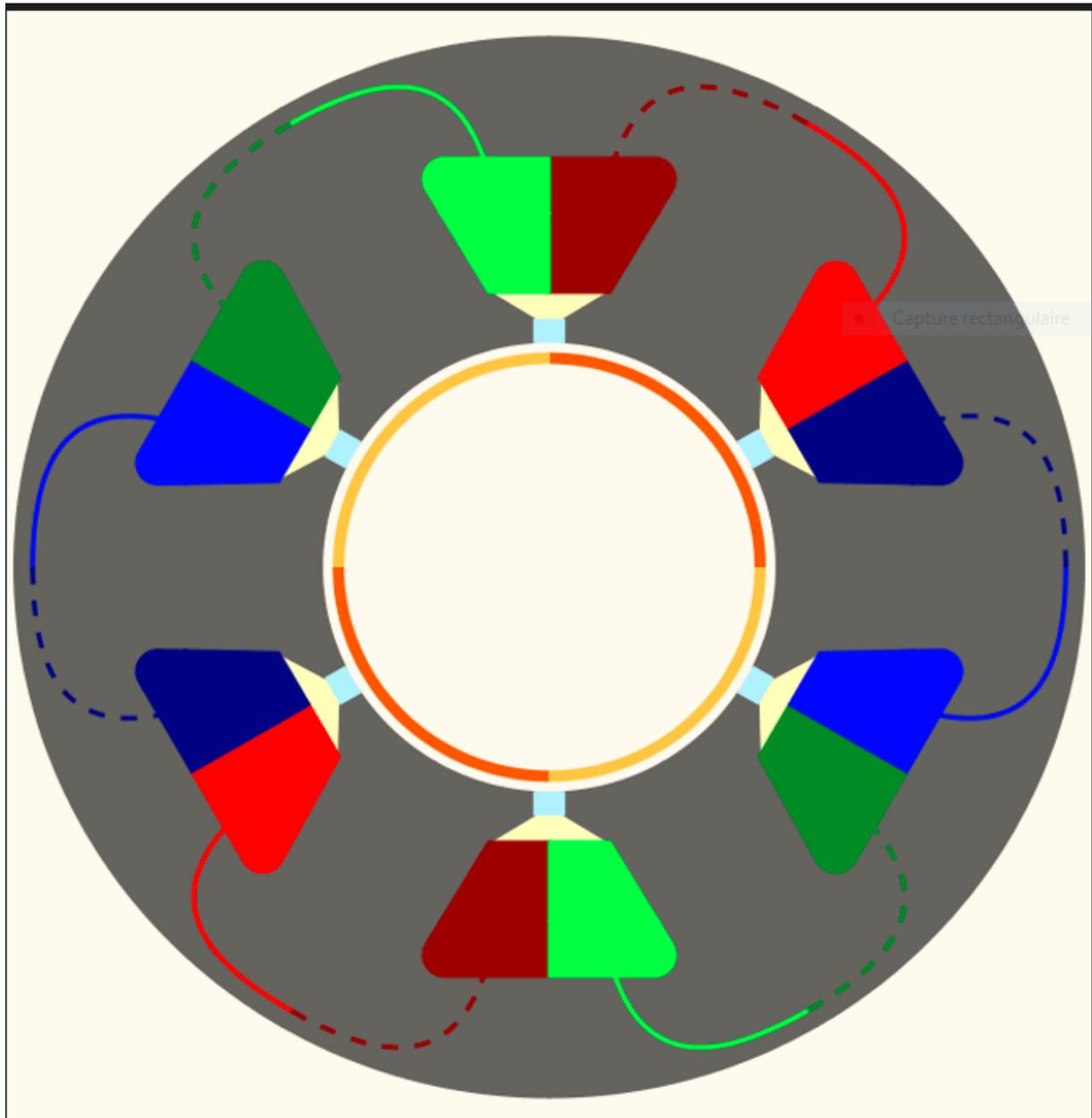


Figure 4. 4: Vue radial.

IV.5.3 Logement

Vue axiale du bobinage

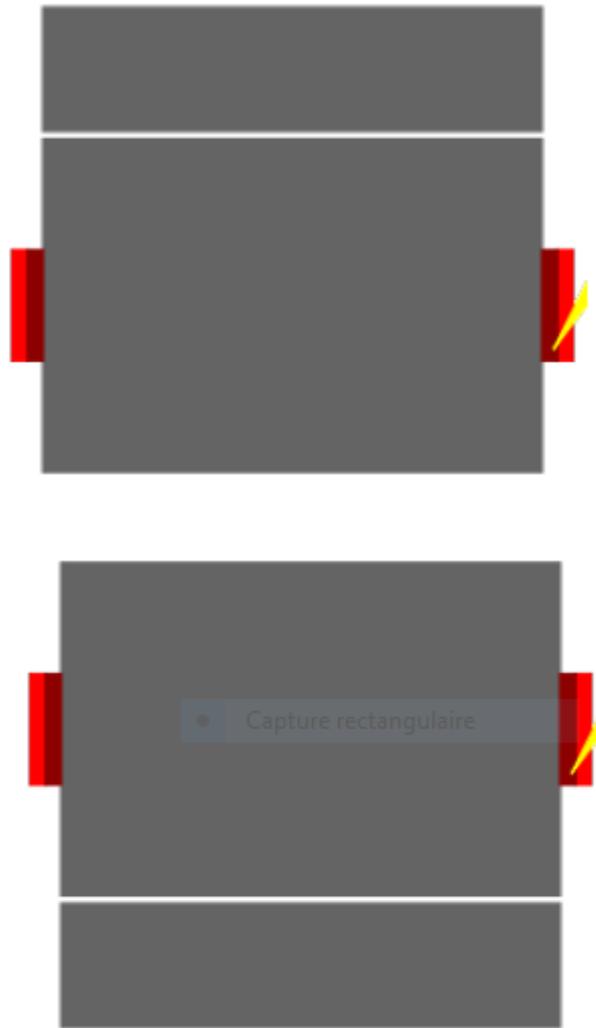


Figure 4. 5: Vue axiale du bobinage.

IV.6 Rotors

IV.6.1 Aimant

Vue radiale

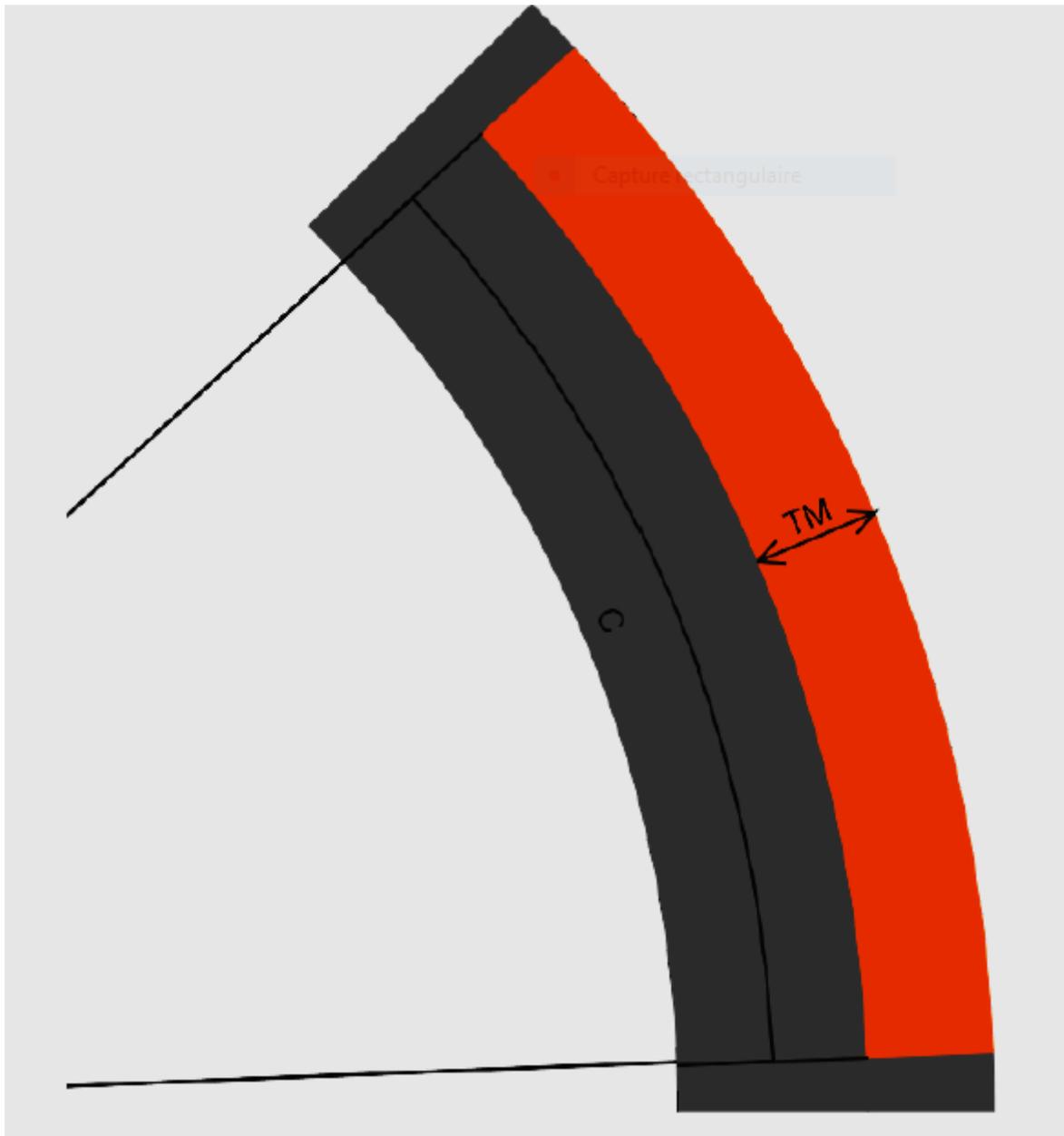


Figure 4. 6: Aimant-Vue radiale.

Entrées

Nom	Commentaire	Valeur
TM (mm)	Epaisseur de l'aimant (mm)	2
C (deg)	Angle extérieure de l'aimant	120

Sorties

Nom	Commentaire	Valeur
R ₁ (mm)	Rayon intérieur de l'aimant	13.5

V_p (deg)	Pas polaire angulaire	90
W_1 (mm)	Largeur extérieure de l'aimant	15.5
W_2 (mm)	Largeur intérieure de l'aimant	13.5

IV.6.2 Polarisation

Entrées

Région	Orientation
Aimant	Radiale +

3.3.2 Vue radiale

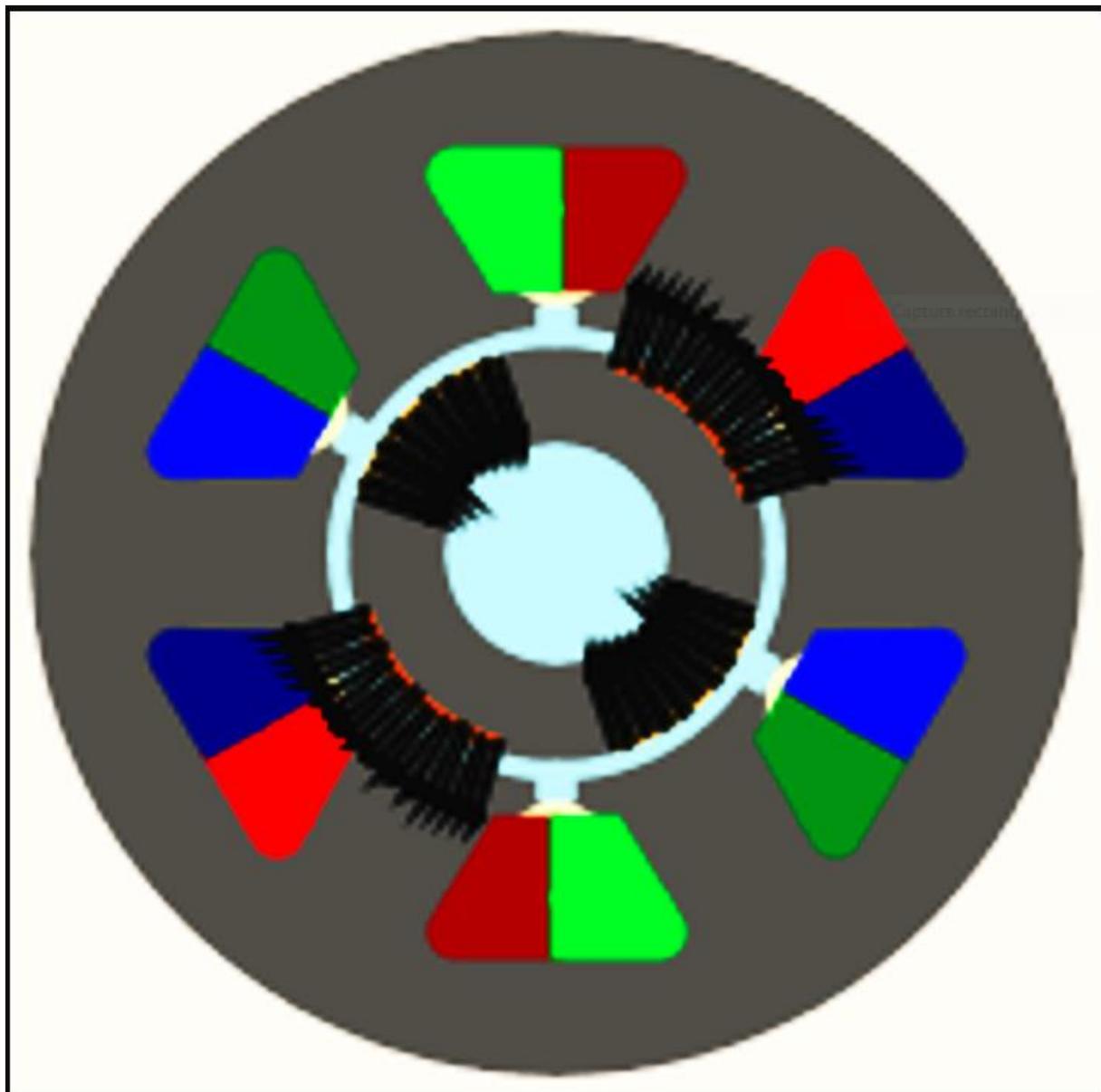


Figure 4. 7: Polarisation-Vue radiale.

IV.6.3 Matériaux

IV.6.3.1 Arbre

Régions	Matériaux
Emplacement de l'arbre	REF. Air

IV.6.3.2 Aimant intérieur

Régions	Matériaux
Aimant	REF. SmCo_1040_1800

IV.6.3.3 Circuit magnétique

Régions	Matériaux
Joug	REF.M330_35A
La toile	REF.M330_35A

IV.6.3.4 Entrefer

Régions	Matériaux
Trou d'air	REF. Air

IV.6.3.5 Masses

Rotor (kg)	0.13844554812608512
Aimants (kg)	0.032263767334668
Circuit magnétique (kg)	0.10618181045273843

IV.8 Exemple 2

Aujourd'hui, l'automobile la plus aboutie présentant une motorisation de type MSAP est sans conteste la Toyota Prius. Le cahier de charge comme suit :

- ✓ Puissance de base $P_b = 50 \text{ kw}$
- ✓ Vitesse de base $n_b = 1200 \text{ tr/min}$
- ✓ Vitesse maximale $n_{max} = 6000 \text{ tr/min}$

IV.8.1 Données générales

IV.8.1.1 Vue radiale

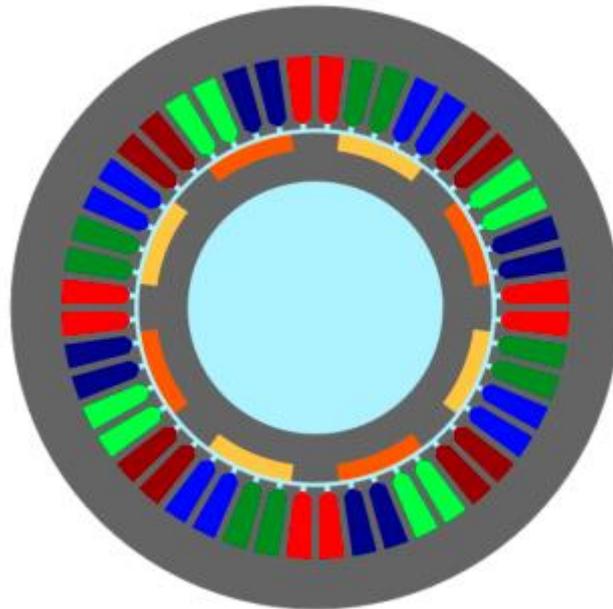


Figure 4.8: Vue radiale d'un moteur Toyota Prius.

IV.8 .2 Identifiant de l'ordinateur

Classification	
Catalogue	Utilisateur synchrone
Famille	Synchrone
Type	Aimant permanent
Sous type	Rotor intérieure
Nombre de phase	3 phases

Stator	
Diamètre extérieur	265
Diamètre intérieur	162
Longueur	85
Nombre d'encoche	48
Matériel	REF.M330_35A

Matériau conducteur	REF. Cuivre
---------------------	-------------

Trou d'air	
Longueur	0.75

Rotor	
Diamètre extérieur	160
Diamètre intérieur	90
Longueur	85
Nombre de pole	8
Matériel	REF.M330_35A
Matériau de l'aimant	REF. Smco_1040_1800

IV.8.3 Stator

IV.8.3.1 L'encoche

Vue radiale

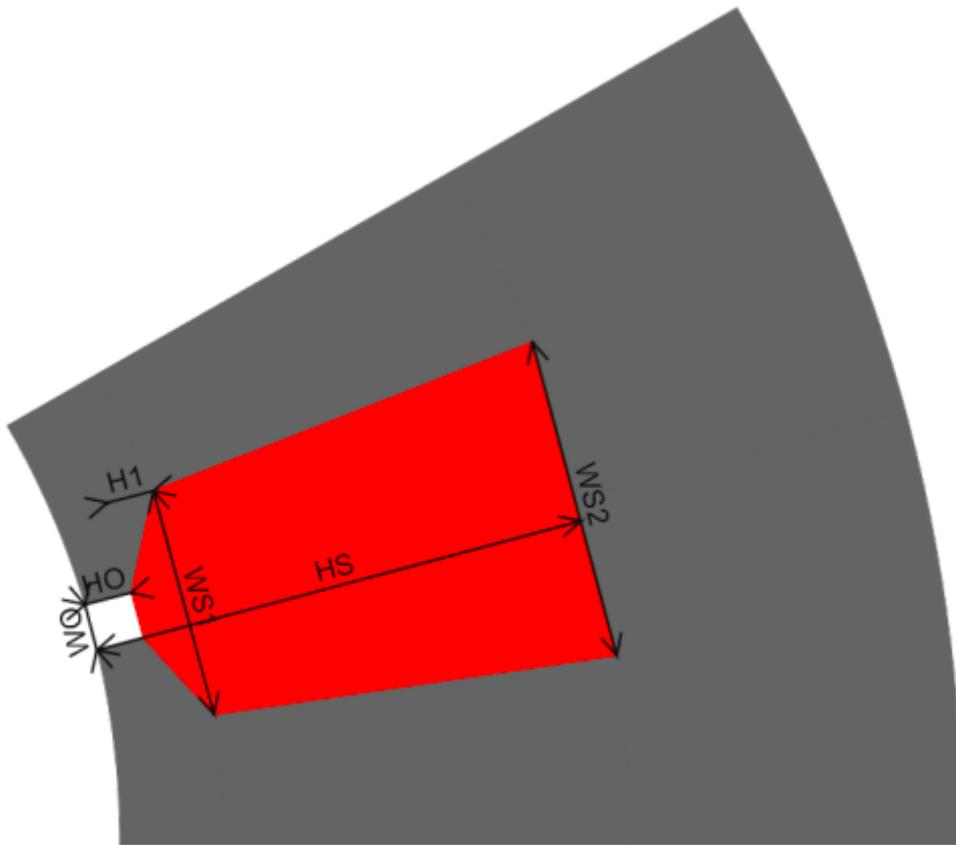


Figure 4. 9: Vue radiale de l'encoche.

Entrées

Nom	Valeur
H_s (mm)	32
W_{s2} (mm)	9.49
H_1 (mm)	2.097
W_{s1} (mm)	5.92
H_0 (mm)	2.517
W_0 (mm)	2

Sorties

Nom	Valeur
W_{T1} (mm)	5.291
W_{T2} (mm)	5.311
Poids (Kg)	5.301
W_S (mm)	7.705
V (degré)	46.934

IV.8.3.2 Bobinage

Condition d'enroulement

Entrées

Nom	Valeur
Connexion d'enroulement	Etoile
Nombre de chemines parallèle	1

Paramètres

Nom	Valeur
Nombre de tour par bobine	8
Topologie Filaire	Circulaire
Topologie de conducteur	Circulaire
Fil	0.004673
Topologie	Forme U
Nombre de fils	10
Diamètre du fil	1.045
Diamètre du conducteur	4.34
Référence de température	20

IV.8.3.3 Matériaux

Nom	Valeur
Conducteur	REF. Cuivre
Fil	REF. Nomex_130
Séparateur de phase	REF. Nomex_130

Données principales

Caractéristiques

Nom	Valeur
Nombre de phase	3
Connexion d'enroulement	Etoile
Nombre de tour par bobine	8
Nombre d'emplacement par pole et par phase	2
Nombre bobine par pole et par phase	1
Enroulement	0.9659
Fente	161.294
Type d'enroulement	Concentrique
Pas de poteau	6
Pas de bobine	5
Isolation	12.819
Nombre de conducteur par phase	128
Séquence de phase	Dans le sens ces aiguilles d'une montre
Connexion de bobine	5017.829
Fil de conducteur	0.8573

Résistances

Nom	Valeur
Phase	0.004862
Fin d'enroulement	0.00674
Ligne-ligne	0.009724
Enroulement d'extrémité	0.001505

Inductances

Nom	Valeur
Fin d'enroulement	7.947×10^{-5}
Enroulement d'extrémité	3.974×10^{-5}

Masses

Nom	Valeur
Totale	5.63
Isolation des fils	0.101
Conducteur électrique	

Visualisation

Disposition du bobinage

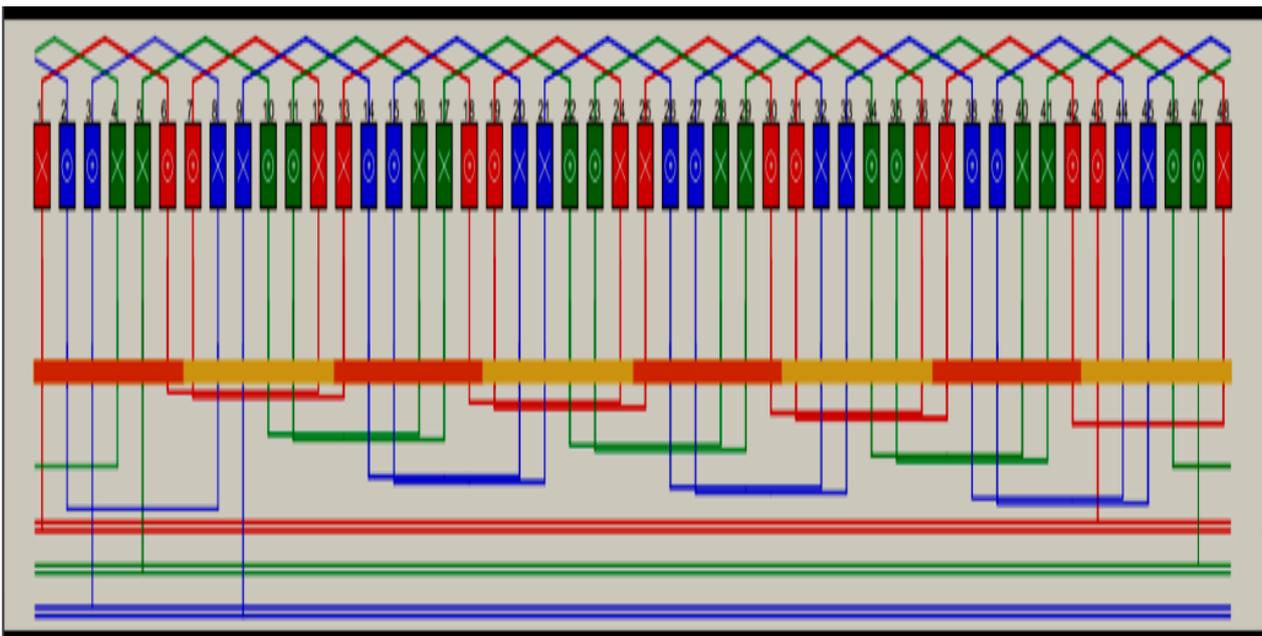


Figure 4.10: Disposition du bobinage.

Tableau de connexion des enroulements

Phase 1 :

Bobine	Fente d'entrée	Fente de sortie
1	1	6

2	12	7
3	13	18
4	24	19
5	25	30
6	36	31
7	37	42
8	48	43

Phase 2

Bobine	Fente d'entrée	Fente de sortie
1	5	10
2	16	11
3	17	22
4	28	23
5	29	34
6	40	35
7	41	46
8	4	47

Phase 3

Bobine	Fente d'entrée	Fente de sortie
1	9	14
2	20	15
3	21	26
4	32	27
5	33	38
6	44	39
7	45	2

8	8	3
---	---	---

Vue radiale

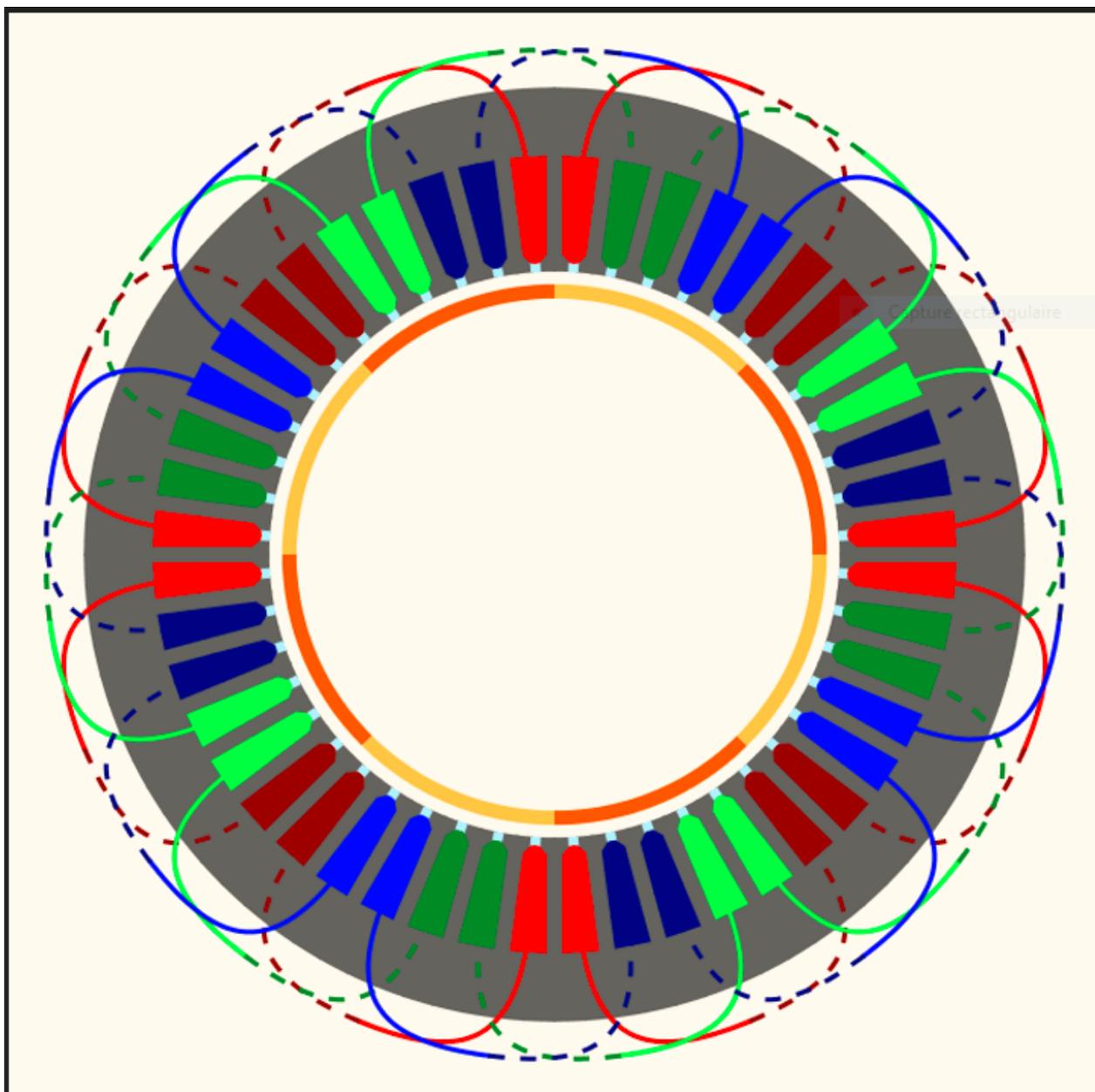


Figure 4. 11: Vue radiale

Vue axiale du bobinage

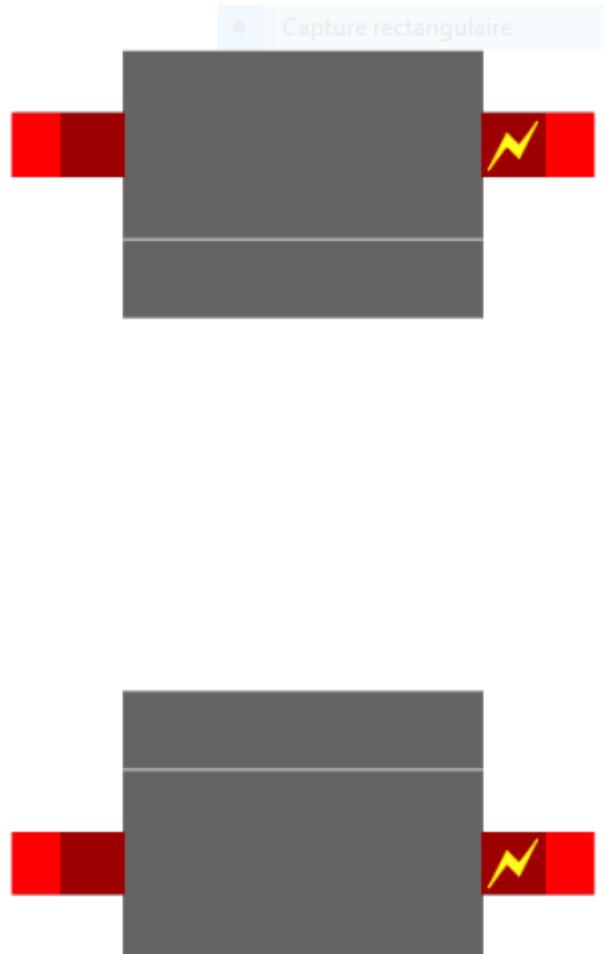


Figure 4 12: Vue axiale du bobinage

Masses

Stator	15.445
Circuit magnétique	9.815
Bobinage	5.630
Conducteur de bobine	5.528
Isolant	0.101

IV.8.4 Rotors

IV.8.4.1 Aimant

Vue radiale

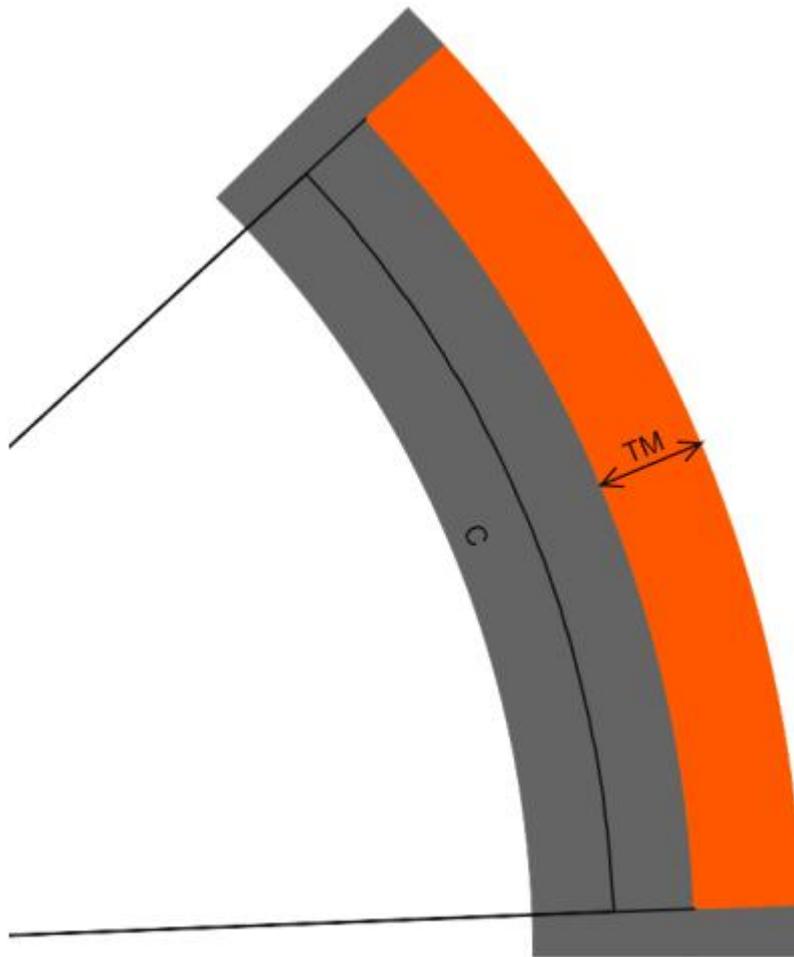


Figure 4. 13: Aimant-Vue radiale

Entrées

Nom	Commentaire	Valeur
TM (mm)	Epaisseur de l'aimant (mm)	6.78
C (deg)	Angle extérieure de l'aimant	120

Sorties

Nom	Commentaire	Valeur
R_1 (mm)	Rayon intérieur de l'aimant	56.47
V_p (deg)	Pas polaire angulaire	45
W_1 (mm)	Largeur extérieur de l'aimant	32.741
W_2 (mm)	Largeur intérieure de l'aimant	29.231

IV.8.4.2 Polarisation

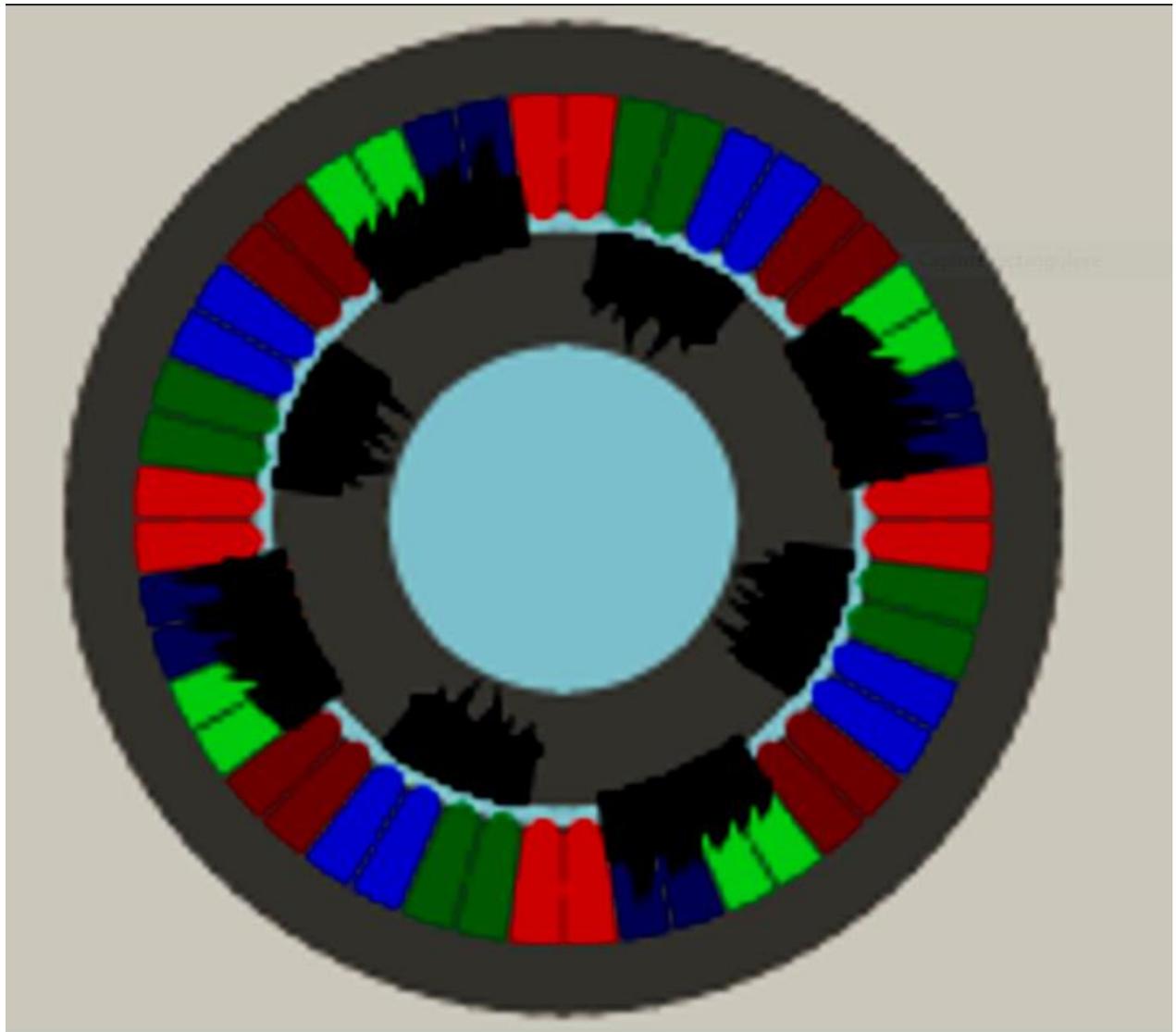


Figure 4. 14:Polarisation-Vue radiale

IV.8.4.3 Matériaux

Arbre

Régions	Matériaux
Emplacement de l'arbre	REF. Air

Aimant intérieur Aimants

Régions	Matériaux
Aimant	REF. SmCo_1040_1800

Circuit magnétique

Régions	Matériaux
Joug	REF.M330_35A
La toile	REF.M330_35A

Entrefer

Régions	Matériaux
Trou d'air	REF. Air

Masses

Rotor (kg)	3.9831321697991093
Aimants (kg)	1.1993668301573515
Circuit magnétique (kg)	2.783765339641758

IV.9 conclusion

Dans ce chapitre on a utilisé logiciel « Altaire Flux moteur » pour visualiser les résultats du script Dim_msap.m de dimensionnement des moteur synchrone à aimant permanent sur deux moteurs ,un petit moteur de 100W et le second un moteur de propulsion d'un véhicule électrique de 50KW.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, la conception et l'analyse d'un moteur synchrone à aimant permanent pour l'application dans un véhicule électrique sont des sujets de recherche importants dans le domaine de la mobilité électrique.

Le véhicule électrique c'est la tendance du notre temps, elle est avancée grâce à un moteur électrique ou plusieurs placés dans les roues. Le moteur électrique est alimenté par une batterie d'accumulateurs, une pile à combustible. Pour cela on a travaillé à donner un aperçu sur leur fonctionnement, leurs différentes configurations et classification des entrainements pour choisir le meilleur moteur qui associe au véhicule électrique.

Les moteurs synchrones à aimants permanents sont les plus répandus dans les voitures électriques, principalement parce que ce sont eux qui offrent le meilleur rendement énergétique, et donc la consommation la plus faible, ce qui garantit la meilleure autonomie.

Après avoir étudié et analysé l'aimant permanent synchrone et sa conception et son application sur les voitures électriques, On peut dire que cette technologie est une solution qualitative pour augmenter l'efficacité des voitures électriques. et réduire la consommation d'énergie.

Bien que la conception et l'analyse de cette application nécessitent une étude approfondie de la technologie utilisée et des exigences techniques nécessaires. Ainsi, il est possible de compter sur l'utilisation de cette technologie à l'avenir pour améliorer l'efficacité et la durabilité des voitures électriques et répondre aux besoins des consommateurs et de l'environnement.

Bibliographique

Bibliographique

- [1] <https://doi.org/10.3390/wevj13040057>
- [2] <https://www.intechopen.com/chapters/68961>
- [3] « Histoire de la voiture électrique et de ses constituants », fiche technique.
- [4] **R. Saidani** et **A. Benkechida** « Commande de roues motrices d'un véhicule électrique » Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme master 2021.
- [5] **H.BENARIBA** « Contribution à la commande d'un véhicule électrique. » Thèse doctorat université Tlemcen 2018.
- [6] **S. MEZIANI, A. BOURENANE** « Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.
- [7] **D.MERFED** et **K.AAMROUN** « Etude et stratégies de commande d'un véhicule hybride série » mémoire master université TIZI-OUZOU 2013.
- [8] **I. MARIF & H.ABDAT** « La commande en vitesse d'un véhicule électrique », mémoire de master, université Tlemcen, 2019
- [9] « Principe des piles à combustible » Technique de l'ingénieur, D3340
- [10] « Modélisation et gestion d'énergie des véhicules électriques hybrides » Technique de l'ingénieur, TRP1105
- [11] **K. Sehil, B. Alamri, M. Alqarni, A.Sallama et M. Darwish** « Empirical Analysis of High Voltage Battery Pack Cells for Electric Racing Vehicle »
- [12] **N. R. N. Idris, A. Jusoh, N. D. Muhamad** « Power Converter Design for Electric Vehicle Applications » Jurnal Teknologi 2014.
- [13] **A. Laguidi**, "Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [14] **H.CHENNOUFI** "Contribution à l'Etude de la Commande d'un Véhicule Electrique à Deux Roues Motrices", Thèse Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Février 2005.
- [15] https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/voiture_electrique.pdf
- [16] **Benjamin Daguse** « Modélisation analytique pour le dimensionnement par optimisation d'une machine dédiée à une chaîne de traction hybride à dominante électrique » Thèse de doctorat en Français, Supléc 2013
- [17] « électricité machines électriques et électronique » jean niar –jean-claude gallois –michel ybilensky-an-pierre libersac.
- [18] **Lucian N. Tutelea** « Electric machines Steady state and performance »

Bibliographique

- [19] **Pierre MAYE** : « Aide- Mémoire Electrotechnique ». Édition DUNOD, Paris, 2006
- [20] Guy CHATEIGNER, Michel BOES, Daniel BOUIX, Jacques Vaillant et Daniel VERKINDERE. « MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ». Édition Dunod, Paris, 2006
- [21] « Phénomène de bruit acoustique d'origine magnétique » Technique de l'ingénieur, D3581.
- [22] **G. Friedrich & M. Kant**. « Choice of drives for electrical vehicles a comparison between two permanent Magnet AC machines». IEE Proc. - Elec. Power Appl., vol. 145, no.3, May1998.
- [23] **D.FORDEAN et A.MIRAOUI** «Dimensionnement Rapides des Moteurs Synchrones à Aimants Permanents » Technique de l'ingénieur, D3554
- [24] **B. MULTON** « Les Machines Synchrones Autopilotées » ; Notes de Cours ; Ecole Normale Supérieure de Cachan, Antenne de Bretagne, 2004.
- [25] **N.SADOWSKI** « Modélisation des machines électriques à partir de la résolution des équation du champ en tenant compte du mouvement et du circuit d'alimentation (Logiciel EFCAD), thèse, ENSEEIHT, 1993 ».
- [26] **I. MARIF & H.ABDAT** « La commande en vitesse d'un véhicule électrique », mémoire de master, université Tlemcen 2019.
- [27] **F. Benchabane**, « Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering », Thèse de Magister, Université de Biskra, 2005.
- [28] **G. LACROUX**, " Les Aimants Permanents ", TEC et DOC, Lavoisier, 1989.
- [29] **Ph. LAMELOT, J. GUEZEL** « Les Aimants Permanents Rendent les Moteurs Economes » ; Technologie et Innovations, 2007.
- [30] « Aimants permanents - Matériaux et propriétés » Technique de l'ingénieur, D2100.
- [31] **H.DOĞAN** : «Méthodologie de conception des Moteurs Synchrones à Aimants Permanents. Application au Véhicule électrique avec chargeur rapide embarqué» ; thèse doctorat GRENOBLE 2013.
- [32] **H.Abdellaoui** « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variable électrique » mémoire de magister, université Mouloud Mammeri ; TIZI-OUZOU
- [33] Design Principles of Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles" publié dans la revue scientifique "IEEE Transactions on Industrial Electronics" par T. H. Kim et al. en 2011 (vol. 58, no. 1, pp. 189-200).
- [34] « Aimants permanents-Applications et perspectives » Technique de l'ingénieur, D2102

Bibliographique

- [35] **A.AMEUR** « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une MSAP Dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissants » mémoire de magister, université Batna 2005.
- [36] **R. LATEB**, « Modélisation Des Machines Asynchrones et Synchrones à Aimants Permanents Avec Prise en Compte des Harmoniques D'espace et de Temps : Application à la propulsion marine par POD », Thèse de doctorat de L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2006.
- [37] **A, F Jawad** « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents ». Thèse de Doctorat l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 05 décembre 2008.
- [38] **AZEDDINE.K** « Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents », Ph, Québec, Canada, 2000.
- [39] Design Principle of Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles" publié dans la revue scientifique "IEEE Transactions on Industrial Electronics" par T. H. Kim et al. en 2011 (vol. 58, no. 1, pp. 189-200).
- [40] **Ion Boldea And Lucian N. Tutelea** « Electric Machines Transients, Control Principles, Finite Element Analysis, and Optimal Design with MATLAB® » Second Edition published 2022.
- [41] **Ion Boldea, Lucian N. Tutela** « Electric Machines steady state and performance » second edition 2022.

الملخص

يمثل العمل المنجز في هذه الأطروحة بتصميم وتحليل آلة متزامنة مغناطيسية دائمة لسيارة كهربائية ، ويبرر اختيار هذه الآلة الاهتمام الذي تحمله في مجالات مثل الصناعة والروبوتات والميكانيكا الدقيقة.

تعتمد منهجية التحجيم على قيود لفهم متعمق للخصائص الحركية من أجل تصور هذه الدراسة باستخدام برنامج "تدفق محرك"

الكلمات الرئيسية: آلة متزامنة المغناطيس الدائم ، التحجيم ، تدفق محرك

Résumé

Le travail réalisé dans ce mémoire concerne la conception et analyse d'une machine synchrone à aimants permanents pour un véhicule électrique, le choix de cette machine se justifié par l'intérêt qu'elle porte dans les domaines tels que l'industrie, la robotique, et la mécanique de précision.

La méthodologie de dimensionnement fait d'après des contraintes pour la compréhension approfondie des caractéristiques du moteur afin de visualiser cette étude en utilise un logiciel « Altaire flux moteur ».

Mots clé : machine synchrone à aimants permanents, dimensionnement, Altaire flux moteur ».

Abstract

The work carried out in this thesis concerns the design and analysis of a synchronous machine with permanent magnets for an electric vehicle, the choice of this machine is justified by the interest it has in fields such as industry, robotics , and precision mechanics.

The sizing methodology is based on constraints for an in-depth understanding of the motor characteristics in order to visualize this study using "Altaire motor flux" software. Keywords : Mulberry, polyphenols, flavonoids, antibacterial activity.

Keywords: permanent magnet synchronous machine, sizing, Altaire motor flux".

