



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande Electrique

Présenté et soutenu par :
Nedjai Ahmed Hani –Maanane Mohamed Tadj Eddine

Le : jeudi 5 juin 2025

Modélisation de la machine à aimants permanents appliquée aux véhicules hybrides par la méthode des éléments finis

Jury :

Dr.	HAMMOUDI Yacine	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	ZOUZOU Salah Eddine	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	ALLOUI Lotfi	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024 – 2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande Electrique

Modélisation de la machine à aimants permanents appliquée aux véhicules hybrides par la méthode des éléments finis

Le : jeudi 5 juin 2025

Avis favorable de l'encadreur :

ZOUZOU Salah Eddine

Signature Avis favorable du Président du Jury
HAMMOUDI Yacine

Cachet et signature

Résumé

Ce mémoire vise à réaliser une analyse électromagnétique du moteur synchrone à aimants permanents utilisé dans la Toyota Prius 2010 et à comparer les résultats simulés du moteur avec les résultats réels. A l'aide de logiciel ANSYS Maxwell la modélisation de la machine étudiée a été réalisée par la méthode des éléments finis avec une étude paramétrique du moteur pour la détermination de l'influence de certains paramètres géométriques et électromagnétiques sur le couple de la machine.

Abstract

This memoir aims to carry out an electromagnetic analysis of the permanent magnet synchronous motor used in the Toyota Prius 2010 and to compare the simulated results of the motor with the real results. Using ANSYS Maxwell software, the modeling of the studied machine was carried out by the finite element method with a parametric study of the motor to determine the influence of certain geometric and electromagnetic parameters on the torque of the machine

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى إجراء تحليل كهرومغناطيسي للمحرك المتزامن المغناطيسي الدائم المستخدم في سيارة تويوتا بريوس 2010 ومقارنة النتائج المحاكية للمحرك بالنتائج الفعلية. باستخدام برنامج ANSYS Maxwell تم نمذجة للآلة المدروسة باستخدام طريقة العناصر المحدودة مع دراسة حساسية للمحرك لتحديد تأثير بعض الاعدادات الهندسية والكهرومغناطيسية على عزم دوران الآلة .

Remerciement

Toute la gratitude et le remerciement à ALLAH qui nous donne la force pour effectuer ce travail. Ainsi nous parents qui nous ont aidés.

Nous remercions en premièrement, notre encadreur le professeur émérite ZOUZOU SALAH EDDINE, pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux conseils pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité, sa patience et diligence et par ses suggestions a grandement facilité ce travail

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui nous ont Fait l'honneur d'examiner notre projet.

Enfin, Nous remercions toutes les personnes qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, et qui nous encouragée, et soutenue tout au long de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce travail,

**A nos très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour notre
réussite. Que dieu les protégé et les grades éternellement
heureux.**

AU père et grand-mère de binôme MAANANE TADJ EDDINE

**Allah yerhamhom qui ont été aimés voir leur fierté dans ces
yeux pour notre réussite dans nos études**

**A toutes la famille, NEDJAI et MAANANE, A tous nos amis et
nos collègues, et à tous ceux qui Nous ont aidés à réaliser ce
mémoire.**

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	I
CHAPITRE I : Généralités sur les véhicules hybrides.....	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 DÉFINITION D'UN VÉHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE.....	3
I.3 CLASSIFICATION DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES.....	3
I.3.I Classification des véhicules Par architecture :	4
(1) Architecture série :	4
(2) Architecture parallèle :	4
(3) Architecture mixte (série-parallèle) :	5
I.3.II Classification des véhicules par hybridation :	6
I.4 LA VEHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE DE TOYOTA PRIUS	7
I.4.I Toyota Prius première Génération (XW10) – 1997-2003	7
I.4.II Toyota Prius Deuxième Génération (XW20) – 2004-2009.....	8
I.4.III Toyota Prius Troisième Génération (XW30) – 2009-2016	9
I.4.IV Toyota Prius Quatrième Génération (XW50) – 2015-2022.....	10
I.4.V Toyota Prius Cinquième Génération (XW60) – 2023	11
I.5 VEHICULE RECHARGEABLE ET NON RECHARGEABLE	12
I.5.I Toyota Prius Hybride Non Rechargeable (HEV)	12
I.5.II Toyota Prius Hybride Rechargeable (PHEV).....	13
I.6 LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENT DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES HYBRIDE	13
I.6.I Les Avantages des véhicules électriques hybrides :	13
I.6.II Les inconvénients des véhicules électriques hybrides :	14
I.7 CONCLUSION	14
CHAPITRE II : La Toyota Prius 2010.....	
II.1 INTRODUCTION.....	15
II.2 LE SYSTEME DE TRANSMISSION DE TOYOTA PRIUS.....	15
II.3 CONFIGURATION DE LA CHAINE DE TRACTION DE LA PRIUS 2010.....	16
II.3.I Modes de fonctionnement d'un véhicule hybride Toyota Prius	17
II.4 LES COMPOSANTS ELECTRIQUE DANS LA PRIUS.....	18
II.4.I Batteries des Véhicules hybrides électriques.....	18

II.4.II	Batterie utilisée dans la Prius 2010	19
II.4.III	L'onduleur de traction dans la Toyota Prius 2010	20
II.4.IV	L'unité de contrôle de puissance (PCU)	21
II.4.V	Groupe motopropulseur hybride de la Toyota Prius 2010	24
II.5	MOTORISATION ELECTRIQUE DE LA TOYOTA PRIUS	25
II.6	CONCLUSION	26
CHAPITRE III : La Machine synchrone à aimants permanents.....		
III.1	INTRODUCTION.....	27
III.2	LA MACHINE SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS	27
III.3	PRINCIPE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINES « MSAP ».....	28
III.4	LES AIMANTS PERMANENTS	29
III.4.I	Types d'aimants permanents.....	30
III.5	DIFFERENTES STRUCTURES ROTORS	31
III.5.I	Aimants en surface	32
III.5.II	Aimant inséré	32
III.5.III	Aimant enterrés	33
III.5.IV	Aimant à concentration de flux	33
III.5.V	Aimants en V	34
III.6	LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENT DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS	34
III.6.I	Les avantages de la Machine synchrone à aimants permanents	34
III.6.II	Les inconvénients de la Machine synchrone à aimants permanents	34
III.7	CONCLUSION	35
CHAPITRE IV : Modélisation la Machine synchrone à aimants permanents		
IV.1	INTRODUCTION.....	36
IV.2	DIFFERENTS TYPES DE MODÉLISATION	36
IV.2.I	Les méthodes analytiques	36
IV.2.II	Les méthodes semi-numériques	36
IV.2.III	Les méthodes numériques.....	37
IV.3	La méthode des éléments finis	37
IV.4	PRÉSENTATION DU LOGICIEL ANSYS-MAXWELL	38
IV.5	ÉQUATIONS DE MAXWELL	38
IV.6	CONDITIONS AUX LIMITES	41
IV.7	PRÉSENTATION DE LA MACHINE ETUDIEE	42

IV.8	LES COMPOSANTS DE LA MACHINE MSAP	43
IV.8.I	Stator	43
IV.8.II	Type d'encoche statorique utilisée.....	43
IV.8.III	Bobinage	44
IV.8.IV	Rotor	46
IV.8.V	Type de pole.....	47
IV.8.VI	Les aimants	48
IV.8.VII	Matériau utilisée.....	48
IV.8.VIII	Le circuit électrique équivalent de la machine MSAP étudiée	49
IV.9	Le MAILLAGE.....	49
IV.10	RÉSOLUTION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS	50
IV.10.I	Machine sans alimentation.....	50
IV.10.II	Machine avec alimentation triphasée	53
IV.11	COMPARAISON DES RÉSULTAT	55
IV.12	ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	57
IV.13	CONCLUSION	61
CONCLUSION GÉNÉRALE		62
BIBLIOGRAPHIE.....		

LISTE DE FIGURE

Figure 1: Architecture série d'un VEH.....	4
Figure 2: Architecture Parallèle d'un VEH.....	4
Figure 3: Architecture mixte d'un VEH.....	5
Figure 4: Classification des différentes chaînes de traction hybride	6
Figure 5: Photo de la Toyota Prius I.....	7
Figure 6: Photo de la Toyota Prius II.....	8
Figure 7: Photo de la Toyota Prius III	9
Figure 8: Photo de la Toyota Prius IV	10
Figure 9: Photo de la Toyota Prius V	11
Figure 10: système de transmission hybride Toyota Prius 2010	15
Figure 11: Configuration de la chaine de traction de la Prius	16
Figure 12: Vue interne d'une batterie	18
Figure 13: Batterie Ni-MH de la Toyota Prius	19
Figure 14: Emplacement de la batterie dans la Toyota Prius 2010	20
Figure 15 : Schéma de l'onduleur pour le système de climatisation dans la Toyota Prius ..	21
Figure 16: L'unité de contrôle de puissance (PCU) dans la Toyota Prius 2010.....	21
Figure 17 : PCU séparé de la Toyota Prius 2010	22
Figure 18 Schéma électrique du PCU Prius 2010.....	22
Figure 19 : le convertisseur DC/DC utilisé dans la Toyota Prius 2010.....	23
Figure 20 : Schéma commande de système hybride Prius 2010.....	24
Figure 21 : Groupe motopropulseur de la Prius 2010.....	25
Figure 22: stator du moteur Toyota Prius 2010	27
Figure 23: rotor du moteur Toyota Prius 2010	28
Figure 24: Principe De Fonctionnement MSAP	29

Figure 25: Courbe de Désaimantation	30
Figure 26: les types d'aimants permanent utiliser	31
Figure 27: vue schématique des machines à flux radial à flux axial.....	31
Figure 28: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface	32
Figure 29: Machine synchrone à aimants permanents inséré.....	32
Figure 30: Machine synchrone à aimants permanents enterrés	33
Figure 31 : Machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux	33
Figure 32: Machine synchrone à aimants permanents en forme V.....	34
Figure 33: la géométrie de la machine.....	42
Figure 34: Structure d'encoches	43
Figure 35: Structure de stator.....	44
Figure 36: schéma de bobinage.....	45
Figure 37: Distribution de bobinage	46
Figure 38: Type de pole.....	47
Figure 39: Structure de stator.....	47
Figure 40: Structure d'aimants en V	48
Figure 41: courbe d'aimantation.....	48
Figure 42 : Le circuit électrique équivalent de la machine MSAP	49
Figure 43: Maillage De La Machine.....	49
Figure 44 : Potentiel vecteur magnétique A	50
Figure 45 : Induction magnétique B	51
Figure 46: le flux de l'enroulement statorique.....	51
Figure 47: allure des F.E.M	52
Figure 48: le couple réluctance.....	52
Figure 49: Le couple électromagnétique	53

Figure 50: Le couple électromagnétique en fonction de différentes tensions	53
Figure 51: allure de Tension de phase en phase avec les F.E.M	54
Figure 52: Résultats analytiques du modèle MSAP	55
Figure 53: a) longueur dans 35.8 mm, b) longueur dans 65.8 mm	57
Figure 54: l'influence de la longueur sur le couple	57
Figure 55: a) l'épaisseur dans 3.48 mm, b) l'épaisseur dans 9.48 mm.....	58
Figure 56: l'influence de l'épaisseur des aimants permanents sur le couple.....	58
Figure 57: a) largeur dans 25 mm, b) largeur dans 37 mm.....	59
Figure 58: l'influence de largeur des aimants permanents	59
Figure 59: a) diamètre extérieur de stator dans 254 mm, b) diamètre extérieur de stator dans 274 mm	60
Figure 60: l'influence de diamètre extérieur de stator	60

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1: les différents avantages et inconvénients de chaque Architecture	5
Tableau 2: La Fiche Technique de la Prius I.....	8
Tableau 3: La Fiche Technique de la Prius II.....	9
Tableau 4 : La Fiche Technique de la Prius	10
Tableau 5: La Fiche Technique de la Prius IV	11
Tableau 6: La fiche technique de la Toyota Prius V	12
Tableau 7: Comparaison entre HEV et PHEV	13
Tableau 8: comparaison des différents moteurs électriques	26
Tableau 9: Paramètres d'encoche	43
Tableau 10: Paramètres d'encoche.....	43
Tableau 11: Caractéristiques des bobines statorique	45
Tableau 12: Paramètres de rotor	46
Tableau 13: Paramètres de pole.....	47
Tableau 14: Paramètres de pole.....	48
Tableau 15: comparaison entre les résultats de simulation et les résultats réels	56

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le monde connaît actuellement des bouleversements majeurs, environnementaux ou de santé publique, dus à l'impact de l'activité humaine. En particulier, se pose le problème des émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique, l'industrie automobile s'oriente progressivement vers des solutions de mobilité plus durables. Parmi ces solutions, les véhicules hybrides se présentent comme un compromis efficace entre performance, économie d'énergie et respect de l'environnement élevée avec une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre à des prix de plus en plus abordables.

Ces véhicules combinent généralement un moteur thermique à un ou plusieurs moteurs électriques, L'un des composants clés des voitures électriques hybride (EHV) est le moteur électrique qui converti l'énergie électrique stockée dans la batterie en énergie mécanique pour propulser le véhicule, Les nouvelles technologies de moteurs électriques ont un impact majeur non seulement sur la qualité de conduite des voitures électriques, mais aussi sur leur autonomie et leur rapidité de recharge. Les voitures électriques hybrides utilisent de nombreux types de moteurs électriques, tels que les moteurs synchrones à aimants permanents.

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) représentent aujourd'hui une part importante du marché des véhicules hybrides en raison de leur bonne performance et leur compacité, son excellente caractéristique dynamique, ses faibles pertes ainsi que son important puissance et couple massique élevée, qui le rend le mieux adapté aux applications industrielles à entraînements électriques. L'essor considérable de ces machines a été possible grâce aux avancées technologiques dans le domaine des aimants permanents.

Les techniques de modélisation des dispositifs électromagnétiques en général et des machines électriques en particulier, par des méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles appliquées aux équations de Maxwell ont été mises en œuvre avec succès. Ces méthodes et en particulier la méthode des éléments finis qui est la plus répandue dans la littérature, elle a prouvé leur efficacité comme une méthode de résolution performante. Grace à ces performances et avantages, la méthode des éléments finis est le fondement de la majorité des logiciels de modélisation trouvent dans l'industrie.

L'objectif de cette étude est de modéliser le moteur synchrone à aimants permanent dédié au véhicule hybride Toyota Prius 2010 par la méthode des éléments finis sous logiciel ANSYS MAXWELL. Ce travail est réparti en quatre chapitres :

Dans **le premier chapitre**, on va présenter des généralités sur les véhicules électriques hybrides tels que la définition et la classification, avec la présentation de véhicule Toyota-Prius et leurs différentes générations.

Dans **le deuxième chapitre** nous avons étudié le système de transmission hybride de la Toyota Prius 2010 et exposé les différents composants électriques présents dans la chaîne de traction telle que la batterie, les convertisseurs et les moteurs.

Le troisième chapitre comprend des généralités sur la machine synchrone à aimants permanents, son principe de fonctionnement, ses différentes structures, ainsi que les types des aimants permanents à l'aide d'une courbe des aimants les plus utilisés pour les machines tournantes.

Le quatrième chapitre porte sur les principales méthodes de modalisation et les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques qui sont régis par les équations de Maxwell, en utilisant le logiciel Ansys Maxwell qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution électromagnétique. Ensuite, on a commencé par présenter notre machine la MSAP à aimants en V ainsi que les paramètres utilisés. À la fin de ce chapitre on a exposé les résultats de simulation avec une étude de sensibilité comme approche vers l'optimisation.

Enfin, nous tirons une conclusion générale résumant notre travail.

CHAPITRE I

I.1 INTRODUCTION

Le domaine de la traction électrique a suscité un vif intérêt ces dernières années. Les véhicules électriques hybrides (VEH) et les véhicules électriques (VE) ont rapidement gagné du terrain sur le marché automobile mondial en offrant une efficacité énergétique élevée avec une réduction significative des émissions à effet de serre à des prix de plus en plus abordables. De nombreux équipementiers automobiles travaillent actuellement sur de nouveaux modèles de véhicules VEH et VE. L'un de ses principaux défis consiste à concevoir des machines de traction répondant à des critères tels que l'efficacité énergétique, la fiabilité, la robustesse et le coût. Du point de vue des applications industrielles, les machines électriques les plus couramment utilisées dans ces véhicules sont les machines asynchrones, les machines synchrones à aimants permanents ainsi que les machines à réluctances variables [1].

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les véhicules hybrides tels que la définition et la classification des véhicules hybrides. Ensuite, on se concentrer sur la Toyota Prius et ses différentes générations.

I.2 DÉFINITION D'UN VÉHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE

Un véhicule électrique hybride est un véhicule intégrant deux sources d'énergies différentes, un moteur thermique (MT) conventionnel avec son réservoir de carburant et une machine électrique associée à une source d'énergie électrique DC. En 1898, LA LOHNER - PORSCHE dite « A chaise » est le premier véhicule électrique hybride son architecture de type série incluait un moteur à combustion entraînant une génératrice qui alimentait des moteurs électriques (ME) situés dans les moyeux des roues avant. Cette automobile pouvait parcourir près de 60 km sur batterie seule. Dans les années 1900, une automobile mixte pétrole/électricité, développée par le constructeur PIEPER, est commercialisée en Belgique. Un moteur électrique aidait le moteur à combustion de 3,5 CV dans les côtes et rechargeait les batteries dans les descentes [2] [3].

L'ère moderne de l'automobile hybride a commencé en 1997 avec la commercialisation de la TOYOTA PRIUS au Japon. Deux ans plus tard, Honda lance l'Insight suivie de près par la Honda Civic hybride. En une dizaine d'années, plus d'un million de véhicules hybrides ont été vendus dans le monde et plus de vingt nouveaux modèles ont été introduits sur le marché automobile [3].

I.3 CLASSIFICATION DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES

Les véhicules hybrides sont généralement classés selon deux catégories. La première dépend de l'architecture tandis que la seconde considère d'hybridation du véhicule.

I.3.I Classification des véhicules Par architecture :

La classification par architecture examine la disposition des composants de la chaîne de traction des véhicules électriques hybrides. Les trois grandes familles d'architectures série, parallèle et mixte (série-parallèle).

(1) Architecture série :

L'hybride série est l'architecture hybride la plus simple et la plus proche d'un véhicule 100% électrique. Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique est donc dimensionné pour pouvoir assurer seul la traction du véhicule il est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique. La transmission est donc électrique et constitue un avantage par rapport aux autres architectures car étant très flexible [4].

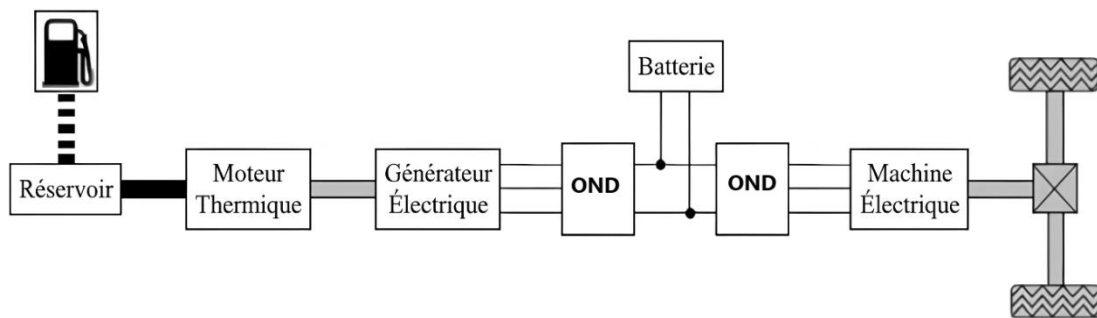


Figure 1: Architecture série d'un VEH [4]

(2) Architecture parallèle :

L'hybride parallèle est une évolution de l'architecture des véhicules conventionnels, les moteurs thermique et électrique sont tous les deux connectés directement à la transmission donc aux roues par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie. L'inconvénient est qu'il ne peut produire de l'électricité durant la conduite, en plus le moteur électrique fonctionne lors des conduites en ville et le moteur thermique lors des plus fortes demandes en puissance soit sur la route. Le nom parallèle vient du fait que le courant est parallèle [5].

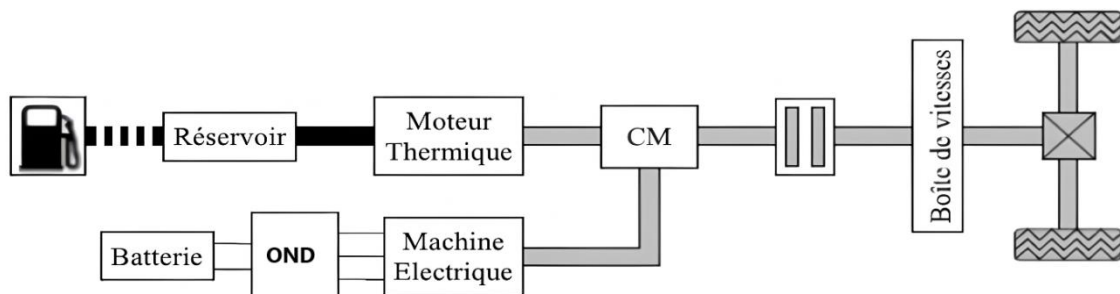


Figure 2: Architecture Parallèle d'un VEH [5]

(3) Architecture mixte (série-parallèle) :

La chaîne de traction hybride série-parallèle à la possibilité de combiner les avantages des hybrides séries et parallèles, un fonctionnement série en basse vitesse et parallèle pour les puissances élevées. Dans cette structure, on fait intervenir les composants de la structure parallèle et ceux de la structure série dont les principaux sont : un moteur thermique, une génératrice et un moteur électrique. Un organe mécanique, le train planétaire, permet le couplage des puissances mécaniques des machines électriques et thermiques, La figure 3 donne la structure de base des véhicules hybrides série-parallèle, la TOYOTA PRIUS utilise cette structure [6].

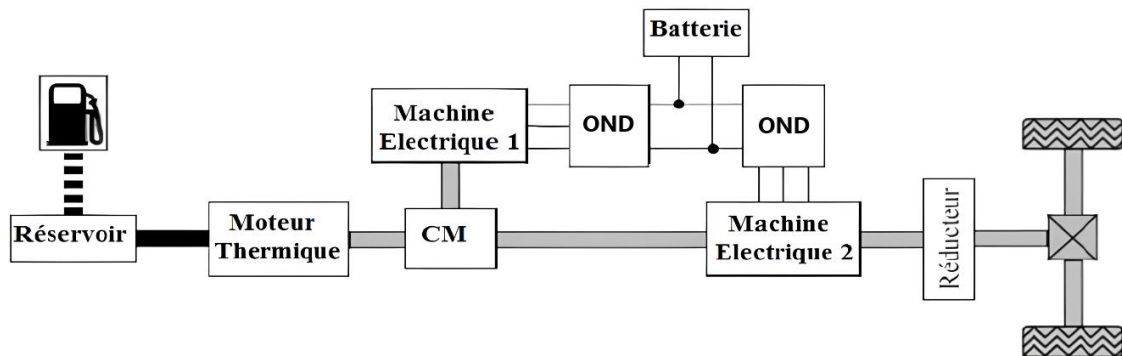


Figure 3: Architecture mixte d'un VEH [6]

Le tableau 1 donne les différents avantages et inconvénients de chaque Architecture :

TYPE D'HYBRIDE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Série	♦ Bon rendement énergétique en mode tout électrique en zone urbaine ♦ Très bon contrôle du moteur thermique	♦ Faible rendement énergétique de la chaîne globale en zone extra-urbaine ♦ Mode tout thermique impossible
Parallèle	♦ Bon rendement énergétique ♦ Modes tout électrique et tous thermiques possibles	♦ Fonctionnement du moteur thermique pas toujours optimal ♦ Couplage mécanique et implantation des composants complexes
Mixte	♦ Bon rendement énergétique ♦ Tous les modes sont possibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle) ♦ Très bonne répartition de l'énergie	♦ Gestion très délicate ♦ Couplage mécanique et implantation des composants très complexes ♦ Utilisation de trois machines ♦ Coût élevé

Tableau 1: les différents avantages et inconvénients de chaque Architecture

I.3.II Classification des véhicules par hybridation :

La classification par hybridation est considérée comme un critère important dans les véhicules électriques hybrides en fonction du ratio (exprimé en %) entre la capacité de puissance disponible à partir de la seconde source d'énergie (par rapport à la puissance totale disponible embarquée dans le véhicule. Quatre catégories sont à considérer : le "MICRO-HYBRIDE", le "MILD-HYBRIDE", le "FULL-HYBRIDE" et le "PLUG-IN HYBRIDE" [7].

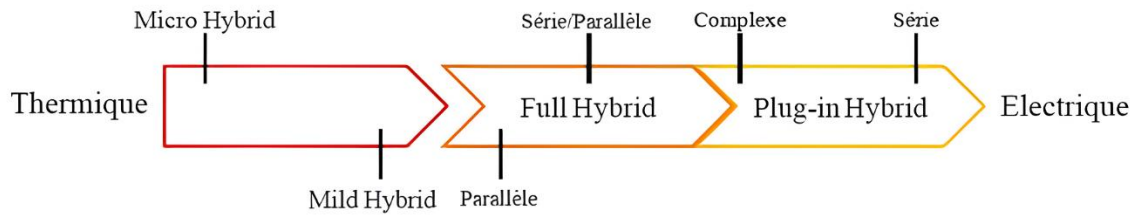


Figure 4: Classification des différentes chaînes de traction hybride [7]

- Pour un véhicule hybride parallèle (thermique/électrique), le taux d'hybridation est :

$$TH = \frac{\text{puissance électrique}}{\text{puissance thermique} + \text{puissance électrique}} \quad (\text{I.1})$$

- Pour un véhicule hybride série le taux d'hybridation est :

$$TH = \frac{\text{puissance générateur}}{\text{puissance du moteur électrique de traction}} \quad (\text{I.2})$$

- Pour un véhicule hybride série-parallèle le taux d'hybridation est le produit du taux d'hybridation parallèle par le taux d'hybridation série.

I.4 LA VEHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE DE TOYOTA PRIUS

Toyota Prius est un véhicule hybride qui associe un moteur à essence et un moteur électrique. Lancée pour la première fois en octobre 1997 au Japon, elle a été l'une des premières voitures hybrides à rencontrer un succès commercial mondial. Reconnue pour son efficacité énergétique, sa faible consommation de carburant et son impact environnemental réduit, la Prius présente une innovation majeure avec la possibilité de recharger sa batterie automatiquement pendant la conduite, éliminant ainsi le besoin de la brancher à une source d'alimentation externe. La Prius est équipée du système de propulsion novateur appelé HYBRID SYNERGY Drive, qui combine l'efficacité du moteur électrique pour réduire la consommation d'énergie du moteur à essence. Ce système optimise l'utilisation des deux moteurs en fonction des besoins de conduite, ce qui permet de réduire les émissions de CO₂.

La Toyota Prius a connu plusieurs évolutions à travers différentes générations. Chaque génération a apporté des améliorations en termes d'efficacité énergétique, de design et de technologies hybrides. Voici un aperçu des différentes générations de ce modèle [8].

I.4.I Toyota Prius première Génération (XW10) – 1997-2003

La Prius de première génération a été lancée en octobre 1997 en tant que première voiture de tourisme hybride produite en série au monde. Au moment de son lancement, la Prius de première génération affichait un rendement énergétique de 28,0 km/l dans le cycle d'essai japonais 10-15.

La figure 5 et le tableau 2 représentent une photo et la fiche technique de la Toyota Prius I.



Figure 5: Photo de la Toyota Prius I [8]

Caractéristique	Détail
Moteur	Moteur thermique à essence 1,5 L (16 soupapes, 4 cylindres)
Puissance totale	54 kW / 72 ch (moteur thermique) + 33 kW / 44 ch (moteur électrique)
Vitesse maximale	Environ 170 km/h
Couple maximal	200 Nm
Système hybride	Moteur hybride parallèle
Batterie	Nickel-métal-hydrure (NI MH)
Économie de carburant	Environ 41 MPG (miles par gallon)
Autonomie électrique	Très faible, principalement une fonction d'assistance au moteur thermique
Transmission	Transmission à variation continue (CVT)
Poids	Environ 1 150 kg
Technologie	Système de récupération d'énergie au freinage

Tableau 2: La Fiche Technique de la Prius I

I.4.II Toyota Prius Deuxième Génération (XW20) – 2004-2009

La deuxième génération de la Prius a connu une transformation remarquable, passant d'une voiture compacte à une voiture de taille moyenne offrant plus d'espace intérieur et un design plus moderne, tout en conservant une excellente économie de carburant. Cette évolution a également permis d'améliorer le système hybride précédent de Toyota et d'optimiser la batterie nickel-métal-hydrure, rendant ainsi le système plus efficace.

La figure 6 et le tableau 3 représentent une photo et la fiche technique de la Toyota Prius II.



Figure 6: Photo de la Toyota Prius II [8]

Caractéristique	Détail
Moteur	1.5 L (16 soupapes, 4 cylindres) + moteur électrique
Puissance totale	56 kW / 76 ch (moteur thermique) + 50 kW / 68 ch (moteur électrique)
Vitesse maximale	180 km/h
Couple maximal	400 Nm
Système hybride	Toyota Hybrid Synergy Drive
Batterie	Nickel-métal-hydrure (NI MH)
Économie de carburant	Environ 46 MPG (miles par gallon)
Autonomie électrique	Limitée à de faibles vitesses
Transmission	Transmission à variation continue (CVT)
Poids	Environ 1 350 kg
Technologie	Système de gestion thermique amélioré

Tableau 3: La Fiche Technique de la Prius II**I.4.III Toyota Prius Troisième Génération (XW30) – 2009-2016**

La Toyota Prius de troisième génération a présentait une carrosserie légèrement plus large que ses prédécesseurs Cette évolution a permis d'élever encore plus la technologie hybride, un nouveau moteur hybride quatre cylindres de 1,8 litre a contribué à une puissance totale de 134 chevaux, pour une consommation de 51 MPG en ville et de 48 MPG sur route , une meilleur batterie lithium-ion sur certains modèles, et une version plus performante avec des technologies de sécurité avancées, comme le régulateur de vitesse adaptatif et l'alerte de sortie de voie. Cette génération de Prius a été la première à proposer en option une version hybride rechargeable. Elle a été lancée en 2012 et offrait une autonomie de 11 miles en mode tout électrique, pour une autonomie totale de 540 miles.

La figure 7 et le tableau 4 représentent une photo et la fiche technique de la Toyota Prius III.

**Figure 7:** Photo de la Toyota Prius III [8]

Caractéristique	Détail
Moteur	Moteur thermique 1,8 L (16 soupapes, 4 cylindres) + moteur électrique
Puissance totale	72 kW / 98 ch (moteur thermique) + 60 kW / 80 ch (moteur électrique)
Vitesse maximale	80 km/h
Couple maximal	205 Nm
Système hybride	Toyota Hybrid Synergy Drive
Batterie	Lithium-ion
Économie de carburant	Environ 51 MPG (miles par gallon)
Autonomie électrique	Très faible, fonctionne principalement en mode hybride
Transmission	Transmission à variation continue (CVT)
Poids	Environ 1 390 kg
Technologie	Système de répartition de puissance avec transmission à variation continue

Tableau 4 :La Fiche Technique de la Prius**I.4.IV Toyota Prius Quatrième Génération (XW50) – 2015-2022**

La quatrième génération de la Prius présente une efficacité énergétique supérieure à ses prédécesseurs, tout en arborant un design plus dynamique. En 2016, elle a été agrandie pour offrir plus d'espace de chargement. Grâce à une nouvelle plateforme, la maniabilité et la conduite ont été améliorées. Bien que la puissance du moteur d'origine ait légèrement diminué, les économies de carburant sont estimées à 54 MPG en ville et 50 MPG sur route, grâce à l'utilisation de composants hybrides plus légers. Une version Eco a été introduite pour une efficacité accrue. En 2018, la Prius Eco affichait une consommation combinée en ville et sur route de 56 MPG, elle a été classée comme la deuxième voiture essence la plus économe en carburant sans possibilité de branchement aux États-Unis. Les améliorations notables concernent les batteries, les moteurs électriques et les moteurs à essence.

La figure 8 et le tableau 5 représentent une photo et la fiche technique de la Toyota Prius IV.

**Figure 8:** Photo de la Toyota Prius IV [8]

Caractéristique	Détail
Moteur	Moteur thermique 1,8 L (16 soupapes, 4 cylindres) + moteur électrique
Puissance totale	72 kW / 98 ch (moteur thermique) + 53 kW / 72 ch (moteur électrique)
Vitesse maximale	180 km/h
Couple maximal	142 Nm
Énergie	Hybride rechargeable
Système hybride	Toyota Hybrid Synergy Drive
Batterie	Lithium-ion
Économie de carburant	Environ 51 MPG (miles par gallon)
Autonomie électrique	Faible, mode hybride principalement
Transmission	Transmission à variation continue (CVT)
Poids	Environ 1 380 kg
Technologie	Détection des piétons

Tableau 5: La Fiche Technique de la Prius IV

I.4.V Toyota Prius Cinquième Génération (XW60) – 2023

La dernière génération de la Prius Toyota adopté une approche radicale lors de la refonte de la voiture en 2023, une version hybride plus puissante ainsi Le rendement énergétique reste un point fort avec Une caractéristique notable est la possibilité d'un moteur entièrement électrique sur certaines versions. Comparée aux générations précédentes la Prius a vu des changements significatifs elle est devenue beaucoup plus élégante et plus sportive. Les modèles à traction avant offrent maintenant une puissance de 194 chevaux, tandis que les versions à transmission intégrale disposent de 196 chevaux grâce à un moteur électrique à aimant permanent installé sur l'essieu arrière.

La figure 9 et le tableau 6 représentent une photo et la fiche technique de la Toyota Prius V.



Figure 9: Photo de la Toyota Prius V [8]

Caractéristique	Détail
Moteur	2.0L essence (16 soupapes, 4 cylindres) + moteur électrique
Puissance totale	112 kW / 152 ch (moteur thermique) + 120 kW / 163 ch (moteur électrique)
Vitesse maximale	180 km/h
Couple maximal	188 Nm (moteur thermique) + 208 Nm (moteur électrique)
Énergie	Hybride rechargeable
Système hybride	Toyota Hybrid Synergy Drive
Batterie	Lithium-ion
Économie de carburant	Environ 57 MPG (miles par gallon)
Autonomie électrique	Jusqu'à 90 km en 100% électrique
Transmission	Transmission à variation continue (CVT)
Poids	1 450 kg (HEV) / 1 600 kg (PHEV)
Technologie	Recharge solaire permettant de gagner jusqu'à 8 km d'autonomie par jour grâce à des panneaux photovoltaïques sur le toit

Tableau 6: La fiche technique de la Toyota Prius V

I.5 VEHICULE RECHARGEABLE ET NON RECHARGEABLE

La Toyota Prius se décline en deux versions principales à la fois rechargeable et non rechargeable dépendant sur l'utilisation du véhicule, Chaque version répond à des besoins différents selon le mode de vie, les habitudes de déplacement et l'accès à des infrastructures de recharge.

I.5.I Toyota Prius Hybride Non Rechargeable (HEV)

La Toyota Prius hybride non rechargeable, également connue sous le nom de Prius (HEV) est un véhicule innovant qui associe un moteur à essence et un moteur électrique pour maximiser son efficacité énergétique. Contrairement aux véhicules rechargeables, sa batterie se recharge automatiquement grâce à la récupération d'énergie au freinage et à l'action du moteur thermique sans avoir besoin d'être branchée sur une prise électrique. Ce fonctionnement ingénieux garantit une conduite souple et économe, sans dépendre de stations de recharge externes, La Prius hybride non rechargeable représente une solution pratique et fiable pour les trajets quotidiens en combinant performances et respect de l'environnement.

I.5.II Toyota Prius Hybride Rechargeable (PHEV)

La technologie hybride rechargeable est apparue quelques années après l'hybride, La Toyota Prius hybride rechargeable, également connue sous le nom de Prius Prime (PHEV) dans certains marchés, est une version du véhicule hybride de Toyota équipée d'une batterie de capacité supérieure qui peut être rechargée via une source électrique externe (prise domestique ou borne de recharge). Ce système permet au véhicule de fonctionner en mode 100 % électrique sur une distance allant de 40 à 90 km selon les conditions, avant que le moteur thermique n'intervienne pour compléter l'effort.

Pour avoir un résumé sur les caractéristiques des deux, nous représentons un tableau comparatif entre la Toyota Prius Hybride Non Rechargeable (HEV) et la Toyota Prius Hybride Rechargeable (PHEV).

Caractéristique	Hybride Non Rechargeable (HEV)	Hybride Rechargeable (PHEV)
Recharge externe	Non nécessaire - recharge automatique via freinage et moteur thermique	Oui nécessaire la batterie se recharge via une prise domestique ou une borne de recharge
Capacité de la batterie	Faible	Plus élevée
Autonomie électrique	Très limitée (quelques kilomètres)	Significative (environ 40 à 90 km en mode 100 % électrique)
Mode de fonctionnement	Hybride continu (moteur thermique + assistance électrique)	Possibilité de rouler en 100 % électrique ou en hybride
Économie & Émissions	Excellente économie sur longs trajets, émissions réduites	Economie Idéale pour trajets courts, encore moins d'émissions
Coût	Généralement moins coûteuse	plus élevée en raison de la batterie plus performante

Tableau 7: Comparaison entre HEV et PHEV

I.6 LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENT DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES HYBRIDE

I.6.I Les Avantages des véhicules électriques hybrides :

- Des impacts environnementaux très faibles durant tout leur cycle de vie.
- Récupération d'énergie cinétique.
- Durée de vie supérieure.
- Les voitures hybrides sont réputées pour leur fonctionnement silencieux
- Ce type de moteur permet de réaliser une économie d'essence en utilisant de l'énergie électrique sous forme de batteries ou de piles.

I.6.II Les inconvénients des véhicules électriques hybrides :

- Cout d'achat élevé.
- Capacité limitée de la batterie.
- Performances légèrement réduites à haute vitesse.
- Maintenance complexe.
- Le poids additionnel des batteries rend les voitures hybrides généralement plus lourdes.

I.7 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons présenté la définition du véhicule électrique hybride et les trois grandes familles d'architectures que l'on peut rencontrer : série, parallèle et mixte. Nous avons ensuite basé sur la Toyota Prius et ses différentes générations ainsi que les deux versions principales rechargeable et non rechargeable, les avantages et les inconvénients des véhicules électriques hybrides.

CHAPITRE II

II.1 INTRODUCTION

La Toyota Prius 2010 est équipée du système Hybrid Synergy Drive. Ce système repose sur une transmission à variation continue électronique (e-CVT) et un train épicycloïdal, également appelé Power Split Device (dispositif de répartition de puissance). Grâce à ses améliorations technologiques la Toyota Prius 2010 a permis de réaliser des avancées significatives en matière d'efficacité énergétique, de performances et de gestion thermique.

Dans ce chapitre nous allons explorer l'architecture de transmission hybride dans Toyota Prius en détaillant le fonctionnement de chaque partie du moteur de traction utilisé dans un véhicule électrique hybride. De plus, nous allons présenter les différents éléments composant la chaîne de traction hybride.

II.2 LE SYSTEME DE TRANSMISSION DE TOYOTA PRIUS

Les véhicules électriques hybrides (HEV) combinent des groupes motopropulseurs à moteur à combustion interne conventionnels avec une propulsion par moteur électrique. Dans la Toyota Prius 2010, deux machines synchrones à aimants permanents sont utilisées pour améliorer le rendement énergétique. Un moteur électrique principal de traction pour entraîner directement le véhicule (MG2) un moteur de démarreur-générateur (MG1), un moteur thermique (ICE), et un réducteur planétaire à répartition de puissance entre le moteur et l'arbre de sortie de la transmission pour permettre différentes configurations de flux d'énergie et optimiser l'efficacité énergétique du véhicule.

Ce système de répartition de puissance est une transmission hybride à répartition d'entrée, qui utilise des dispositifs de répartition de puissance, c'est-à-dire des trains planétaires, du côté entrée de la transmission qui relie le moteur thermique et le moteur électrique. Le train planétaire divise la puissance du moteur en différents rapports de puissance mécanique et électrique et permet d'obtenir une vitesse et un couple de sortie de transmission variables. Ce système a été appliquées à d'autres modèles et marques telles que Ford V-MAX Hybrid, Lincoln MKZ Hybrid, Lexus RX450h, Lexus LS600h, Toyota Camry Hybrid etc [9].

La figure 10 montre un schéma de principe du système de transmission hybride Toyota.

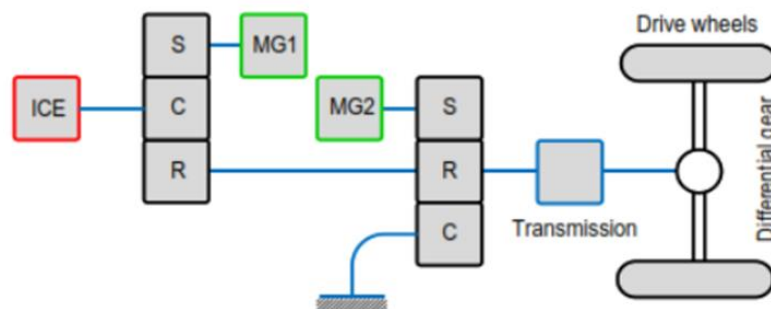


Figure 10: système de transmission hybride Toyota Prius 2010 [9]

S: Sun gear transmission
C: Carrier
R: Ring
ICE: Moteur à combustion interne
MG1: Démarreur moteur, générateur
MG2: Moteur de traction

II.3 CONFIGURATION DE LA CHAÎNE DE TRACTION DE LA PRIUS 2010

La chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride (VEH) est le système qui fournit la puissance nécessaire pour propulser le véhicule. Elle se compose généralement de plusieurs composants clés, notamment une batterie, un moteur thermique, un moteur électrique, un onduleur, un réducteur de vitesse.

La chaîne de traction de la Toyota Prius 2010 repose sur une architecture hybrid série-parallèle intégrant un moteur thermique (ICE) et les moteurs-générateurs électriques (MG1) qui joue un rôle de générateur pour recharger la batterie et générer de l'électricité lorsque le moteur thermique est en marche, et le moteur-générateur électrique principal (MG2) responsable de la traction du véhicule et de la récupération d'énergie lors du freinage. (MG1) et (MG2) sont tous deux alimentés par des onduleurs triphasés distincts qui partagent la même liaison à courant continu (cc).

Le principe de la chaîne de traction électrique du Toyota Prius illustré dans la figure suivante :

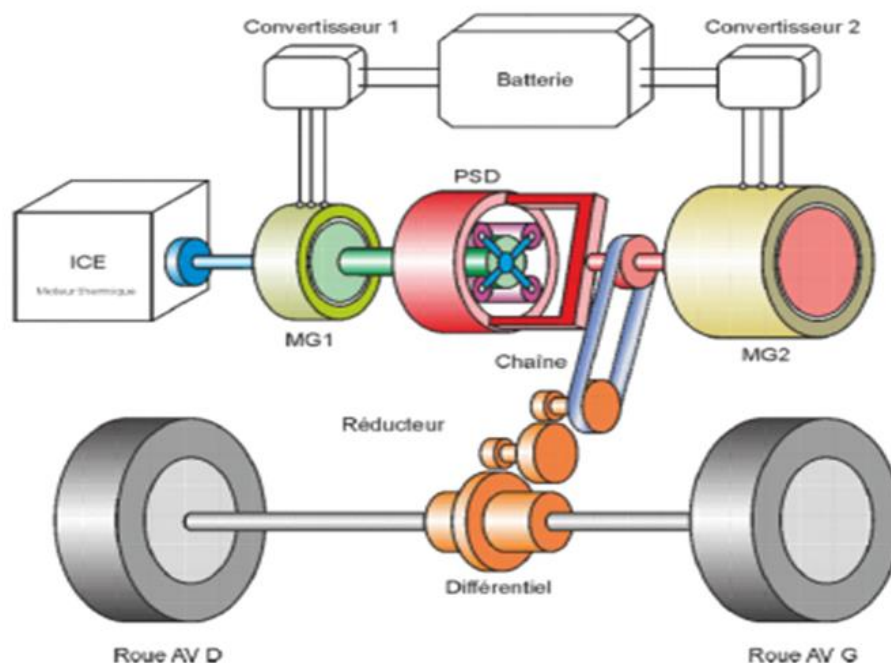


Figure 11: Configuration de la chaîne de traction de la Prius [9]

Ce système est centré autour du Power Split Device (PSD), un train épicycloïdal qui permet de gérer dynamiquement la répartition de l'énergie entre le moteur thermique ICE, le moteur-générateur MG1, le moteur-générateur MG2. Lors du démarrage à faible vitesse, seul MG2 entraîne les roues en utilisant l'énergie stockée dans la batterie, permettant une conduite silencieuse et sans émissions. Lorsque l'accélération augmente, le moteur thermique démarre et fonctionne en parallèle avec MG2, fournissant ainsi un surplus de puissance. Le moteur-générateur MG1, quant à lui, joue un rôle clé dans la gestion du régime du moteur thermique et la recharge de la batterie. À vitesse élevée, MG2 assiste le moteur thermique pour assurer la propulsion et fournissant un couple plus important aux roues avant, tandis que MG1 ajuste sa vitesse pour optimiser le rendement énergétique. Cette dernière est gérée par des convertisseurs qui régulent l'alimentation des moteurs électriques. Lors du freinage ou de la décélération, MG2 agit comme un générateur et convertit l'énergie cinétique en électricité, qui est stockée dans la batterie pour une utilisation ultérieure. Le réducteur et le différentiel jouent également un rôle crucial en adaptant la vitesse de rotation et permettant une répartition optimale du couple entre les roues avant [10].

Grâce à cette conception la Toyota Prius 2010 maximise l'efficacité énergétique et réduit la consommation de carburant tout en assurant une transition fluide entre les différentes sources d'énergie.

II.3.I Modes de fonctionnement d'un véhicule hybride Toyota Prius

En jouant sur les vitesses de rotation de ces trois organes (ICE, MG1, MG2) la voiture peut rouler selon plusieurs modes. La Prius 2010 utilise quatre modes de fonctionnement principaux, selon la demande de puissance et l'état de charge de la batterie. Ces fonctionnalités participent à la réduction de la consommation du carburant et à la récupération d'énergie électrique. Nous présentons dans ce paragraphe les différents Modes de fonctionnement de la Prius [11] :

- **Mode 100 % électrique (EV Mode) :** Le véhicule peut fonctionner uniquement avec le moteur électrique, MG2 propulse la voiture sans utiliser le moteur thermique grâce à l'énergie de la batterie. Ce mode est utilisé à faible vitesse (environ 30 à 50 km/h).
- **Mode hybride (mixte thermique-électrique) :** le moteur thermique fournit une partie de la puissance, MG2 complète si besoin pour améliorer la réactivité du véhicule. MG1 peut alors produire ou consommer de l'électricité pour équilibrer le régime du moteur thermique.
- **Mode thermique seul :** À haute vitesse ou lorsque la batterie est faible, le moteur thermique prend le relais pour fournir la puissance principale.
- **Mode récupération d'énergie (freinage régénératif) :** Lors des phases de décélération ou de freinage, MG2 fonctionne en générateur transformant l'énergie cinétique en électricité et recharge la batterie.

II.4 LES COMPOSANTS ELECTRIQUE DANS LA PRIUS

Il est important de comprendre les composants techniques clés qui composent des véhicules et équipements électriques pour assurer leur fonctionnement optimal et garantir la sécurité des utilisateurs.

Le système de propulsion hybride de Toyota se compose de six éléments principaux : Le moteur à essence, le moteur électrique, le générateur électrique, l'unité de contrôle de la puissance et un dispositif de répartition de la puissance qui utilise un train planétaire. Voici un aperçu des principaux composants techniques sur la chaîne de traction hybride

II.4.I Batteries des Véhicules hybrides électriques.

Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. Dans les véhicules électriques et hybrides, la batterie joue un rôle crucial en stockant l'énergie électrique qui alimente le moteur.

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [12].

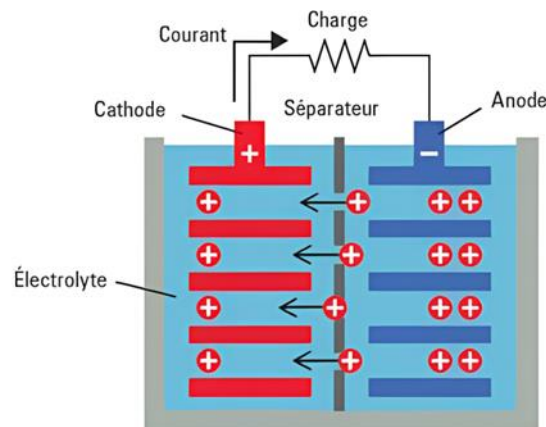


Figure 12: Vue interne d'une batterie [12]

Les critères de choix des différents types de batteries utilisées dans la traction électrique sont généralement les suivants :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.

- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement
- Entretien faible et recyclage facile.

Parmi ces différents critères types de batteries peuvent être adaptés pour une utilisation sur des véhicules électriques hybrides :

- A. La batterie Plomb (Pb) utilisée sur la C15 électrique.
- B. La batterie nickel cadmium (Ni Cd) utilisée sur Saxo électriques.
- C. La batterie Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride : Ni-MH) utilisée sur la Toyota Prius 2010.
- D. La batterie Lithium-ion (Li-ion) est montée sur Honda Accord Hybride.

II.4.II Batterie utilisée dans la Prius 2010

La Toyota Prius est équipée d'une batterie haute tension en nickel-métal-hydrure (Ni MH), qui joue un rôle crucial dans le fonctionnement du système hybride. Sa fonction principale est de stocker l'énergie récupérée lors du freinage régénératif et de fournir l'électricité nécessaire au moteur électrique. Cette batterie HV possède des caractéristiques une capacité de 1,31 kWh avec une puissance nominale de 36 ch (26,8 kW), la masse totale : 49 kg.

Le bloc de la batterie HV se compose de 28 modules de batterie connectés en série pour produire environ 201,6 V, Chaque module comprend 6 cellules individuelles de 1,2 V et 6,5 Ah, donc en total la batterie contient 168 cellules Ni-MH.

La nouvelle Prius peut rouler en seul mode électrique (EV) deux kilomètres -au mieux. Avec 2 kW supplémentaires malgré une taille réduite. Le système de refroidissement de la batterie a été amélioré, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la puissance nominale de la batterie par rapport à son prédécesseur. La batterie Ni-MH de la Prius est conçue pour offrir une longue durée de vie et une résistance élevée aux cycles de charge et de décharge fréquents. Elle est réputée pour sa fiabilité et sa durabilité[12].



Figure 13: Batterie Ni-MH de la Toyota Prius [12]

La batterie utilisée par le système hybride de la Prius 2010 située sous la banquette arrière comme montée sur la figure 14, ce qui permet d'optimiser l'espace intérieur du véhicule tout en assurant une bonne répartition du poids.



Figure 14: Emplacement de la batterie dans la Toyota Prius 2010 [12]

II.4.III L'onduleur de traction dans la Toyota Prius 2010

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur électrique, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le moteur de traction un dispositif de conversion appelé onduleur (DC/AC), qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

Deux grandes familles de transistors sont utilisées aujourd'hui pour l'électronique de puissance des véhicules : MOSFET et IGBT. Les onduleurs (DC/AC) constitués découpent un signal continu pour le rendre alternatif à des fréquences entre 5 et 20 kHz dans l'automobile. Ce découpage est généralement réalisé par une méthode de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), [24].

Les onduleurs du Toyota Prius sont à base de IGBT pour effectuer la conversion entre le courant continu et le courant alternatif avec une fréquence de découpage de 16 kHz et une tension batterie d'environ 201.6V, et une puissance de 21 kW [13].

L'onduleur également utilisés pour contrôler l'alimentation électrique du moteur-générateur électrique dans la chaîne de traction :

- **Alimentation des moteurs électriques :**

Lors d'une **accélération**, les onduleurs convertissent courant continu (DC) de la batterie haute tension en courant alternatif (AC) pour les alimenter les moteurs électriques MG1 et MG2 qui aide à faire avancer le véhicule.

- **Freinage régénératif :**

Lors d'un freinage L'onduleur convertit le courant alternatif (AC) produit par MG2 en courant continu (DC) pour recharger la batterie haute tension.

Grâce au développement technologique des semi-conducteurs, et l'apparition des nouvelles techniques de commandes, les onduleurs sont devenus plus performants offrant à la fois puissance et efficacité.

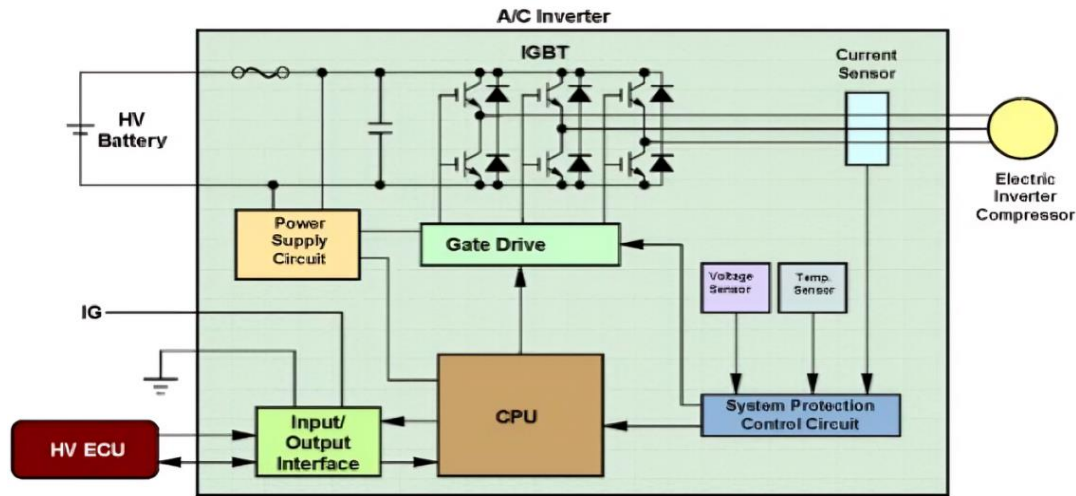


Figure 15 : Schéma de l'onduleur pour le système de climatisation dans la Toyota Prius [13]

Les onduleurs de la Prius 2010 sont intégrés dans l'unité de contrôle de puissance (PCU - Power Control Unit) ce que nous allons présenter dans la partie suivante.

II.4.IV L'unité de contrôle de puissance (PCU)

La Toyota Prius 2010 est équipée d'une Unité de Contrôle de Puissance (PCU), un élément crucial du système hybride Toyota. Sa compacité est notable, pesant seulement 13 kg et occupant un volume de 16,2 L, ce qui reflète une réduction de masse par rapport aux modèles précédents tout en préservant une densité de puissance importante.

Le PCU de la Prius III fonctionne avec un convertisseur DC-DC bidirectionnel, un convertisseur pour moteur et un autre pour la génératrice. Leurs positions générales sont représentées dans la figure suivante [14].

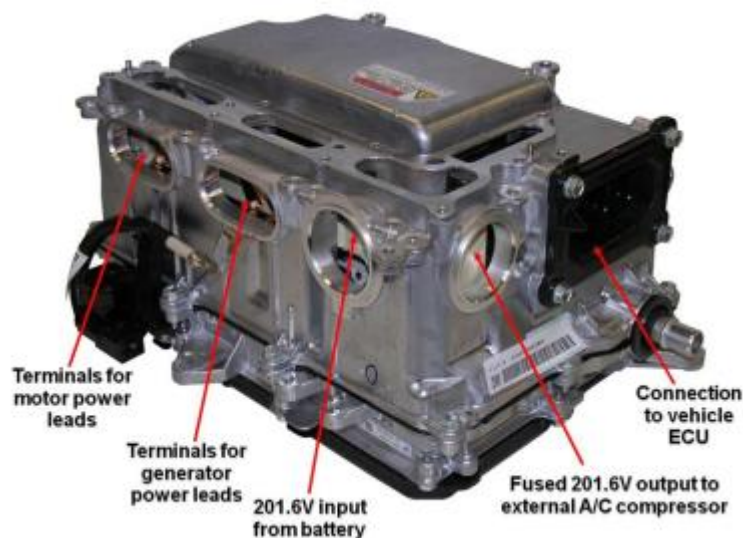


Figure 16: L'unité de contrôle de puissance (PCU) dans la Toyota Prius 2010 [14]

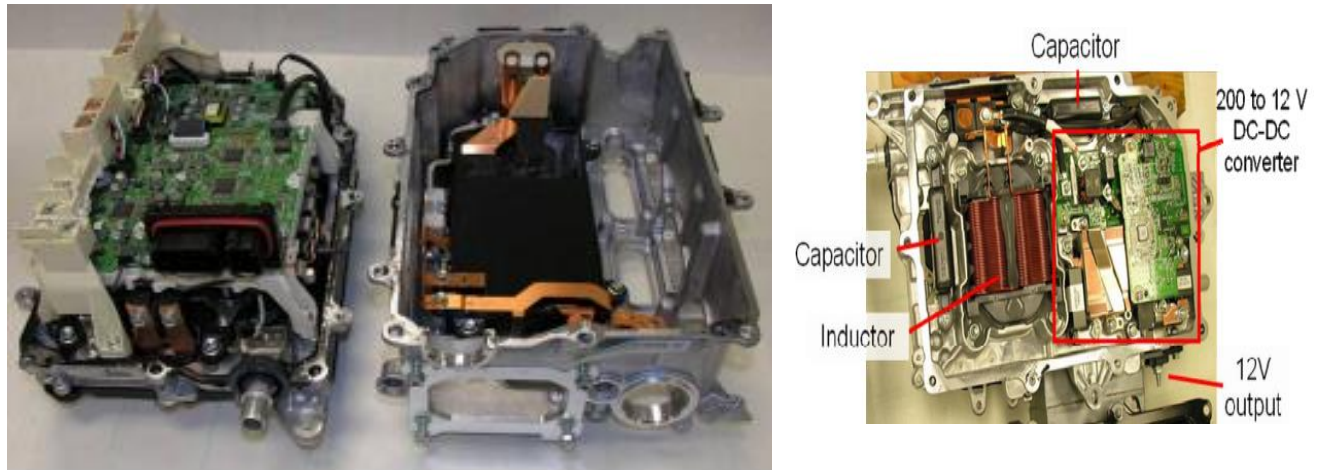


Figure 17 : PCU séparé de la Toyota Prius 2010 [14]

L'unité de Contrôle de Puissance (PCU) assure la conversion et la distribution de l'énergie entre le moteur électrique et le générateur. Le schéma électrique est présenté dans la figure 18, c'est un système complexe qui joue un rôle crucial dans la gestion de l'énergie électrique du véhicule, optimisant ainsi sa performance hybride.

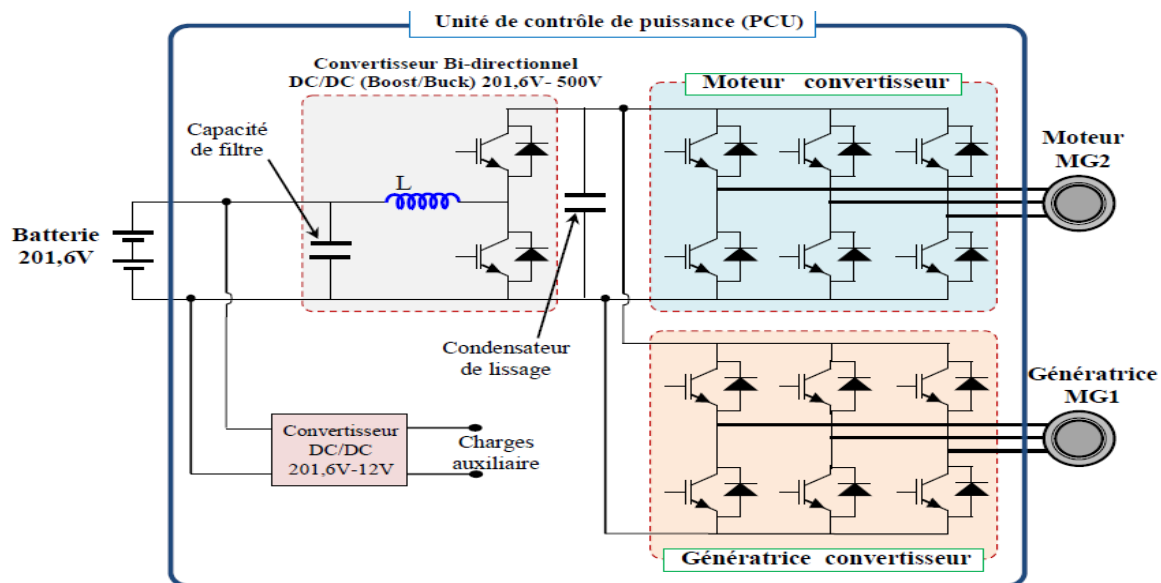


Figure 18 Schéma électrique du PCU Prius 2010 [14]

Une batterie de 201,6 Vcc alimente le PCU, qui est connecté au côté basse tension (BT) du convertisseur élévateur. Un condensateur de 470 V, 315 μF est connecté à l'entrée avec un inducteur de 225,6 μH entre la batterie et le module PE du convertisseur élévateur. Une petite résistance de 53,8 k Ω est en parallèle avec un condensateur de 860 V, 0,562 μF , qui est intégré dans le module de condensateur principal.

De plus, des modules de condensateurs de filtrage séparés de 900 V, 0,8 μF et 950 V, 0,562 μF (situés dans la partie inférieure du PCU) et un condensateur de lissage de 750 V, 888 μF font partie de cette configuration parallèle qui est connectée au côté HT du convertisseur

élévateur. Le convertisseur DC/DC est un hacheur Buck/Boost IPM (Intelligent Power Module) à base d'un IGBT. L'ECU de contrôle HV commande les IGBTs, qui contrôlent le courant dans l'inductance. Le convertisseur Boost augmente le courant continu haute tension évaluée à 201,6 V à une tension de courant continu approximative de 650V. L'onduleur convertit la tension qui a été augmentée par le convertisseur Boost en courant alternatif, qui est utilisé pour piloter le MG1 / MG2. Lorsque le MG1 / MG2 fonctionne comme un générateur, le courant alternatif d'environ 650V du MG1 / MG2 est converti en courant continu par l'onduleur, puis le convertisseur Buck fait chuter cette tension à une tension de courant continu de dans l'ordre de 201,6 V pour charger la batterie HV. L'ECU de commande HV utilise un capteur de tension intégré au convertisseur élévateur pour détecter la haute tension (VL) avant qu'elle ne soit amplifiée. En outre, il utilise un capteur de tension intégré à l'onduleur pour détecter la haute tension (VH) après son augmentation. Contrôler le fonctionnement du convertisseur élévateur.

Bien qu'une autre puissance supplémentaire de 12 V soit utilisée pour faire fonctionner des accessoires tels que le réseau auxiliaire, l'onduleur de traction, le chargeur des batteries et des équipements de communication [15] [16].

La tension de fonctionnement réelle est normalement comprise entre 13 V et 14 V, car il s'agit de la tension nominale de la batterie lorsqu'elle est chargée par l'alternateur du véhicule. Un convertisseur DC/DC à base des transistors MOSFET est utilisé pour convertir une tension de 201.6V DC en 12V DC avec une bonne efficacité et une sortie de 150W à 12VDC.

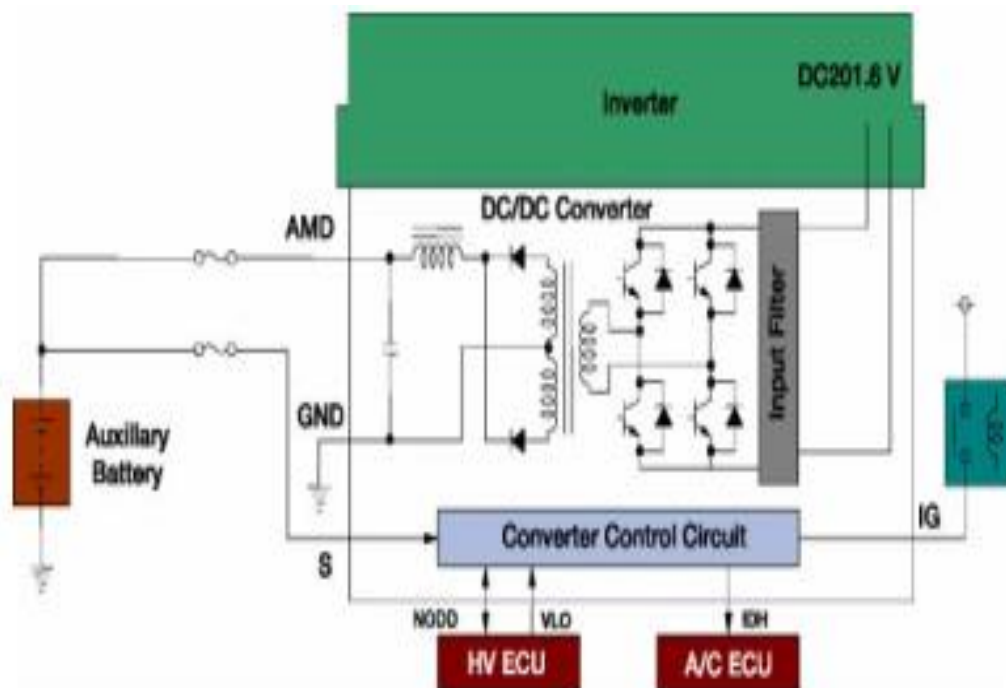


Figure 19 : le convertisseur DC/DC utilisé dans la Toyota Prius 2010 [15]

Le système de commande hybride de la Toyota Prius 2010, qui montre comment tous les différents composants interagissent entre eux pour assurer le fonctionnement efficace du système hybride est représenté dans la figure suivante :

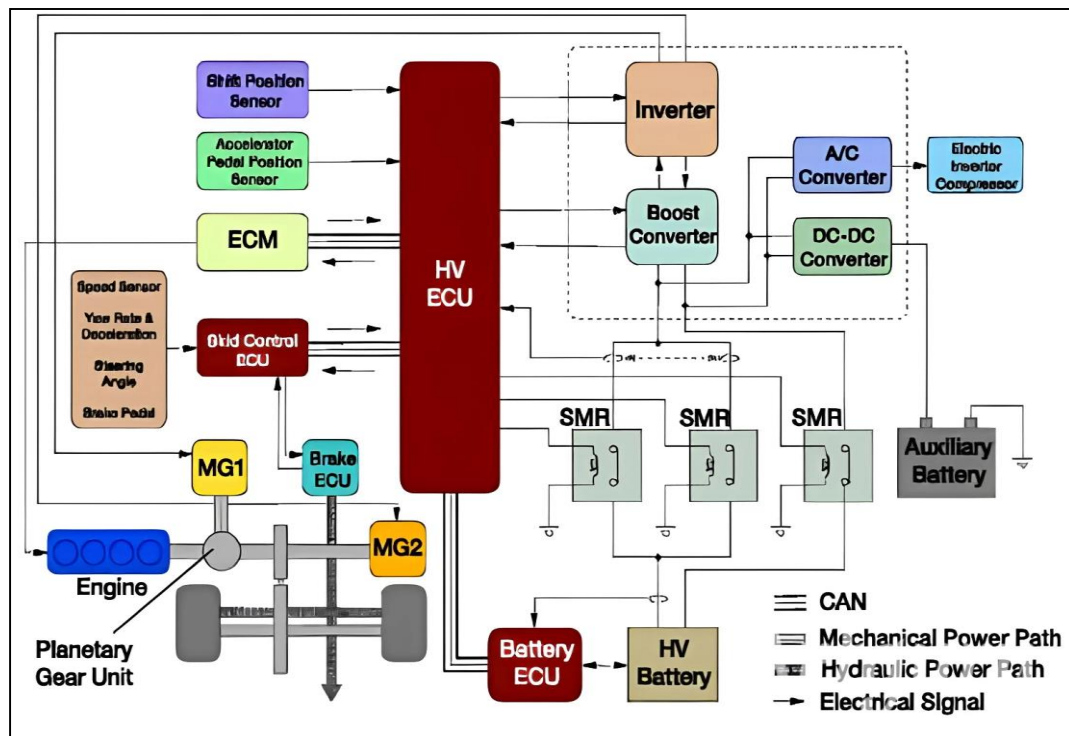


Figure 20 : Schéma commande de système hybride Prius 2010 [16]

Le calculateur HV (HV ECU) agit comme le cerveau du système hybride, recevant des données de capteurs tels que le capteur de position de la pédale d'accélérateur, le capteur de changement de vitesse, ainsi les informations des différents calculateurs (ECM, ECU de batterie, ECU de contrôle des patins). Le système hybride de la Toyota Prius 2010 comprend aussi un ensemble d'onduleur-convertisseur contenant un onduleur (qui convertit le courant continu en courant alternatif pour alimenter les moteurs électriques), un convertisseur élévateur de tension (augmentant la tension de la batterie HV), un convertisseur DC-DC (fournissant du 12 V pour les composants classiques du véhicule), et un convertisseur pour le compresseur A/C électrique comme expliqué précédemment.

II.4.V Groupe motopropulseur hybride de la Toyota Prius 2010

La Toyota Prius 2010 utilise un groupe motopropulseur hybride avancé qui associe un moteur à combustion interne (ICE) et des moteurs électriques (MG1, MG2). On constate une amélioration de 22 % des performances, tout en optimisant la consommation de carburant d'environ 10 % ainsi qu'une remarquable efficacité énergétique comparée aux modèles précédents.

La figure 21 ci dessous représente une photo du groupe motopropulseur hybride pour la Toyota Prius 2010 :

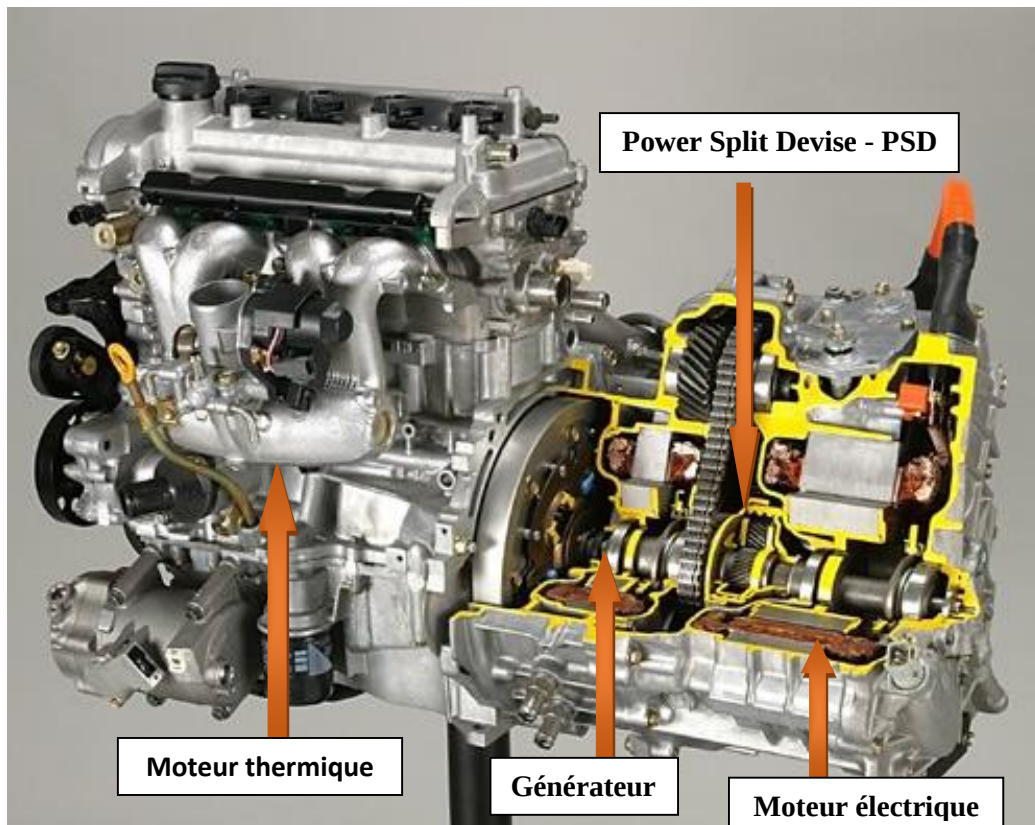


Figure 21 : Groupe motopropulseur de la Prius 2010 [12]

Un nouveau moteur thermique de 1,8 litre Positionné à gauche, à droite de l'image Deux machines électriques MSAP sont intégrées, MG1 qui agit comme générateur et démarreur du moteur thermique, et le moteur MG2 qui fournit la traction électrique et récupère l'énergie lors du freinage régénératif. La puissance combinée des moteurs électriques est de 98.5 KW tandis que Le moteur à essence produit une puissance maximale de 72 KW et un couple maximal de 142 Nm à 4 000 tr/min ainsi un réducteur permettant de faire varier la puissance du moteur en fonction des besoins. Le Système de transmission planétaire (Power Split Devise - PSD) situé au cœur de la section hybride, C'est un train épicycloïdal qui permet de gérer intelligemment la répartition d'énergie entre les moteurs thermiques et électriques.

II.5 MOTORISATION ELECTRIQUE DE LA TOYOTA PRIUS

Les machines électriques sont des transformateurs d'énergie bidirectionnels. Elles transforment l'énergie électrique en énergie mécanique rotationnelle et, réciproquement, l'énergie mécanique en énergie électrique, Le choix des machines électriques de traction pour les systèmes de propulsion hybride est une étape très importante. Les principales caractéristiques sont le rendement, la fiabilité et le coût.

Donc les critères guidant le choix des systèmes de propulsion électrique pour les VEH dépend principalement de trois facteurs [18] :

- 1- Le cycle de conduite.
- 2- Les contraintes du véhicule.
- 3- La source d'énergie.

D'un point de vue industriel, les principaux types de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques hybrides :

- A- Machine à réluctance variable
- B- Machines Asynchrones
- C- Machines Synchrones à Aimants Permanents

Le tableau ci-dessous résume bien, de manière qualitative les critères principaux des types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques :

(+) : avantage, (0) : neutre, (-) : désavantage

Critères	MRV	MAS	MSAP
Rapport puissance/poids	++	+	++
Possibilité de vitesse élevée	+	+/-	+/-
Couple	++	-	++
contrôlabilité	+	+	+
maintenance	+	+	0
Coût du moteur	-	+	-
rendement	90 à 94 %	85 à 90 %	90 à 95 %

Tableau 8: comparaison des différents moteurs électriques

Le véhicule électrique hybride TOYOTA PRIUS 2010 utilise la machine Synchrones à Aimants Permanent comme un moteur électrique.

Dans le chapitre prochain, notre attention se Portera spécifiquement sur cette dernière catégorie la machine Synchrones à Aimants Permanent.

II.6 CONCLUSION

Ce chapitre s'intéresse sur le modèle de véhicule électrique hybride TOYOTA PRIUS 2010. Nous avons exposé le système de transmission hybride qu'elle utilise, en suite Nous avons expliqué système de la chaîne de traction et démontré les différents composants électriques présents dans la chaîne de traction de la Prius 2010.

CHAPITRE III

III.1 INTRODUCTION

Actuellement, l'industrie automobile s'investit massivement dans les véhicules hybrides et électriques. Elle cherche notamment à améliorer le rendement et la fiabilité. Les moteurs à aimants permanents répondent à ces besoins, ils sont les moteurs les plus communs au sein des véhicules hybrides et électriques actuels.

Le MSAP est un actionneur électromécanique, son rotor tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator, c'est-à-dire à la même vitesse que ce champ.

Les machines à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor. C'est grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents plus précisément à l'aide des terres rares, au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaire. Ces machines deviennent de plus attractifs car ils répondent aux exigences des nouvelles technologies notamment dans le secteur des véhicules Hybrid comme la Toyota Prius en raison de ses excellentes caractéristiques dynamique, ses faibles pertes ainsi que son couple de grande qualité.

Dans ce chapitre nous présenterons principalement les généralités sur la machine synchrone à aimants permanents, leur principe de fonctionnement et les différentes structures utilisées.

III.2 LA MACHINE SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS

Le terme machine synchrone comprend toutes les machines dans lesquelles la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Le champ magnétique tournant est généré par un aimant permanent ce qui permet au rotor de tourner à la vitesse de synchronisme.

Les moteurs à aimants permanents peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement associés à des variateurs de vitesse électroniques.

La MSAP est composée des éléments suivants :

- **Stator** (induit) : Il est la partie fixe de la machine. Il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps. Les bobinages sont logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [19].



Figure 22: stator du moteur Toyota Prius 2010 [19]

- **Rotor** (inducteur) : Il est la partie mobile de la machine. Il se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la source du courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique, ceux à pôles lisses et ceux à pôles saillants [20].



Figure 23: rotor du moteur Toyota Prius 2010 [20]

La Machine synchrone à aimants permanents est la solution la plus adaptée pour les véhicules hybrides grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité et aussi ses valeurs élevées des rapports couple et puissance ainsi que leur bon rendement [21].

III.3 PRINCIPE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINES « MSAP »

La machine synchrone à aimant permanent comprend principalement deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre : l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit une force électromotrice ces deux parties sont séparées par un entrefer [22]

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions alternatif La superposition des trois flux magnétiques crée par les trois bobines du stator produit un flux magnétique alternatif tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi un couple électromagnétique. La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la fréquence de la source de tension [23].

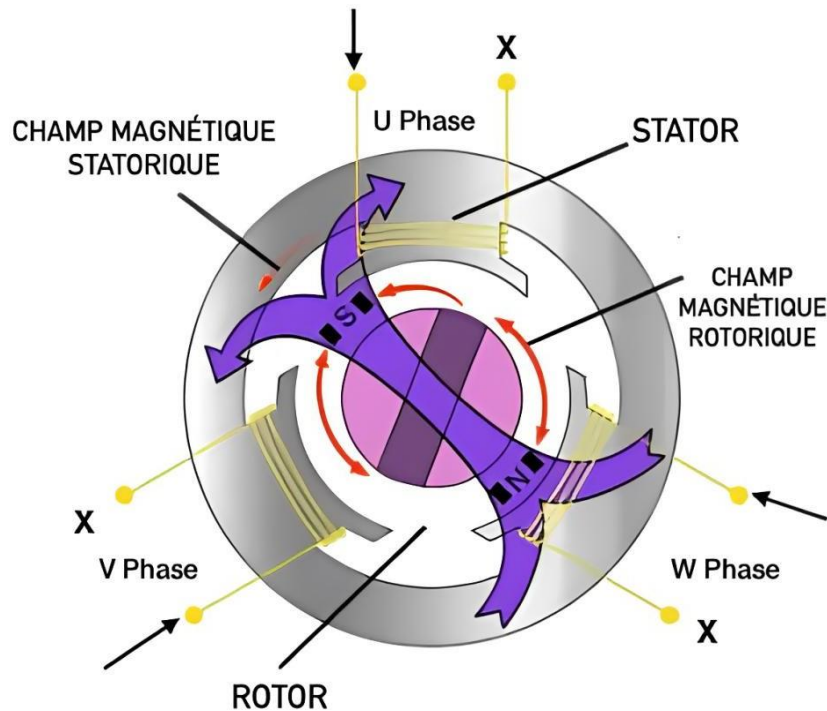


Figure 24: Principe De Fonctionnement MSAP [23]

III.4 LES AIMANTS PERMANENTS

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique dur, qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieur. De nos jours, la majorité des véhicules électriques qui se trouvent sur le marché utilisent des moteurs synchrones à aimants permanent en néodyme fer bore NDFEB ou en samarium-cobalt SMC_o. Ces moteurs sont connus pour leur forte puissance massique, leur couple important ainsi que leur fiabilité.

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles larges d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation dans le deuxième quadrant du plan (B-H). Le choix des aimants permanents est un élément clé dans la conception des machines à aimants permanents cela est dû au fait que les propriétés des aimants affectent directement les performances de ces machines.

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants :

- Performance de la machine.
- Poids de la machine.
- Dimension de la machine.
- Rendement de la machine.
- Facteur économique.

Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants pour les applications industrielles. Ces paramètres sont [24] :

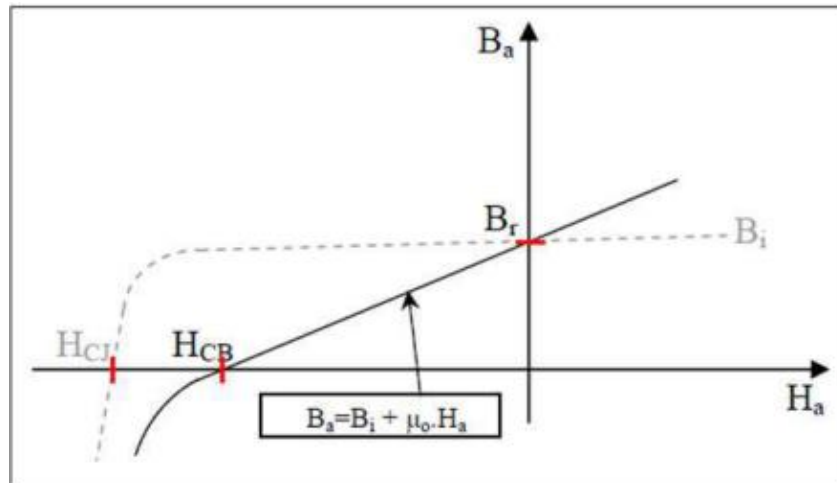


Figure 25: Courbe de Désaimantation [24]

L'induction rémanente (B_r), c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé, ce qui signifie une induction de la puissance potentielle de l'aimant.

Le champ coercitif (H_{cb}), caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.

Le produit d'énergie $(B \times H)_{\max}$: valeur énergétique de l'aimant qui caractérise la qualité du matériau.

En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée.

III.4.I Types d'aimants permanents

Les aimants les plus utilisés dans la machine synchrone à aimant permanent peuvent être classés en trois grandes familles à savoir [25] :

Les aimants métalliques : Il existe plusieurs types d'aimants métalliques ; les plus intéressants pour être utilisés dans les machines électriques sont ceux du type alliages (ALNICO) à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane, Ces alliages durs et fragiles sont caractérisés par leurs faible champs coercitif et leurs induction rémanentes relativement élevée, mais le plus grave inconvénient est qu'en cours de fonctionnement, ils nécessitent généralement une réalimentation.

Les ferrites ou céramique : Les ferrites sont des composés qui contiennent de l'oxyde de fer, du baryum et du strontium. Ils sont réalisés par le processus de frittage. Ces aimants possèdent des performances modestes, mais se sont tout de même imposés dans de très nombreuses applications, en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée ce qui favorise leurs utilisations dans des machines électriques à faible puissance, De plus les ferrites supportent bien la chaleur mais sont moins résistantes au froid.

Les aimants terres-rares : Les terres rares sont les meilleurs matériaux pour aimants performants Comme le samarium-cobalt (SMCO) et le fer-néodyme-bore (NDFEB), et sont caractérisés par un large cycle d'hystérésis ainsi qu'une densité énergétique élevée. Avec un champ coercitif supérieur à celui des ferrites, actuellement ces matériaux sont les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones.

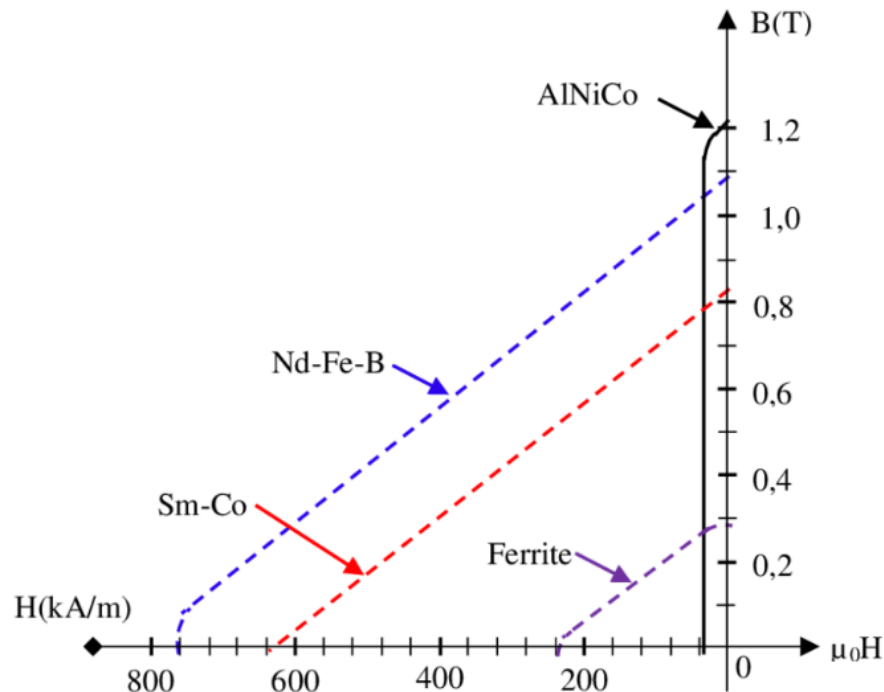


Figure 26: les types d'aimants permanent utiliser [25]

III.5 DIFFERENTES STRUCTURES ROTORS

Les structures des machines synchrones à aimant permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial, à flux axial, et à flux transverse

Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial à flux axial est donnée par la figure suivante :

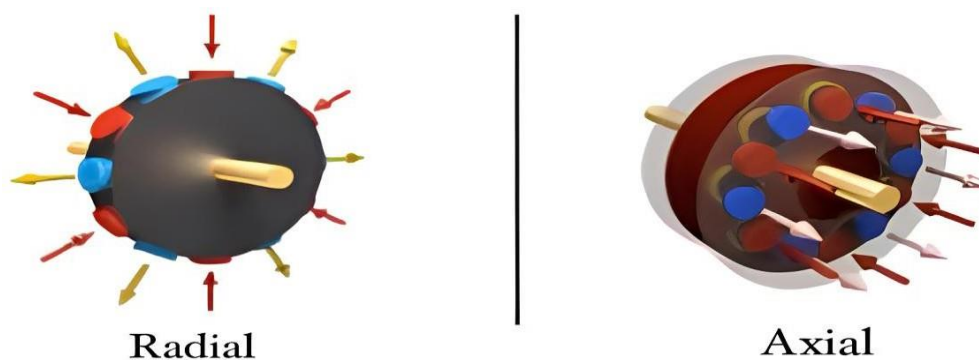


Figure 27: vue schématique des machines à flux radial à flux axial [23]

Les machines à aimants à champ radial sont préférées pour les applications nécessitant de fortes puissances et une vitesse lente en raison de leur facilité de construction. Nous présentons les structures des rotors à aimantation radiale :

III.5.I Aimants en surface

Dans ce type de machine, les aimants sont placés de manière radiale sur la surface du rotor. L'avantage principal de cette structure est sa simplicité de fabrication, qui entraîne des coûts de production relativement bas par rapport à d'autres machines à aimants.

Il présente des inconvénients, notamment l'exposition des aimants permanents aux champs de démagnétisation et la possibilité que les aimants se détachent du rotor en raison des forces centrifuges. Parfois un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé pour réduire la réaction de l'induit, réduire les forces centrifuges et protéger les aimants permanents contre la démagnétisation. Il peut également fonctionner comme amortisseur et fournir un couple de démarrage asynchrone. La réactance synchrone des axes d et q est presque identique pour les aimants de type terres rares [26].

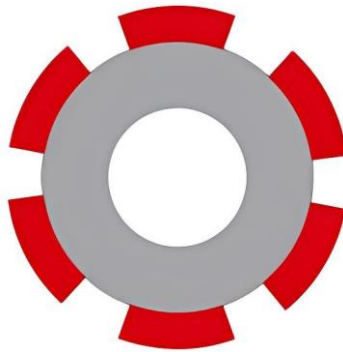


Figure 28: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface [26]

III.5.II Aimant inséré

Dans cette structure, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer pour créer une saillance et donne un couple réductant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe-q est légèrement supérieure à celle dans l'axe-d [27].

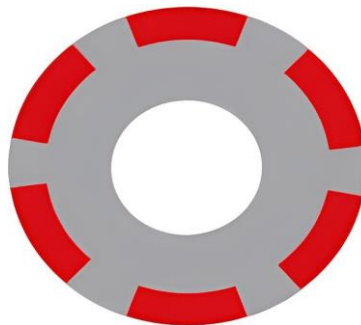


Figure 29: Machine synchrone à aimants permanents insérés [27]

III.5.III Aimant enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe- d est plus petite que celle de l'axe- q . Les aimants bénéficient d'une protection accrue contre les forces centrifuges et une réduction du risque de détachement, ce qui les rend recommandés pour les applications à grandes vitesses.

Les MSAP enterrés sont célèbres pour leurs performances élevées, leur rendement optimal et leur adaptabilité à un large éventail d'applications, telles que la traction électrique, l'industrie automobile [28].

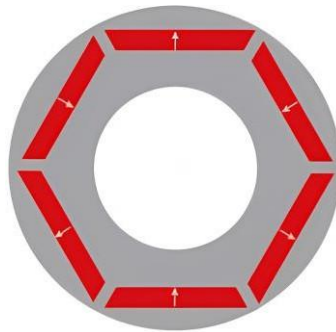


Figure 30: Machine synchrone à aimants permanents enterrés [28]

III.5.IV Aimant à concentration de flux

Les aimants dans cette configuration sont orientés dans le sens de la circonférence. Grâce à la concentration du flux produite par les aimants permanents, les pôles magnétiques se forment au niveau des parties ferromagnétiques du rotor. Cette configuration a un avantage important par rapport à d'autres parce qu'elle permet de concentrer le flux ce qui rend l'induction dans l'entrefer supérieur à celle de l'aimant [29].

Cette structure similaire aux autres, assure également une bonne protection contre les désaimantations et les contraintes mécaniques. En conséquence, cette méthode offre une solution pour maximiser la concentration du flux magnétique en favorisant une induction accrue dans l'entrefer tout en assurant la protection et la pérennité des aimants permanents.

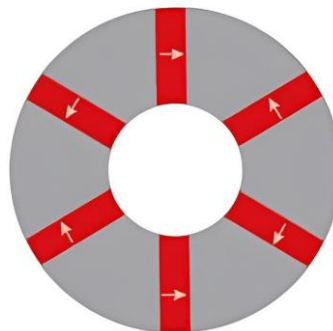


Figure 31 : Machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux [29]

III.5.V Aimants en V

Dans ce type de structure les aimants permanents sont disposés à une forme en V sur la surface du rotor. Cela permet à maximiser l'interaction entre le champ magnétique du rotor et celui du stator. L'architecture en V peut améliorer le flux magnétique, ce qui est bénéfique pour le couple généré par le moteur et fonctionner de manière plus efficace, surtout à des vitesses élevées. La structure en V des aimants a été utilisée dans la TOYOTA PRIUS 2010.

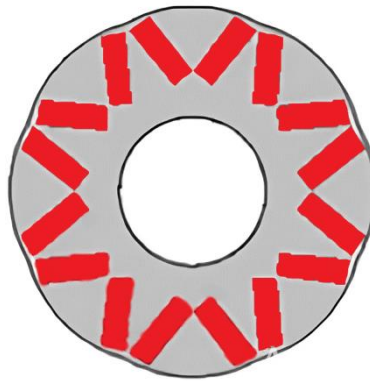


Figure 32: Machine synchrone à aimants permanents en forme V

III.6 LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENT DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

III.6.I Les avantages de la Machine synchrone à aimants permanents

- Un couple massique élevé.
- Un bon rendement et forte puissance.
- Une meilleure performance dynamique.
- Absence de contacts glissants.
- Fonctionnement en survitesse et Un bon comportement aux accélérations et aux freinages.

III.6.II Les inconvénients de la Machine synchrone à aimants permanents

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par réaction d'induit.
- La Difficulté de dé fluxage.
- Une électronique de commande assez compliquée (nécessité d'un capteur de Position).

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous présenterons d'une manière globale la machine synchrone à aimants permanents, sa construction fondamentale et le principe de fonctionnement en premier lieu ainsi les différentes structures rotoriques. Par la suite, on a exposé les caractéristiques des aimants permanents et les différents types utilisés pour les machines tournantes, puis nous avons montré les avantages et les inconvénients de la MSAP.

CHAPITRE IV

IV.1 INTRODUCTION

La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce à l'utilisation des dispositifs électromagnétiques. Bien que les méthodes analytiques et semi-numérique ou les méthodes numériques comme la méthode des éléments finis qui permette de résoudre une grande variété de problèmes, ces méthodes numériques permettent en effet de décrire de manière de plus en plus précise le fonctionnement de ces dispositifs ou interviennent des phénomènes complexes comme les courants induits, les mouvements ou l'interaction avec le circuit électrique extérieur.

La machine synchrone à aimants permanents est décrite par plusieurs équations fondamentales régissant le fonctionnement de celle-ci, notamment les équations de Maxwell qui sont la base de tout phénomène magnétique au sein d'une machine électrique.

Les logiciels évoluent aujourd'hui dans le sens d'une meilleure intégration au sein du processus de conception des dispositifs électromagnétiques sont ceux des travaux significatifs sur l'utilisation des méthodes d'optimisation par simulation numérique. Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme ANSYS-MAXWELL, Flux2D, FEMM...etc.

IV.2 DIFFERENTS TYPES DE MODÉLISATION

Il existe trois grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques sont connues à l'avance. Ces méthodes sont [30], [31] :

IV.2.I Les méthodes analytiques

Ce type de modèle est basé sur la résolution formelle des équations de Maxwell dans les régions à faible perméabilité. Les méthodes analytiques permettent de réduire le temps de calcul par rapport aux méthodes numériques. Elles ne peuvent cependant être appliquées qu'à des géométries relativement simples. Parmi les méthodes analytiques utilisées pour le calcul du champ électrique on trouve la méthode de séparation des variables. L'inconvénient majeur de ce type de modèle est la non-prise en compte de la saturation magnétique et l'inadaptabilité aux géométries complexes, dans ce cas seul les méthodes numériques peuvent être utilisées.

IV.2.II Les méthodes semi-numériques

Les méthodes les plus utilisées dans ce cas sont la méthode des réseaux de réluctances. Elles sont basées sur la discrétisation de la machine électrique en éléments traversés par des tubes de flux. Plus le nombre de réluctances est élevé, plus le modèle sera précis au détriment du temps d'exécution. Mais cela fait augmenter le temps de calcul. L'avantage de ce type de modèle est qu'il permet de prendre en compte la complexité de la géométrie, du mouvement et de la saturation.

IV.2.III Les méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent de modéliser les géométries les plus simples comme les plus complexes, qu'elles soient bi ou tridimensionnelles de manière générique. Parmi ces méthodes, nous citons La méthode des différences finies, La méthode des éléments finis...etc. Les méthodes numériques permettent également de tenir compte des phénomènes physiques non-linéaires comme la saturation des matériaux ferromagnétiques, et des anisotropies des milieux constituant le domaine d'étude (dispositifs à modéliser). De plus, elles sont reconnues pour être très précises. Lors de l'utilisation des méthodes numériques, le temps de calcul est lié directement au système à modéliser en fonction de la géométrie. Parmi les méthodes numériques nous présentent la méthode des éléments finis

IV.3 La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est la méthode la plus adaptée aux problèmes d'électromagnétisme rencontrés en génie électrique pour résoudre d'une manière efficace, elle consiste à trouver numériquement une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (EDP) de MAXWELL en subdivisant le domaine d'étude en petits éléments appelés éléments finis. Cette méthode de la discrétisation la plus utilisée car [32] :

- La flexibilité et l'adaptation aux n'importe quelles formes géométries complexes.
- Elle couvre de nombreux domaines de la physique.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en un nom portant d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments, la combinaison de tous ces éléments de calcul crée un nombre fini d'éléments polygonaux qui forme le maillage et nous permet alors de connaître l'état magnétique de la Structure complète donc d'effectuer des calculs de flux, force, et d'inductance...

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis repose sur trois étapes essentielles :

- Formulation des équations aux dérivées partielles à partir des lois physiques.
- Transformation des équations en un système algébrique qu'il convient de Résoudre pour obtenir la solution du problème posé.
- Exécution des problèmes sur ordinateur à partir du logiciel approprié.

IV.4 PRÉSENTATION DU LOGICIEL ANSYS-MAXWELL

Ansys Maxwell est un logiciel de simulation des champs électromagnétiques leader de l'industrie utilisé pour concevoir et analyser des structures 3D/2D telles que des moteurs électriques, actionneurs, capteurs, transformateurs et autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Avec Maxwell, vous pouvez caractériser avec précision le mouvement transitoire non linéaire des composants Électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande.

Il effectue des calculs électromagnétiques par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis, limites et les conditions applicables à la source des équations de Maxwell sur une région finie de l'espace [33].

La modélisation d'un dispositif dans ANSYS-Maxwell en générale passe par 5 étapes suivent :

- Construction géométrique.
- Génération du maillage.
- Définition des propriétés physiques.
- Résolution.
- Exploitation des résultats.

IV.5 ÉQUATIONS DE MAXWELL

Les équations de Maxwell, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme, en particulier les problèmes relatifs au calcul du champ magnétique dans les machines électriques donc en les exprimant sous la forme d'un système de quatre équations aux dérivées partielles couplées [34].

a) Maxwell- Faraday

Une variation de flux d'induction magnétique engendre une force électromotrice qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Sa forme intégrale est :

$$\overrightarrow{rot E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (IV.1)$$

b) Conservation de flux

$$div (\vec{B}) = 0 \quad (IV.2)$$

Cette relation traduit mathématiquement, qu'il n'existe pas de charges magnétiques car les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques.

c) Maxwell-Gauss

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

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{IV.3})$$

d) Maxwell-Ampère

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

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$\vec{D}$: Vecteur induction électrique [As/m²].

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

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

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

$\vec{J}$: Vecteur densité de courant [A/m²].

ρ : Densité de charge électrique [C/m³].

t : Variable temporelle [s].

La résolution des équations de Maxwell ne peut s'effectuer sans la relation constitutive des matériaux. Ci-dessus on ajoute les lois régissant les milieux

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{Bm} \quad (\text{IV.5})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{IV.6})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$\vec{B}_m$: Induction magnétique rémanente (T).

μ : Perméabilité magnétique (H/m).

ϵ : Permittivité électrique (F/m).

$\vec{J}$: Densité de courant électrique (A/m²).

σ : Conductivité électrique (S/m).

L'équation (IV.5) représente la densité de courant qui correspond aux courants induits créés par la variation d'induction et par la vitesse de déplacement du milieu.

A partir des équations (IV.2) et (IV.3) on peut écrire :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (\text{IV.9})$$

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = - \text{grad } V \quad (\text{IV.10})$$

Où A est le potentiel vecteur magnétique et V le potentiel scalaire magnétique.

On obtient alors les équations :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \cdot \text{grad } V = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (\text{IV.11})$$

$$\text{div} (\epsilon \text{grad } V) + \text{div} \left(\epsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \rho = 0 \quad (\text{IV.12})$$

Dans le cas général, la fonction V doit être évaluée, il faut alors découpler les équations (IV.11) et (IV.12)

IV.6 CONDITIONS AUX LIMITES

- **Condition de Dirichlet**

La valeur du potentiel vecteur est imposée à la surface du domaine de résolution S :

$$A|_S = A_0 \quad (S: \text{Surface}) \quad (\text{IV.13})$$

A titre d'exemple lorsque le problème possède une géométrie symétrique et les sources sont disposées de manière antisymétrique, on a une condition naturelle de Dirichlet $A = 0$ sur la symétrie [35].

- **Condition de Neumann**

La dérivée du potentiel vecteur par rapport à la normale à la surface s est imposée :

$$\frac{\partial A}{\partial n} |_s = 0 \quad (\text{IV.14})$$

Cette condition est utilisée pour des problèmes qui possèdent une symétrie géométrique et physique [35].

IV.7 PRÉSENTATION DE LA MACHINE ETUDIEE

Dans ce projet nous utiliserons le logiciel ANSYS- MAXWELL un outil puissant permettant de réaliser des modélisations et des analyses électromagnétiques avancées. Ce logiciel nous permettra de modéliser la machine synchrone à aimants permanents en type V présente dans la Toyota Prius 2010 par la méthode des éléments finis et cela en raison de la complexité de la géométrie de notre machine, et va nous permettre de déterminer les caractéristiques et autres performances de la machine, tels que le couple, flux ainsi que la vitesse et fournir des informations précieuses.

La figure 33 représente respectivement la géométrie de la machine étudiée :

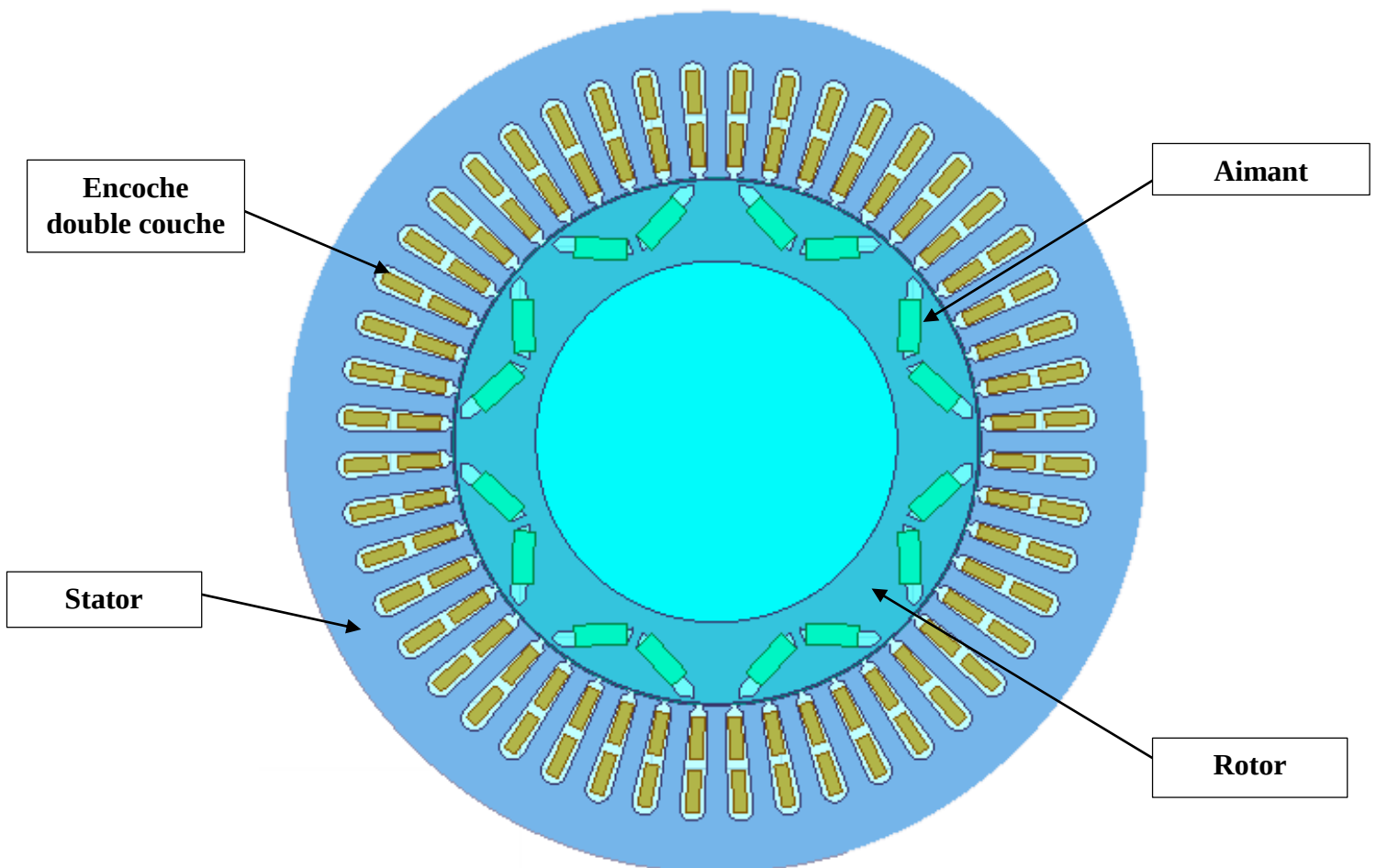


Figure 33: la géométrie de la machine

IV.8 LES COMPOSANTS DE LA MACHINE MSAP

IV.8.I Stator

Les caractéristiques du stator étudié sont données au Tableau suivant :

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre d'encoches	48	
Nombre de phases	3	
Type de connexion	Etoile	
Nombre de conducteur Par encoche	13	
Diamètre interne	264	mm
Diamètre externe	161.9	mm
La longueur	50.8	mm
Type d'acier	M19_24G	
Fréquence	186.66	Hz

Tableau 9: Paramètres d'encoche

IV.8.II Type d'encoche statorique utilisée

Les caractéristiques d'encoche statorique étudié sont données au Tableau 10 :

Paramètre	valeur	Unité
Hs0	1.03	mm
Hs1	1	mm
Hs2	29.5	mm
Bs0	1.93	mm
Bs1	5	mm
Bs2	8	mm

Tableau 10: Paramètres d'encoche

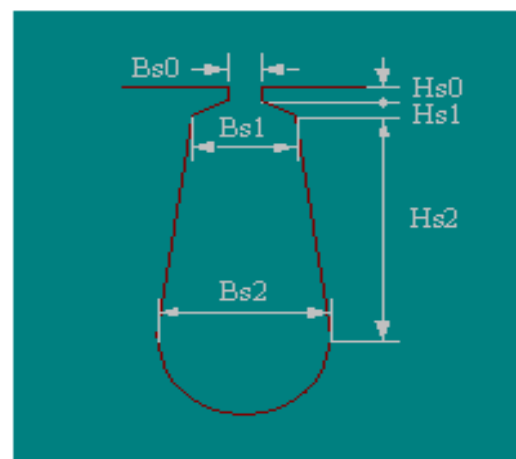


Figure 34: Structure d'encoches

La figure suivante montre le stator seul sans bobinage :

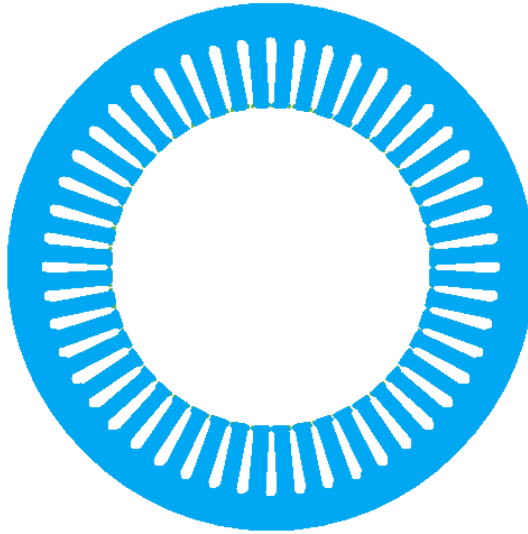


Figure 35: Structure de stator

IV.8.III Bobinage

Le bobinage du moteur est de type imbriqué, à deux couche et calculé à partir des paramètres suivants :

Z : nombre d'encoche

p : nombre de paires de pôles

m : nombre de phases

Les paramètres de sa construction sont donnés par les formules suivantes :

- Nombre d'encoches par pôle par phase q :

$$q = \frac{Z}{2.p.m} \quad (\text{IV.15})$$

- Le pas polaire τ_p

$$\tau_p = \frac{Z}{2p} \quad (\text{IV.16})$$

- Le pas d'enroulement

$$\gamma = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon \quad (\text{IV.17})$$

- L'angle entre deux encoches consécutives α

$$\alpha = \frac{360.p}{Z} \quad (\text{IV.18})$$

- Le décalage entre deux phases consécutives a

$$a = \frac{120}{\alpha} \quad (\text{IV.19})$$

- Le décalage entre deux bobines de la même phase γ

$$\gamma = \frac{Z}{p} \quad (\text{IV.20})$$

- La zone de phase τ_v

$$\tau_v = q \cdot \alpha \quad (\text{IV.21})$$

Caractéristique	valeur
Nombre d'encoches par pole et par phase	2
Pas polaire τ	6
Pas d'enroulement γ	5
Zone de phase τ_v	60°

Tableau 11: Caractéristiques des bobines statorique

Les paramètres identifiés ont été utilisés pour composer notre bobinage imbriqué à pas raccourci. La figure 36 et 37 Représentent le schéma panoramique et radial de la distribution du bobinage :

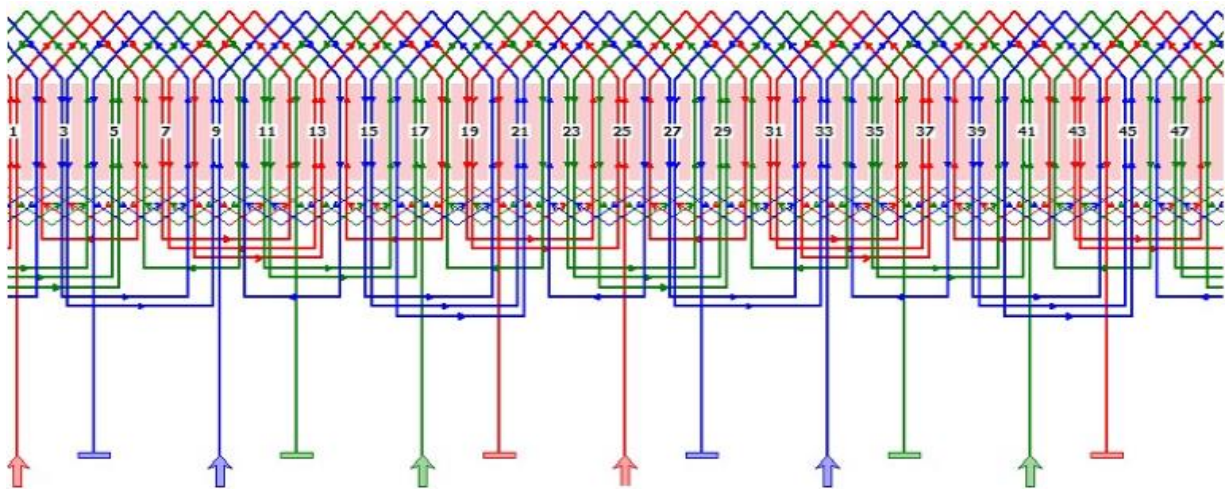


Figure 36: schéma de bobinage

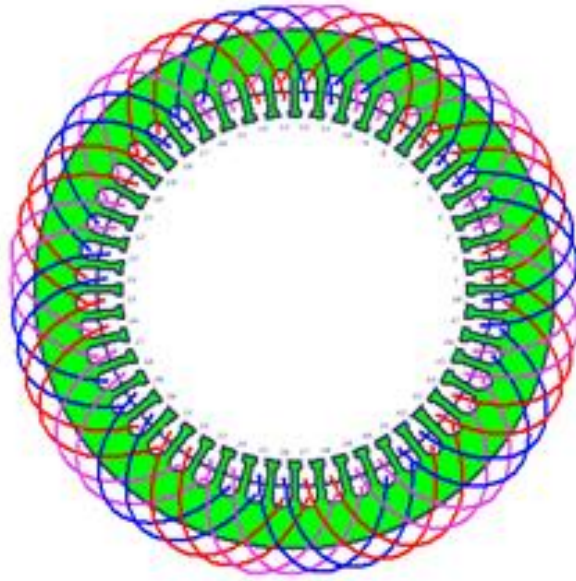


Figure 37: Distribution de bobinage

L'enroulement utilisé pour ce moteur est un enroulement distribué bobiné entier. Cela permet de diminuer la quantité de cuivre nécessaire pour les têtes des bobines et aussi pour éliminer certaines harmoniques.

IV.8.IV Rotor

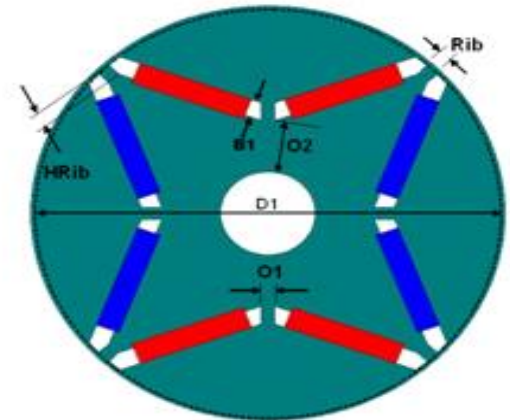
Les caractéristiques du rotor étudié sont données au tableau suivant :

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de pole	8	
Diameter interne	110.64	mm
Diameter extern	160.4	mm
facture	0.95	
Type d'acier	M19_24g	
Type de pole	3	

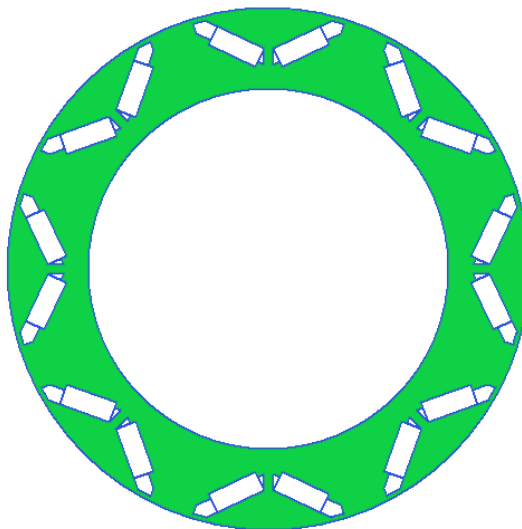
Tableau 12: Paramètres de rotor

IV.8.V Type de pole

Paramètre	Valeur	Unité
D1	157.44	mm
O1	3	mm
O2	7.28	mm
B1	4.7	mm
Rib	14	mm
HRib	3	mm
Couches	1	

Tableau 13: Paramètres de pole**Figure 38:** Type de pole

La figure suivante montre le rotor seul sans aimants :

**Figure 39:** Structure de stator

IV.8.VI Les aimants

Les paramètres des aimants en V du rotor sont donnés au tableau suivant :

Parameter	Valeur	Unité
Hauteur d'aimant	4.5	mm
Largeur d'aimant	6.48	mm
Longueur d'aimant	32	mm
Type d'aimants	NdFe35	

Tableau 14: Paramètres de pole

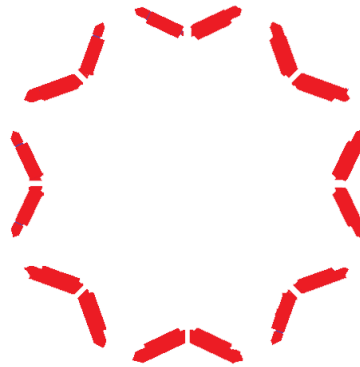


Figure 40: Structure d'aimants en V

IV.8.VII Matériau utilisée

La courbe $B(H)$ illustrée ci-dessus correspond au matériau M19_24G. Cette courbe met en évidence le comportement ferromagnétique du matériau : une forte pente initiale indique une perméabilité magnétique élevée, ce qui permet au matériau de s'aimanter rapidement même sous un champ magnétique faible. On observe que l'induction magnétique approche de 3,5 Tesla lorsque H atteint $1,5 \times 10^6$ A/m, ce qui est un champ très fort.

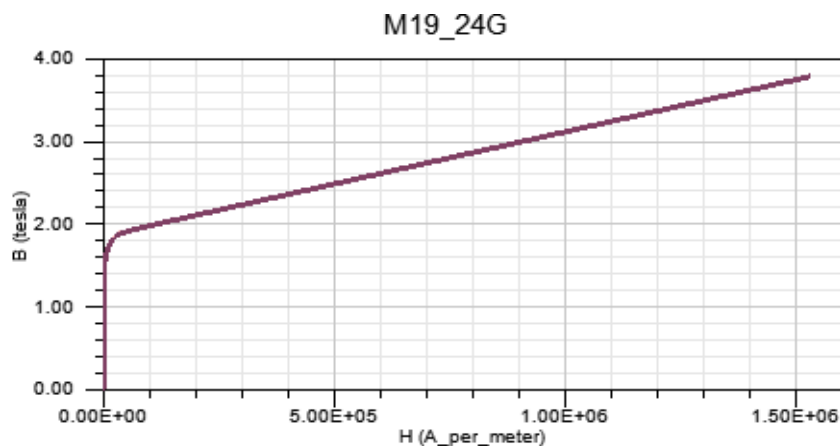


Figure 41: courbe d'aimantation

IV.8.VIII Le circuit électrique équivalent de la machine MSAP étudiée

Le circuit représente un onduleur triphasé utilisé pour piloter la Machine Synchrone à Aimants Permanents, il permet de contrôler dynamiquement les tensions d'alimentation de la machine MSAP, où il convertit la tension 650 V (DC) en (AC) pour alimenter le moteur.

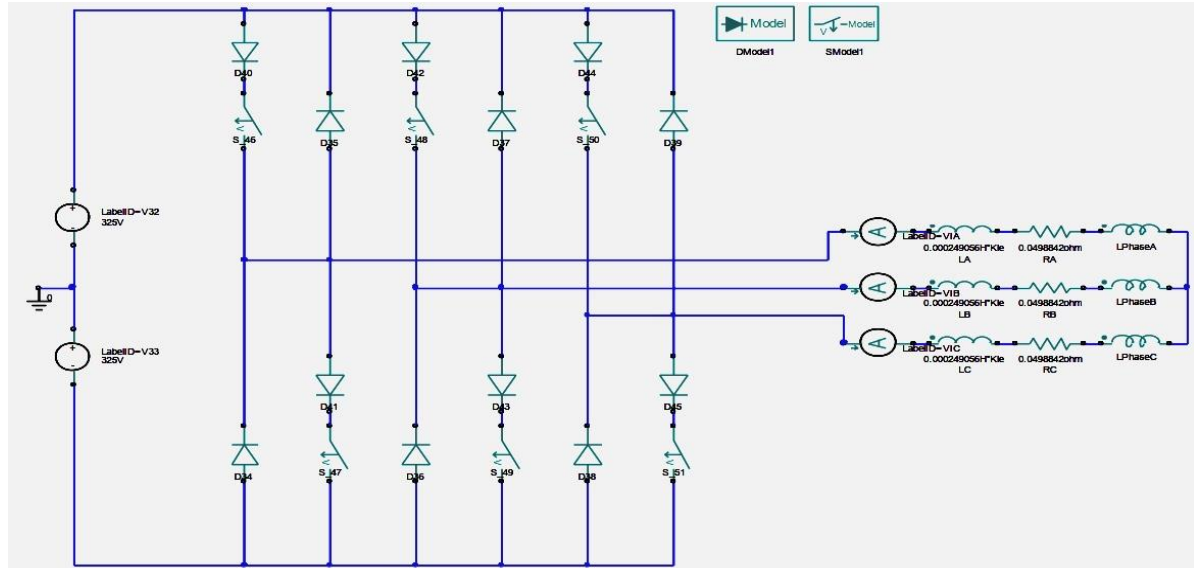


Figure 42 : Le circuit électrique équivalent de la machine MSAP

IV.9 Le MAILLAGE

C'est une étape qui correspond à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles) et nœuds. Sur le logiciel Ansys le maillage c'est fait automatiquement.

Nous allons modéliser seulement le (1/8) de la géométrie pour réduire le temps de calcul. Le maillage triangulaire de la machine étudié contient de 6400 élément et illustré sur la figure suivante :

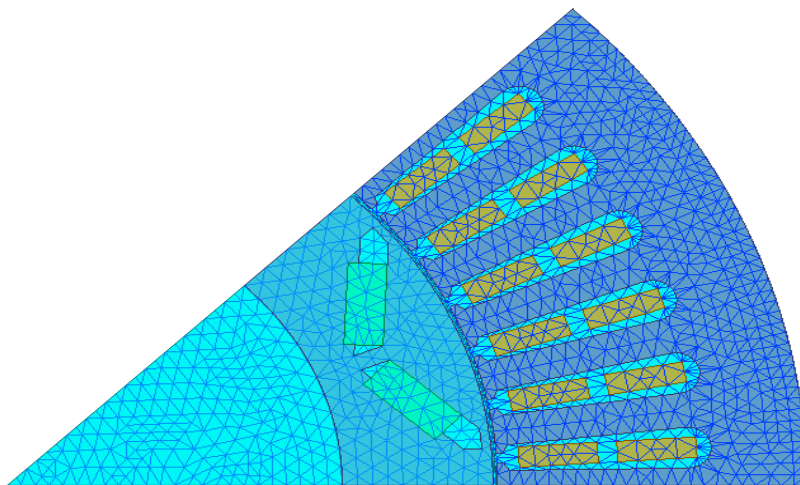


Figure 43: Maillage De La Machine

IV.10 RÉOLUTION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS

IV.10.I Machine sans alimentation

Dans cette partie, la machine est considérée à sans alimentation et la seule source de champ est l'aimant permanent.

- **Potentiel vecteur magnétique A**

La figure 44 illustre la distribution du potentiel vecteur magnétique A , Les lignes de champ suivent une trajectoire fermée. On remarque que les lignes équipotentielles sont bien réparties autour d'un pôle de la machine ainsi que les dents du stator et les aimants du rotor, la valeur maximale de A est 0.0155 wb/m.

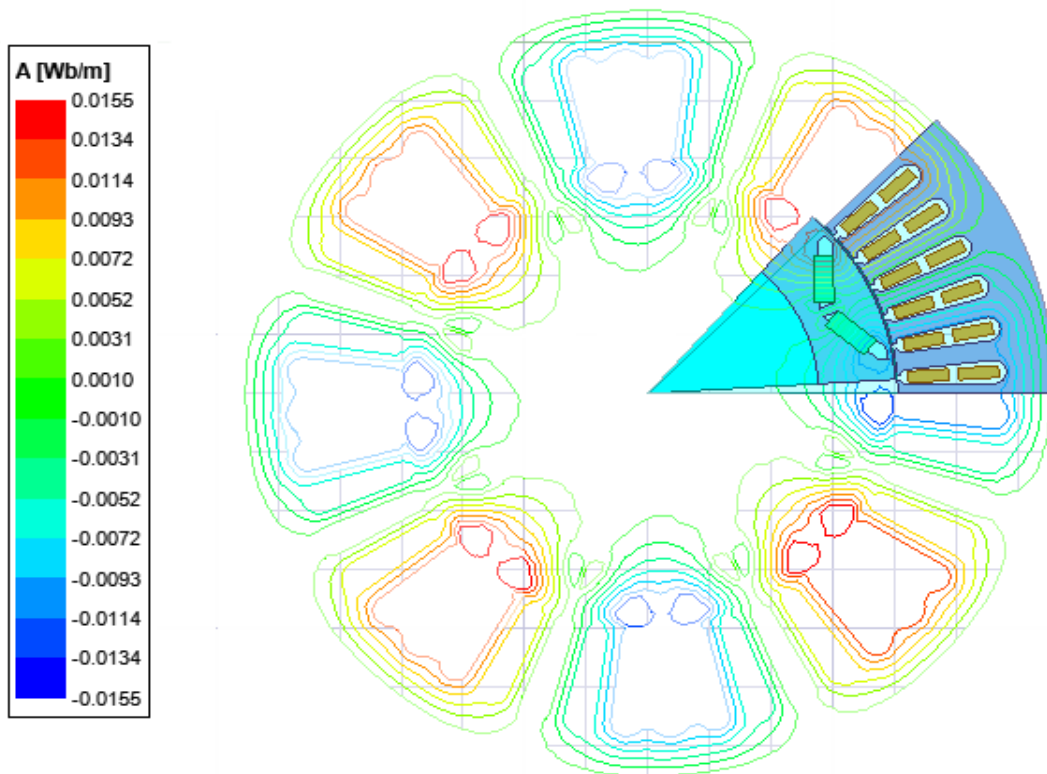


Figure 44 : Potentiel vecteur magnétique A

- **Induction magnétique B**

Sur la figure 45, nous pouvons remarquer les différentes zones de saturations. Les valeurs maximale de B apparaissent en rouge, orange jusqu'à jaune entre 1,8 à 2,4 Tesla. Le champ se centre dans les chemins à faible réluctance où les grandes valeurs de champ B est concentré au niveau des dents du stator et des aimants du rotor, on peut voir aussi la toile du stator colorée en jaune-vert, traduisant une densité plus modérée, entre 1,2 et 1,6 Tesla alors que les zones situées à l'extérieur du circuit magnétique, principalement l'air et les encoches correspond à des valeurs de B très faibles, proches de 0 Tesla.

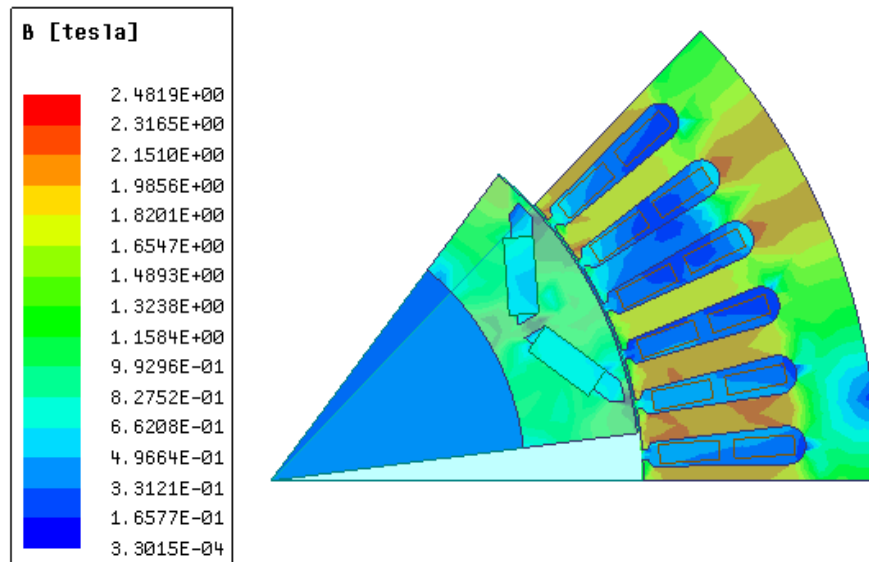


Figure 45 : Induction magnétique B

- **Flux de l'enroulement statorique**

La courbe de la figure 46 montre l'évolution du flux statorique en régime sans alimentation. Les trois courbes présentent une forme sinusoïdale régulière et déphasées de 120°, ce qui est caractéristique d'un fonctionnement sain et équilibré. L'amplitude de flux est d'environ ($\sim \pm 0,18$ Wb) ce qui indique une vitesse constante et un champ rotorique stable.

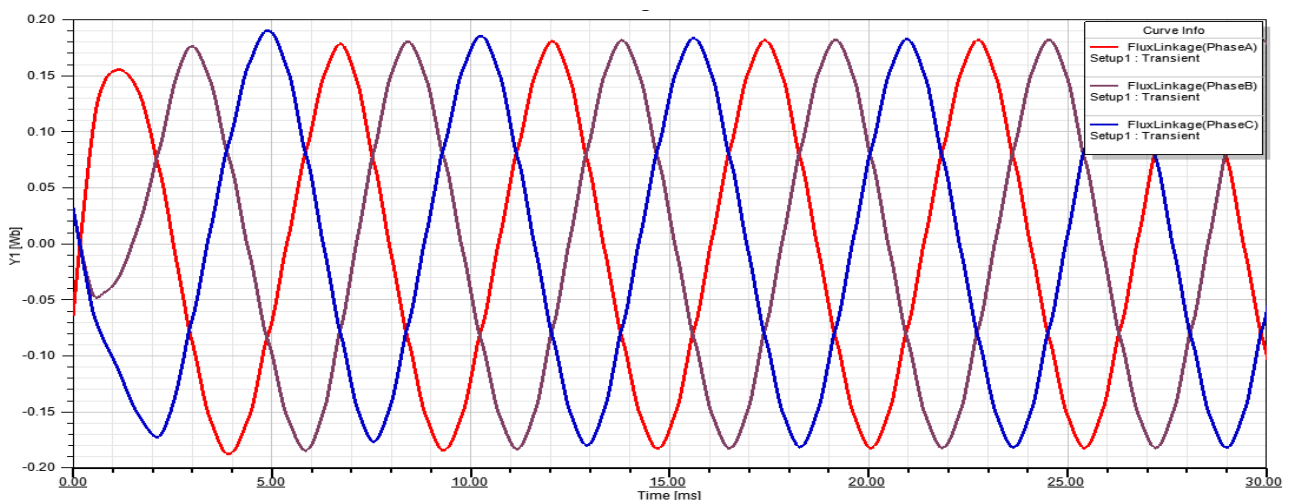


Figure 46: le flux de l'enroulement statorique

- **La force électromotrice (f.é.m.)**

La figure 47 montre l'évolution de la FEM des trois phases statoriques montrée une variation périodique et une forme sinusoïdale perturbée par des harmoniques avec une valeur crête de ± 218 V. Le pic initial sur la phase A dans le régime transitoire est probablement dû au circuit R-L de la source de tension appliquée ou à l'initialisation du champ magnétique et un positionnement initial du rotor proche de la denture.

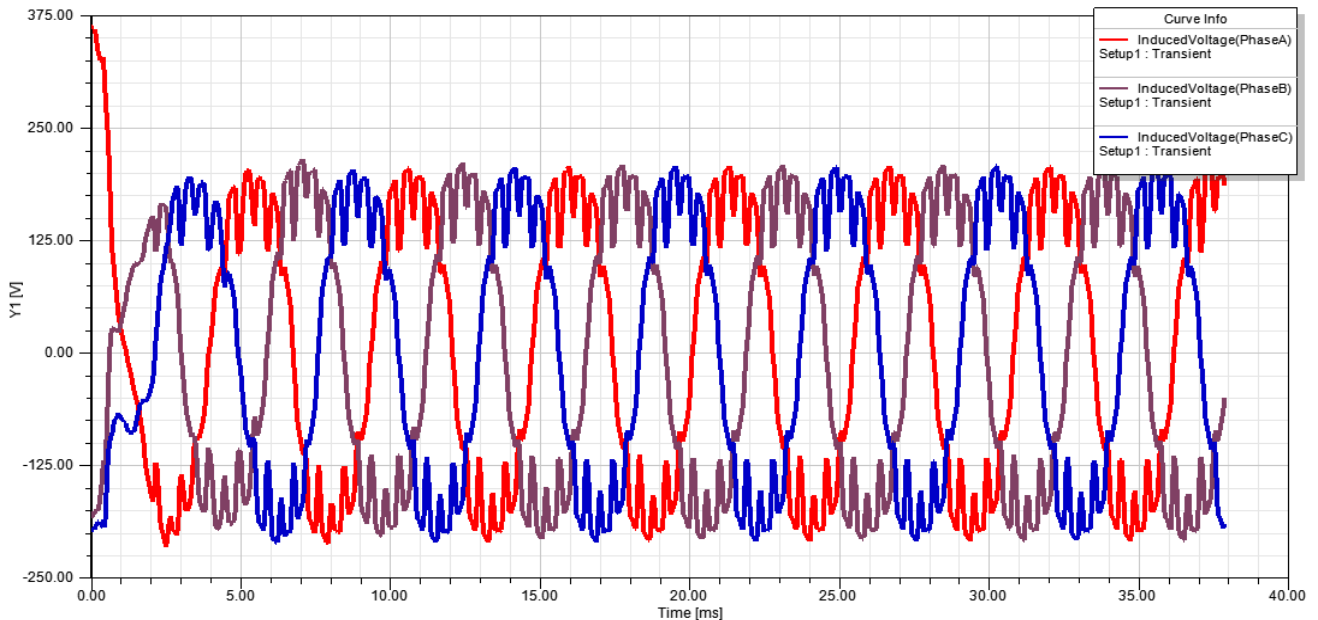


Figure 47: allure des F.E.M

- **Couple réluctance**

L'allure 48 montrée le couple électromagnétique produit par les aimants permanents uniquement lorsque les tensions des trois phases sont nulles. Le couple débute avec des oscillations importantes, alternant entre des valeurs positives et négatives et se stabilise autour d'une valeur très faible.

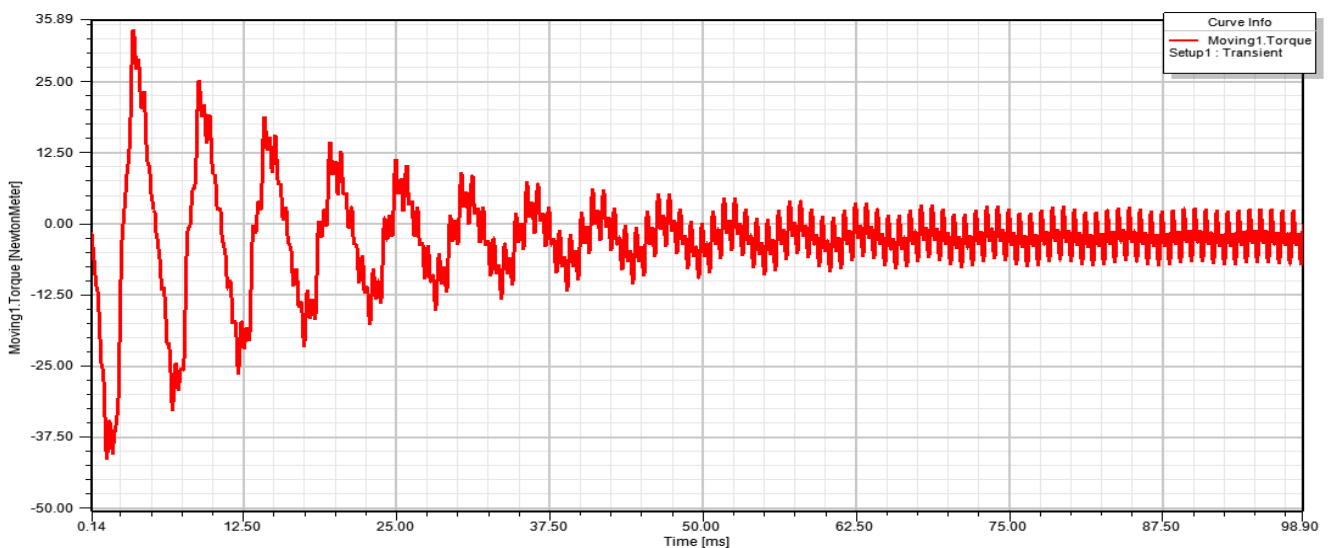


Figure 48: le couple réluctance

IV.10.II Machine avec alimentation triphasée

- **Le couple électromagnétique**

La courbe du couple électromagnétique avec alimentation triphasée montre une montée rapide du couple en régime transitoire, ce qui est normal au démarrage. Le couple se stabilise autour d'une valeur moyenne de 208.47 Nm, très proche de couple moyenne déclaré dans la Toyota Prius 2010, cela indique un bon fonctionnement de la machine étudiée.

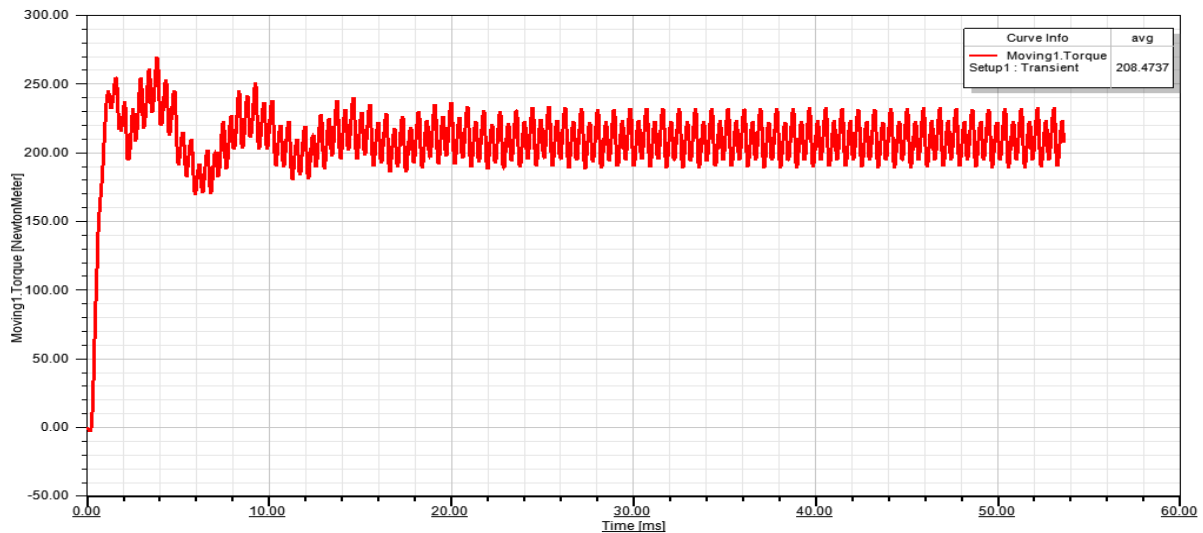


Figure 49: Le couple électromagnétique

- **Le couple électromagnétique en fonction de différentes tensions**

Dans la figure 50, nous avons représenté 5 différentes tensions (100V, 200V, 300V, 400V et 530.723V) pour observer l'impact du couple électromagnétique. On remarque qu'il existe une relation directe entre la tension appliquée et le couple développé par la machine MSAP. On note que plus la tension augmente, plus le couple s'élève aussi, atteignant environ 270Nm à 530.723V alors qu'à 100V on atteint à peine 85 Nm. En régime permanent, le couple se stabilise, bien que des ondulations périodiques subsistent, traduisant le phénomène classique l'ondulation de couple.

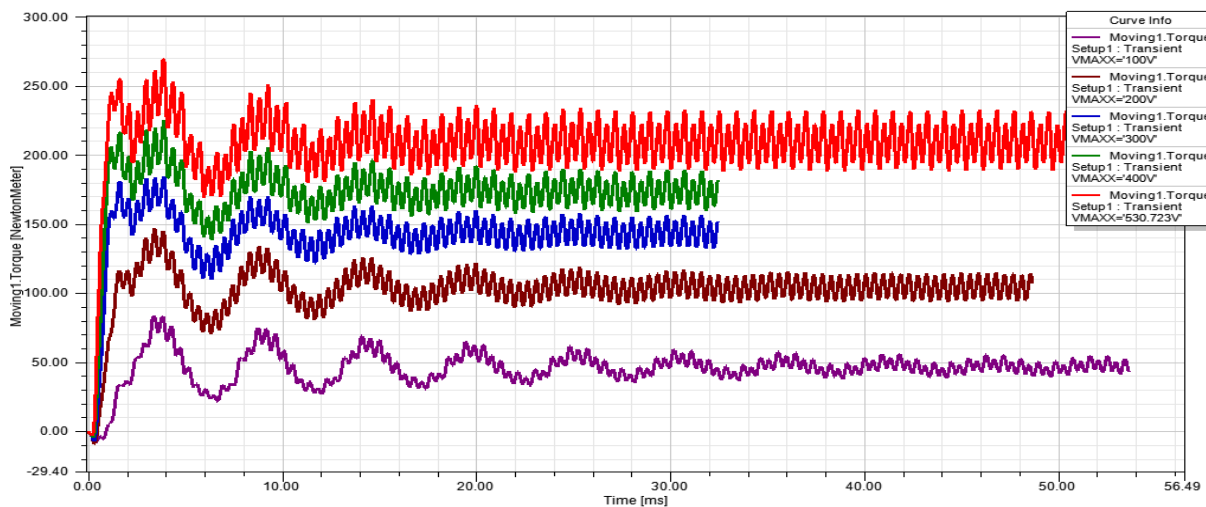


Figure 50: Le couple électromagnétique en fonction de différentes tensions

- **Tension de phase en phase avec les F.E.M**

La figure 50 montre l'évolution temporelle de la tension de phase superposée à la force électromotrice (FEM) pour une seule phase. On observe que la tension de phase est déphasée d'un angle δ avec la FEM pour que le courant d'induit être en phase avec la FEM, ce qui indique que la commande est synchronisée et que l'alimentation est bien adaptée à la position de la machine.

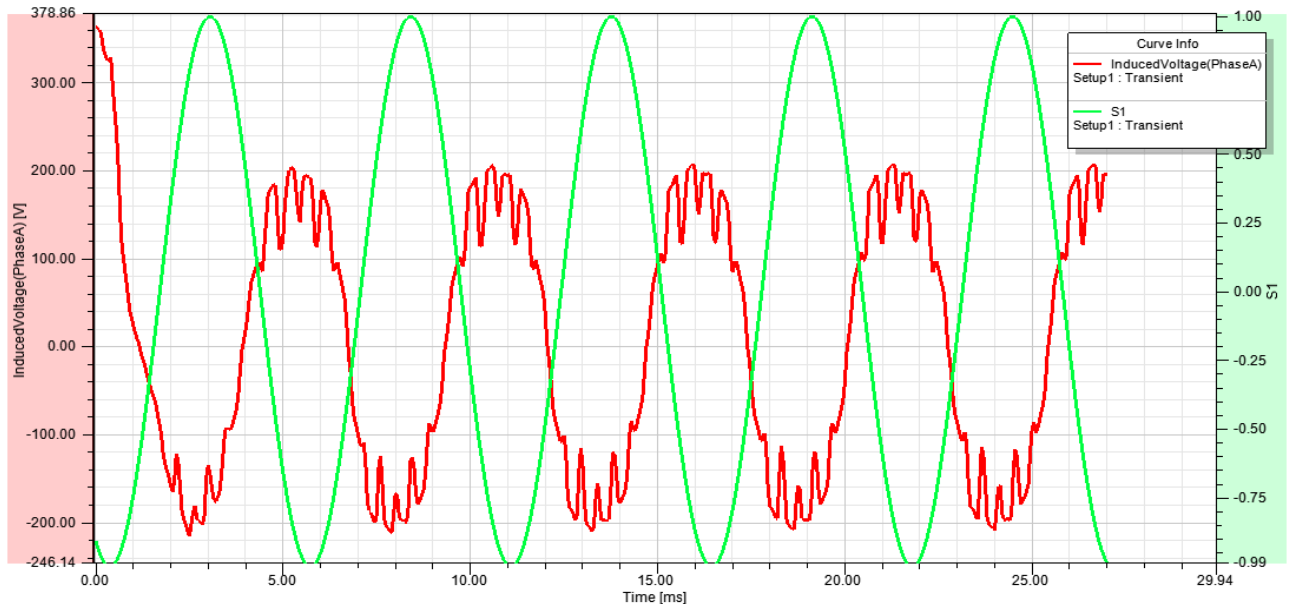


Figure 51: allure de Tension de phase en phase avec les F.E.M

IV.11 COMPARAISON DES RÉSULTAT

Grâce à Ansys Maxwell, il est possible d'extraire les résultats du modèle MSAP utilisé dans cette étude :

FULL-LOAD ELECTRIC DATA

- Average Input Current (A): 146.904
- Root-Mean-Square Armature Current (A): 146.904
- Armature Thermal Load (A^2/mm^3): 1129.42
- Specific Electric Loading (A/mm): 45.2667
- Armature Current Density (A/mm^2): 24.9504
- Frictional and Windage Loss (W): 0
- Iron-Core Loss (W): 125.589
- Armature Copper Loss (W): 4065.87
- Transistor Loss (W): 0
- Diode Loss (W): 0
- Total Loss (W): 4191.46
- Output Power (W): 60010.2
- Input Power (W): 64201.6
- Efficiency (%): 93.4714
- Torque Angle (elec. degree): 92.2144
- Rated Speed (rpm): 2800
- Rated Torque (N.m): 204.662
- Fundamental RMS Phase Back-EMF (V): 65.9199
- THD of Phase Back-EMF (%): 9.13843

Figure 52: Résultats analytiques du modèle MSAP

Nous avons réalisé une comparaison entre certains des résultats obtenus et désirés avec les résultats réels de la Toyota Prius 2010 sous forme de tableau :

Grandeur	Résultat simulé (Ansys Maxwell)	Résultat réel (Toyota Prius)	Remarque
Tension d'alimentation	650 V	650 V	Identique
Vitesse nominale	2800 tr/min	2800 tr/min	Identique
Nombre de pôles	8	8	Identique
Couple moyen	204.65 N.m	207 N.m	Écart faible (1.1%)
Puissance d'entrée	64.20 KW	63.2 KW	Écart faible (1.6 %)
Puissance de sortie	≈ 60 KW	≈ 60 KW	Identique
Rendement	93.47 %	95 %	Écart faible (1.6 % à 2.7 %)

Tableau 15: comparaison entre les résultats de simulation et les résultats réels

- **Interprétation**

Les résultats de simulation montrent une très bonne cohérence générale avec des faibles écarts par rapport aux résultats réels du moteur MG2 de la Toyota Prius 2010. Le couple moyen simulé (204,65 N.m) est proche du couple réel indiqué pour le MG2 (≈207 N.m), avec une différence négligeable de 1,1 %. La puissance d'entrée simulée est supérieure de seulement 1,6 % tandis que la puissance de sortie correspond exactement à la valeur nominale. Le rendement simulé (93,47 %) est légèrement inférieur aux 95–96 % réels, du fait de l'absence des pertes par ventilation, mécaniques et thermiques dans la simulation.

Nos résultats sont proches des résultats réels de la Toyota Prius 2010 ce qui confirme la fiabilité de la machine synchrone à aimants permanents réalisée dans ce projet.

Ces résultats restent des résultats de simulation, le moteur MG2 fonctionné sur plusieurs fonctionnements et conditions selon les besoins ainsi que les paramètres réels ne sont pas tous publiés, en raison de la stratégie de Toyota. C'est pourquoi notre comparaison se limite et est concentrée aux grandeurs nominales publiées par Toyota.

IV.12 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Dans cette partie nous allons faire une étude paramétrique où on va varier les paramètres géométriques de la machine étudiée et voir l'effet sur le couple comme une approche vers l'optimisation

- **L'influence de la longueur de la machine**

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence de la longueur sur le couple électromagnétique, sachant qu'on a fixé la longueur dans 50.8 mm et étudiée deux autres valeur différent 35.8 mm et 65.8 mm.

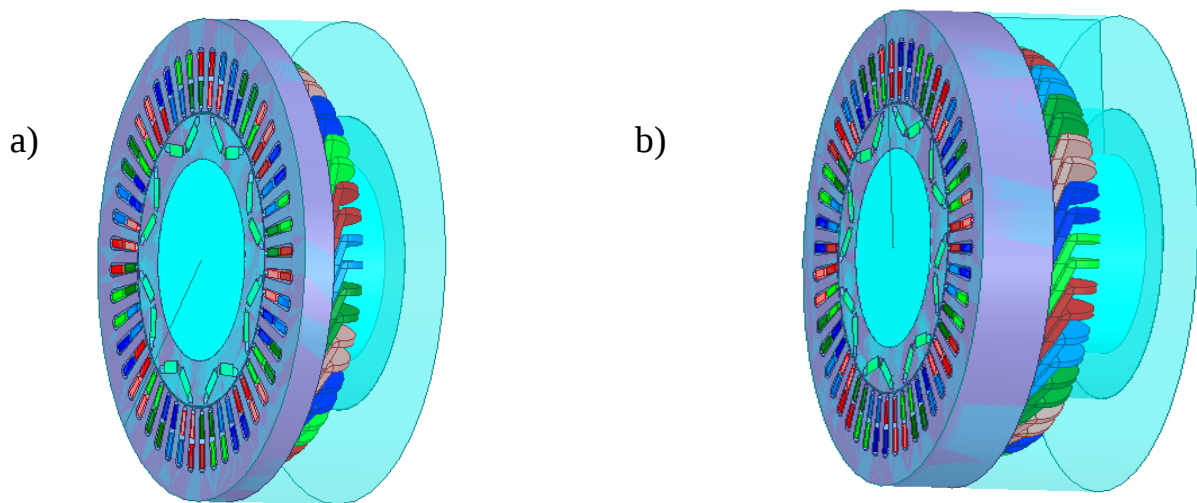


Figure 53: a) longueur dans 35.8 mm, b) longueur dans 65.8 mm

Les résultats de cette étude sont donnés sur la figure :

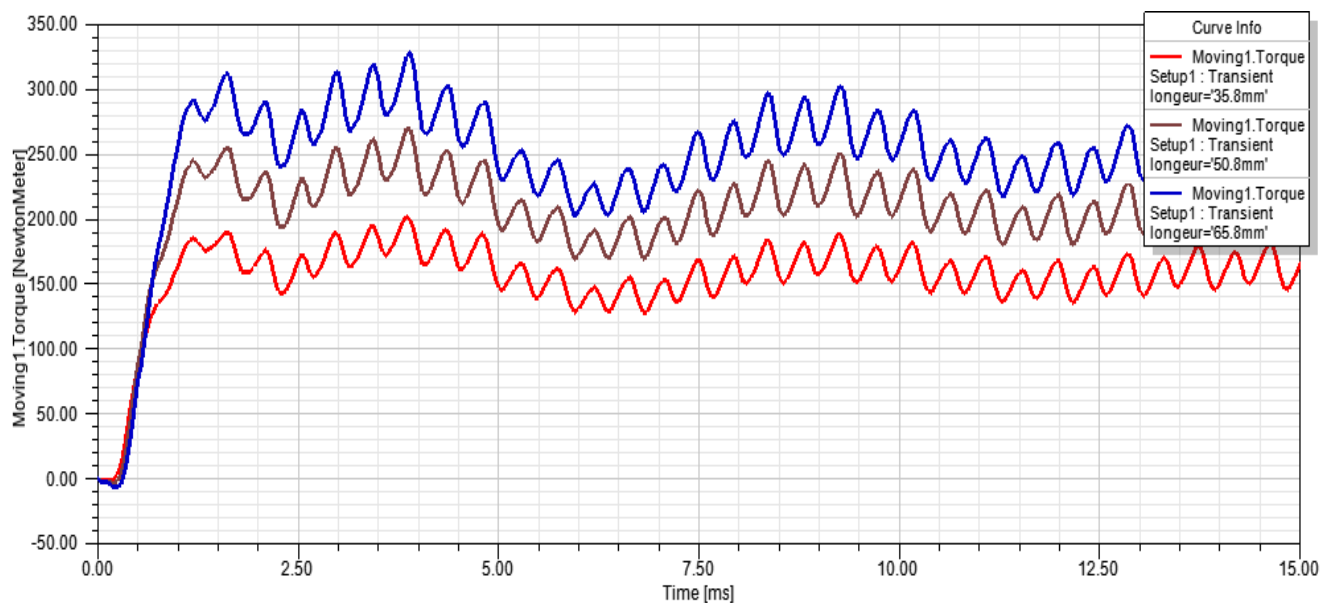


Figure 54: l'influence de la longueur sur le couple

Les résultats obtenus sur la figure 54 montrent une augmentation significative du couple électromagnétique en fonction de la longueur, Cela confirme que plus la longueur axiale est grande, plus la surface active pour l'interaction magnétique entre les aimants et les enroulements, donc plus de couple, on remarque que Pour la longueur de 35.8 mm, le couple moyen est d'environ 170 Nm, tandis qu'il dépasse 230 Nm pour 50.8 mm et se rapproche des 310 Nm pour une longueur de 65.8 mm.

- **L'épaisseur des aimants permanents**

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence de l'épaisseur des aimants permanents sur le couple électromagnétique, sachant qu'on a fixé l'épaisseur dans 6.48 mm et étudiée deux autres valeur différent 3.48 mm et 9.48 mm.

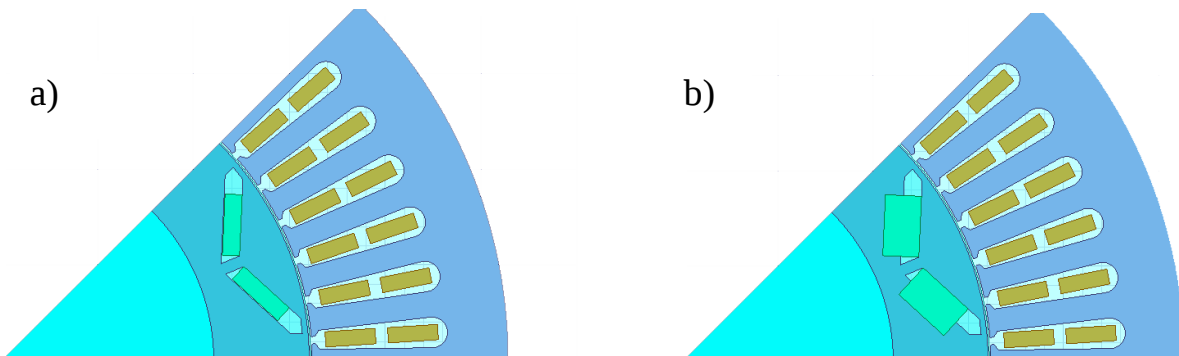


Figure 55: a) l'épaisseur dans 3.48 mm, b) l'épaisseur dans 9.48 mm

Les résultats de cette étude sont donnés sur la figure :

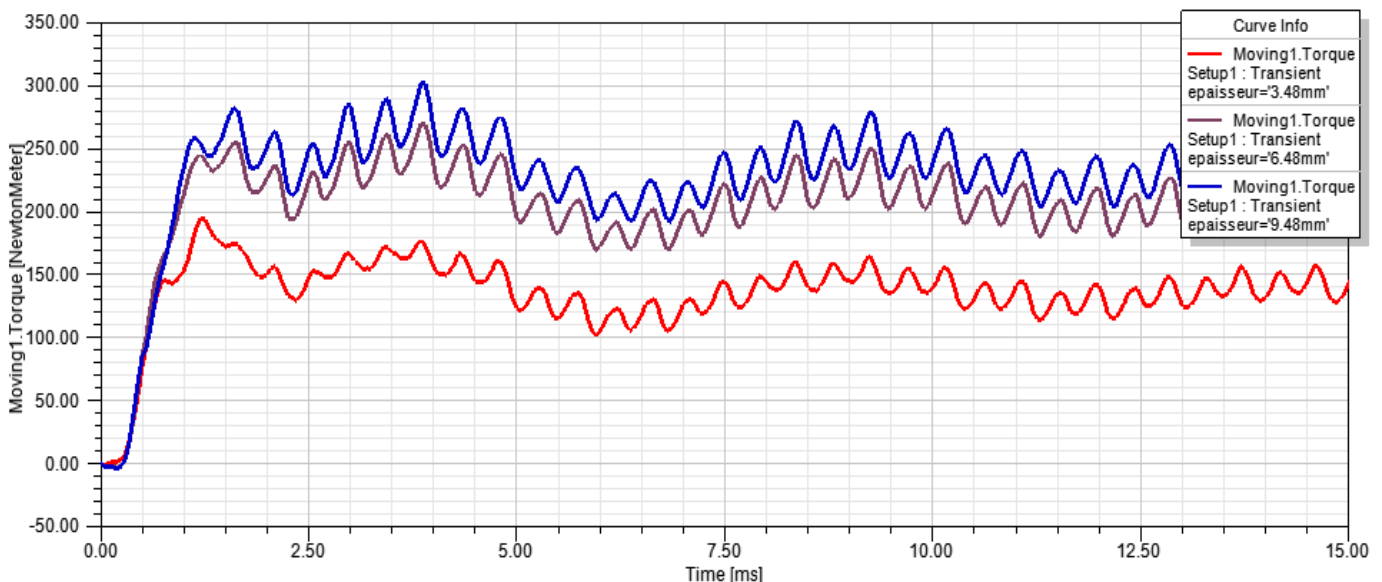


Figure 56: l'influence de l'épaisseur des aimants permanents sur le couple

Les résultats obtenus de la figure 56 ont été observé que l'augmentation de l'épaisseur des aimants entraîne une croissance significative du couple moyen passant d'environ 175 Nm à plus de 285 Nm. Cette augmentation est due à la plus grande quantité de matériau magnétique, qui permet une densité de flux accrue dans l'entrefer donc plus de couple généré.

- **Largeur des aimants permanents**

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence de la largeur des aimants permanents sur le couple électromagnétique, sachant qu'on a fixé la largeur dans 32 mm et étudié deux autres valeurs différentes 25 mm et 37 mm

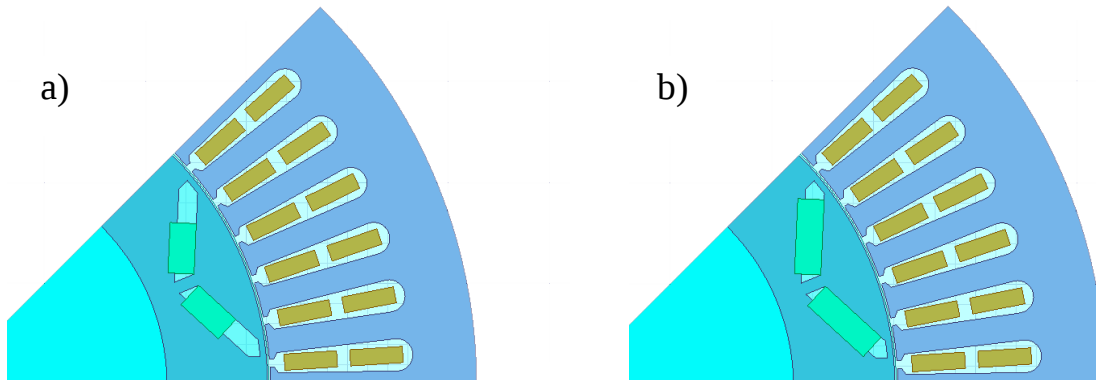


Figure 57: a) largeur dans 25 mm, b) largeur dans 37 mm

Les résultats de cette étude sont donnés sur la figure :

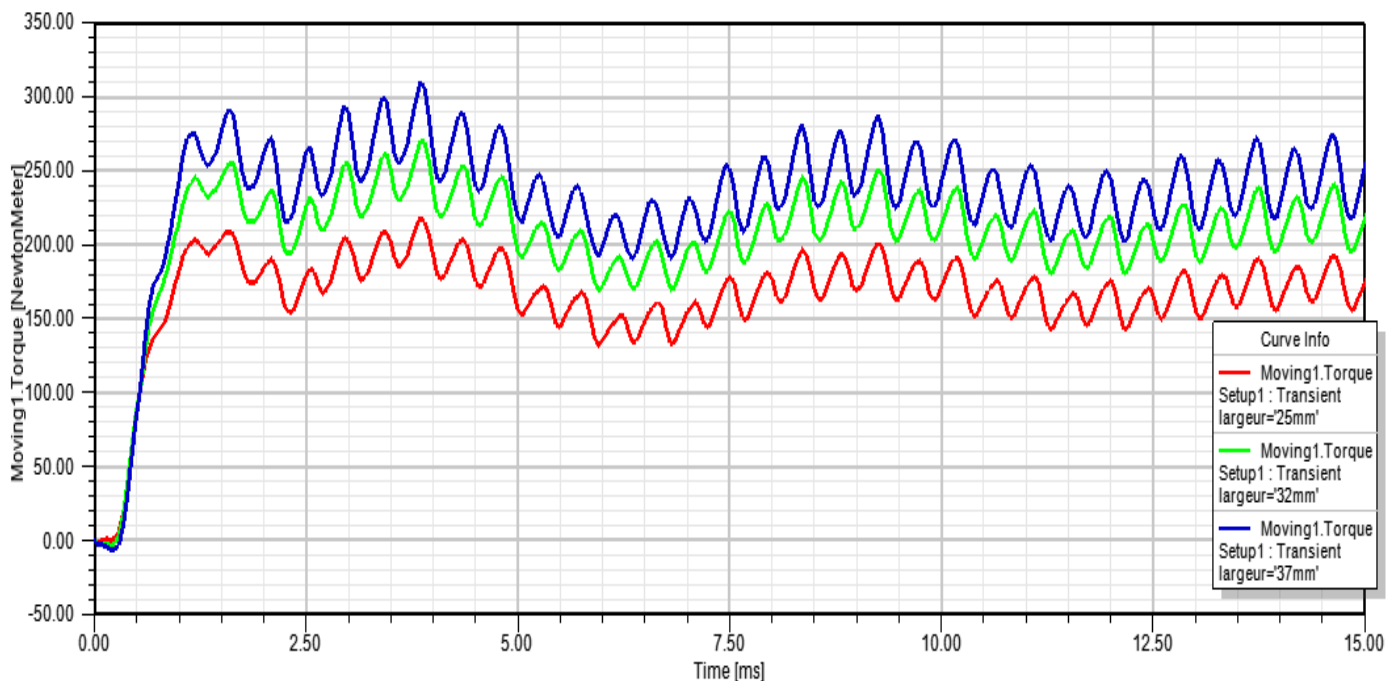


Figure 58: l'influence de largeur des aimants permanents

Les résultats montrent une augmentation progressive du couple moyen, passant d'environ 190 Nm à 290 Nm. Cela s'explique par la diminution ou l'augmentation de la surface active des aimants exposée à l'entrefer, pour injecter le flux magnétique dans l'entrefer, ce qui renforce l'interaction magnétique avec le champ statorique et augmente donc le couple électromagnétique généré.

- **Diamètre extérieur de stator**

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence de diamètre extérieur de stator sur le couple électromagnétique, sachant qu'on a fixé le diamètre sur 264 mm et étudiée deux autres valeurs différentes 254 mm et 274 mm.

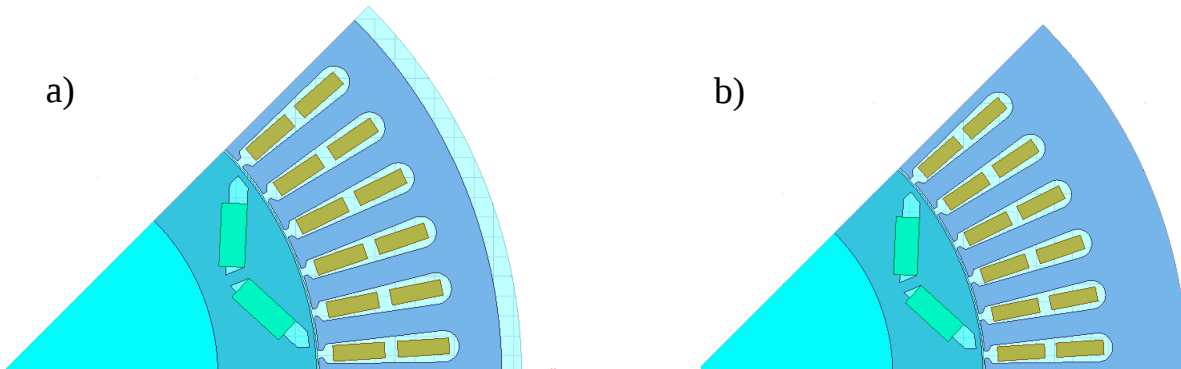


Figure 59: a) diamètre extérieur de stator dans 254 mm, b) diamètre extérieur de stator dans 274 mm

Les résultats de cette étude sont donnés sur la figure :

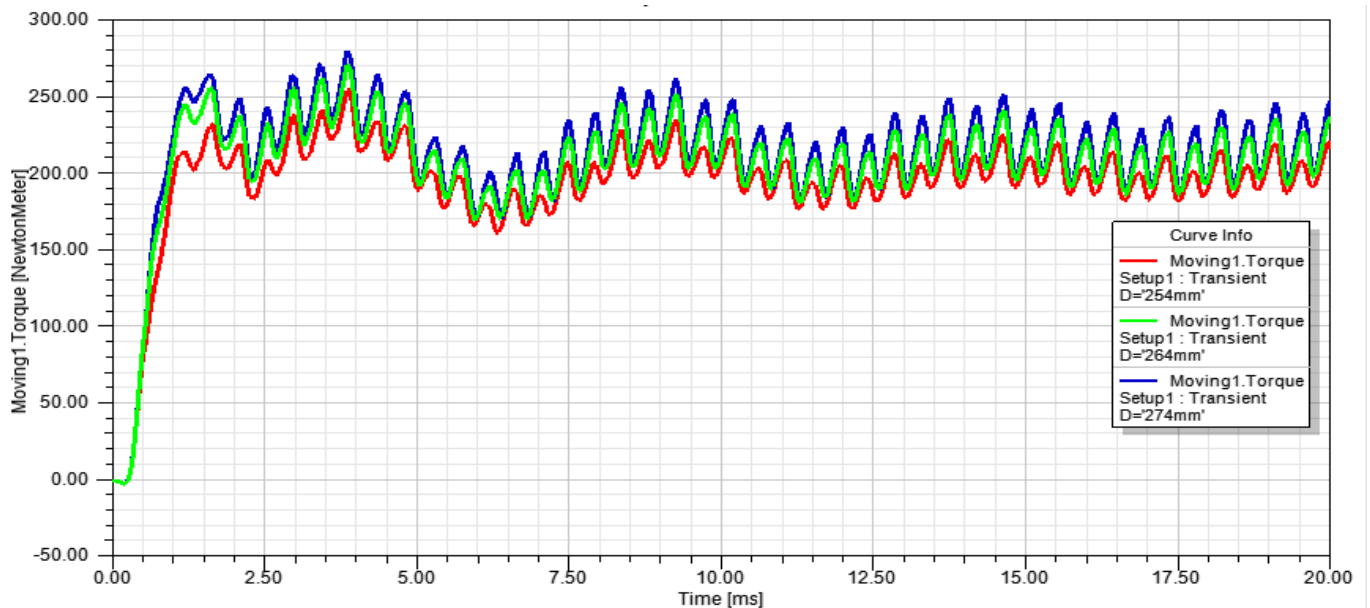


Figure 60: l'influence de diamètre extérieur de stator

Les résultats montrent que l'effet du diamètre extérieur du stator sur le couple électromagnétique très faible, on ne voit pas une influence importante sur le couple entre (254 mm, 264 mm et 274 mm). Cela s'explique par la modification du diamètre extérieur, n'impacte pas significativement le circuit magnétique actif ni le flux traversant l'entrefer. Cette insensibilité indique que le diamètre extérieur, dans cette plage de valeurs, n'est pas un paramètre critique pour l'optimisation du couple.

IV.13 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous présenterons les différentes méthodes de modalisation et le principe de calcul de la méthode élément finis ainsi que les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques qui sont régis par les équations de Maxwell. Ensuite, on a commencé par présenter notre machine la MSAP à aimants en V et les paramètres utilisés et exposé les résultats de simulation, une étude approfondie à vide et en charge du moteur a été réalisée. Nous avons distribué le potentiel vecteur magnétique $A^{\vec{}}$, l'induction magnétique et réalisé les graphiques du couple électromagnétique, La force électromotrice ... etc. À la fin de ce chapitre on a fait une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats réels de la Toyota Prius 2010 et une étude paramétrique comme une approche vers l'optimisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les voitures ont besoin de l'usage des moteurs électriques dans des conditions dites « critiques », comme lors de vitesses élevées. Grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique de puissance, de la gestion d'énergie et de la conception de moteurs électriques, les véhicules hybrides ont connu une amélioration significative de leur efficacité et pertinence.

Le but de cette étude était de faire une identification des paramètres de la machine synchrone à aimants permanents utilisés dans la Toyota Prius 2010 en vue d'une intégration dans des simulateurs temps réel. Ceci a été réalisé par le logiciel Ansys Maxwell ce qui nous a permis de voir le comportement électromagnétique de ce moteur. De plus, le logiciel nous a offert la possibilité de visualiser les différents graphes de simulation pour comparer les résultats simulés avec les résultats réels.

Une étude paramétrique a été effectuée sur ce projet montrant la sensibilité des résultats quand il s'agissait de faire varier les paramètres physiques et électriques de la machine MSAP tels que la longueur de la machine, l'épaisseur des aimants permanents. Cette étude nous a permis de constater l'influence de ces paramètres sur le couple et de définir leurs valeurs optimales pour ce moteur.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : K. ALAMEH, « Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents », Automatique, Université de Normandie, 2017. Français
- [2] : Annan Adel, « Analyse du comportement du moteur Synchrone dans les entraînements Électrique sa vitesse variable », mémoire de Magister en électrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'électromécanique. 2010
- [3] : Y. Sara, B. Souad, « Modélisation et diagnostic des défaillances d'une MSAP par analyse de ses grandeurs électromagnétiques » diplôme de Master Université Mohammed seddik Ben Yahia – Jijel 2019
- [4] : M. Bardadi Bendaha « identification des parametres d'une machine synchrone à Aimant permanent en vue d'une integration dans des simulateurs en temps réel ». thèse D'ingénieur 2015-USTO.
- [5] : R. Lateb, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones a aimants avec prise en Compte des harmoniques d'espace et de temps : application à la propulsion marine par POD », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2006.
- [6] : T. Wildil et G. Sybille, « Electrotechnique », 4eme édition de Boeck, 2005.
- [7] : J. A. Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation Des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, UTBM , 2008.
- [8] : <https://www.automobile-propre.com/articles/toyota-prius-histoire-1997-2017-voiture-hybride/>
- [9] : Ta Burrese, Sl Campbell, Cl Coomer, Cw Ayers, Aa Wereszczak, Jp Cunningham, Ld Marlino, Le Seiber Et Ht Lin, Evaluation Du Système De Transmission Hybride Synergétique De La Toyota Prius 2010 Laboratoire National D'oak Ridge, N° Ornl/Tm-2010/253. 2011.
- [10] : Kim, N., Rousseau, A., Et Rask, E. "Autonomie Model Validation With Test Data For 2010 Toyota Prius,"
- [11] : Cours, "Technologies Des Véhicules Hybrides", Sts M.V, 2ème Année
- [12]: Pesaran, A., & Markel, T. (2010). Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System. Oak Ridge National Laboratory.
- [13] : Pierre Caillar "Conception Par Optimisation D'une Chaîne De Traction Electrique Et De Son Contrôle Par Modélisation Multi-Physique" Thèse De Doctorat, Ecole Centrale De Lill, Novembre 2015
- [14]: T. A. Burrese, S. L. Campbell, C. L. Coomer, C. W. Ayers, A. A. Wereszczak, J. P. Cunningham, L. D. Marlino, L. E. Seiber, H. T. Lin Evaluation Of The 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System.

- [15]: D. Swierczynski, M. Kazmierkowski, F. Blaabjerg, "Dsp Based Direct Torque Control of A Permanent Magnet Synchronous Motor (Pmsm) Using Space Vector Modulation (Dtc-Svm)", 2002 Ieee.
- [16]: A. Kaddouri, "Etude D'une Commande Non-Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents", Faculté Des Sciences Et De Génie, Université Laval Québec, Nov 2000
- [17]: Shabari, A. TOYOTA Hybrid System -Course 071 2-1.
- [18]: Mert Mokukcu, « Optimisation énergétique d'un véhicule hybride ». Université Parissaclay, France, 2018
- [19]: Hibatallah Bouker "Conception et optimisation des machines synchrones à aimants permanents à haute vitesse dédiées aux véhicules électriques hybrides " thèse de doctorat Université Paris Saclay 2016
- [20]: Conception et commande d'un moteur synchrone à aimants permanents (07/2019 univ KASDI MERBAH OUARGLA)
- [21]: Simulation numérique par élément finis d'une machine à aimant permanent (2020/2021 univ KASDI MERBAH OUARGLA)
- [22]: M. Nassim, G. Mohammed « Commande en vitesse et en position d'une MSAP », diplôme de Master Académique en Electrotechnique de l'Université de Msila. 2017
- [23]: A.brahimi, K.Abdelmounaim, «Détection De Défaut Statorique Par Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents» diplôme de Master Université Kasdi Merbah Ouargla. 2014
- [24]: Hervé ROISSE, « Contribution à la modélisation des systèmes électrotechniques par la Méthode des réseaux de perméances couples. Application aux machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat à L'UNIVERSITE DE LILLE, 07 Janvier 1998
- [25]: C. Mabrak, A. May, « Calcul analytique et numérique des machines synchrones à aimants permanents montés sur la surface rotorique », Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Ecole nationale polytechnique, Juin 2008
- [26]: T. Sebastian and G. R. Sln, Modelling of permanent magnet synchronous motors, vol. M, no. 5, pp. 106931071, 1986.
- [27]: B. Qu, Q. Yang, Y. Li, M. A. Sotelo, S. Ma, and Z. Li, A Novel Surface Inset Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles.
- [28]: A. Kronberg, Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency, 2012.
- [29]: M. OUNNADI, Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents, Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri de tiziouzou, 2011.

[30] : K. B. Naouel, "Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances(MRR) d'une machine à reluctance variable", Thèse de doctorat, University of sciencesand technology in Oran, 2015

[31] : B. NEDJAR, "Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue del'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation", Thèse dedoctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2011

[32] : Stéphane Baron, « *Outils pédagogique pour l'apprentissage des méthodes numérique* » mémoire pour obtenir le diplôme de recherche technologique en génie électrique et systèmes technologique en génie électrique et systèmes intelligents, Université de Picardie Jules Verne, 2001

[33] : Mourad HELLAL Salim RAMDANE Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts (le 25 septembre 2017)

[34] : Dhat. D, Touzout. G, « Une présentation de la méthode des éléments finis », Edition Maloine,Paris 1984

[35] : Davat.B, « Modélisation des dispositifs électromagnétiques », Thèse de Doctorat èsSciences Physique, INP, Toulouse 1984