



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie électrique
Machine électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
BARKET Dalel et DRIDI Salima

Le : [Click here to enter a date.](#)

Modélisation de la machine à réluctance variable dans les véhicules hybrides utilisant la méthode des éléments finis

Jury :

M.	Alloui Lotfi	Pr	Université de Biskra	Président
M.	Khene Mohamed Lotfi	Pr	Université de Biskra	Examineur
M.	Zouzou salah eddine	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
Génie électrique
Machine électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Modélisation de la machine à réluctance variable dans les véhicules hybrides utilisant la méthode des éléments finis

Le :

Présenté par :

BARKET Dalel et DRIDI Salima

Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciement

Avant tout, nous louons et remercions Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé le courage, la volonté, la patience et la santé tout au long de nos .années d'études. C'est grâce à Lui que ce travail a pu être mené à bien

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrant, **M. Zouzou Salah-Eddine**, pour ses précieux conseils et ses orientations éclairées, qui ont été pour nous une véritable boussole durant toute .la période de réalisation de ce projet*

J'adresse également mes remerciements les plus sincères à l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour les efforts qu'ils ont déployés dans notre formation académique

Dédicace

À mon cher père "DJamal", mon premier modèle, qui m'a appris la patience et la persévérance, et qui a toujours été mon soutien à chaque étape...

À ma chère mère "Souad", source de tendresse, dont les prières sincères ont été la clé de ma réussite...

À mes frères et sœurs, compagnons de route et de souvenirs,

Et en particulier à ma sœur bien-aimée "Fatima Zahra", dont le soutien et les encouragements ont été une véritable bénédiction dans ma vie...

À mes amis qui ont partagé ce chemin avec moi, et m'ont soutenu dans les moments de défi et d'accomplissement...

À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, par un mot, une idée, ou un geste d'encouragement...

À vous tous, j'offre le fruit de cet effort, avec tout mon cœur et ma gratitude, en témoignage d'amour et de reconnaissance que les mots ne sauraient exprimer pleinement.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À l'être les plus chers de ma vie :

Mon père "Hacene" et ma mère "Hadda"

À mes petits-enfants : Asma - Ayoub - Amani

À mon mari : Samir

À mes chers frères et sœurs : Abdelhamme - Abdellah - Sara - Amira
et leurs enfants

À toutes mes amies

À toute ma famille

À toutes personnes ayant participé à ma réussite

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة نمذجة آلة الممانعة المتغيرة بطريقة العناصر المحدودة (FEM) في الأداء العادي باستخدام برنامج ANSYS Maxwell الذي يسمح لنا بمحاكاة الآلات. تتيح لنا هذه المحاكاة مراقبة سلوك الآلة وحساب الكميات المختلفة مثل: تيارات الطور، تدفق الطور، الحث المغناطيسي في مناطق مختلفة من الآلة، عزم الدوران الكهرومغناطيسي...إلخ.

الكلمات الرئيسية: آلة الممانعة المتغيرة. تصميم ؛ محاكاة ؛ طريقة العناصر المحدودة

Résumé :

Cet mémoire traite la modélisation de la machine à réluctance variable par la méthode des éléments finis (M.E.F) en fonctionnement sain à l'aide du logiciel Maxwell Ansys qui nous permet de simuler les machines. Ces simulations nous permettent d'observer le comportement de la machine et calculer les différentes grandeurs comme : les courants des phases, le flux de phase, les inductions magnétiques dans différentes régions de la machine, couple électromagnétique...Etc.

Mots clés : Machine à réluctance variable ; Modélisation ; simulation ; La méthode des éléments finis

Abstract:

This paper deals with the modeling of The Switched Reluctance Machine (SRM)

by the finite element method (F.E.M) in normal functioning using the Maxwell Ansys software which allows us to simulate the machine. These simulations allow us to observe the behavior of the machine and calculate the different quantities such as: phase currents, phase flux, magnetic inductions in different regions of the machine, electromagnetic torque Etc.

Key words: Switched Reluctance Machine (SRM); Modeling; finite element method; simulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	15
Chapitre I : Véhicules électriques et hybrides.....	18
1. Introduction	18
2. Historique sur les véhicules électriques et hybrides	18
3. Classification des véhicules électriques hybrides	20
3.1. Classification par Architectures des VEHs.....	20
3.1.1. Structure série	20
3.1.2. Structure parallèle	21
3.1.3. Hybride série/parallèle.....	21
3.2. Par hybridation	22
3.2.1. Véhicules électriques ‘pur’:.....	24
4. Toyota Prius.....	26
4.1. Etat de l’art de la Toyota Prius	26
4.1.1. Première génération (XW10; 1997).....	26
4.1.2. Deuxième génération (XW20; 2003)	27
4.1.3. Troisième génération (XW30 ; 2009).....	29
4.1.4. Prius hybride rechargeable	30
4.1.5. Prius + (2012)	31
4.1.6 Quatrième génération (XW50 ; 2015).....	32
4.1.7. Cinquième génération (depuis 2022)	34
5. Avantages et inconvénient des véhicules électriques.....	36
5.1. Les Avantages des véhicules électriques	36
6. Conclusion.....	38
Chapitre II : Motorisation électrique dans la Toyota Prius	40
1. Introduction	40

2.	Les composants électriques dans la Toyota Prius	40
2.1.	Unité de contrôle de puissance (PCU)	40
2.2.	Batteries des Véhicules Électriques	42
2.2.1.	Le principe de fonctionnement	42
2.2.2.	Types des batteries	43
2.2.3.	Batterie utilisée dans la Prius.....	44
2.3.	Onduleur de traction dans la Prius	45
2.3.1	Onduleurs	45
2.3.2	Convertisseur DC/DC (201,6 V DC to 500 V DC).....	46
2.3.3	Convertisseur DC/DC (201,6 V CC to 12 V CC)	47
2.4	Moteurs Electriques de traction dans la Prius	49
2.4.1.	Description MG1:	49
2.4.2.	Description MG2:	49
2.5.	Système de transmission planétaire (Planetary Gear System).....	50
3.	Principaux modes de fonctionnement	53
3.1.	Principales améliorations en faveur de la troisième génération.....	54
4.	Entretien du système hybride de la Toyota Prius.....	54
5.	Conclusion.....	56
	Chapitre III : Modélisation du moteur à réluctance variable	58
1.	Introduction	58
2.	La définition de la Machines à reluctance variable	58
2.1.	Historique de la MRV	59
2.2.	Différents types de la MRV.....	59
2.2.2.	Machine à double denture	60
3.	Le principe de fonctionnement d'une MRV.....	61
4.	Domaines d'utilisation	63
5.	Avantages et inconvénients d'une MRV	64

6.	Modélisation du moteur à reluctance variable.....	66
6.1.	Définition d'un modèle mathématique.....	66
6.2.	Modélisation de la MRV	66
6.2.2.	L'inductance	66
6.2.3.	Equations électrique	67
6.2.3	Equation mécanique	69
7.	Conclusion.....	71
Chapitre IV : Modélisation de la MRV par méthode éléments « ANSYS Maxwell »		73
1.	Introduction	73
2.	La méthode des éléments finis (FEM)	73
2.1	Principe de la méthode des éléments finis.....	73
3.	Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	74
3.1.	Avantages	74
3.2.	Inconvénients.....	74
4.	Implémentation du modèle dans l'ansys Maxwell	74
5.	Conception de la machine à réluctance variable	75
Spécifications des matériaux du MRV 18/12		77
5.2.	Maxwell Designs	77
5.2.1	Types de Maxwell Designs- RMxpirt	77
5.2.2	Maxwell GUI (Graphical user interface).....	78
5.2.3	Maxwell Geometry	83
1.	Résultats d'analyse du modèle avec '' Ansys Maxwell''	84
6.1.	Caractéristiques électriques et mécaniques	85
6.2.	Les pertes	85
2.	Extraction des données de performance à partir de RMxpirt dans ANSYS Maxwell	86
3.	Analyse électromagnétique 2D dans Maxwell	92
8.1.	Maillage de la machine a reluctance variable.....	92

8.2. Analyse de flux magnétique dans la machine.....	93
8.3. Analyse du potentiel magnétique vectoriel dans la machine.....	94
8.4 Couple électromagnétique dans la machine	95
8.5 Courants dans la machine.....	95
Conclusion	97
CONCLUSION GENERALE.....	99

TABLEAU DES FIGURES

Figure 1	Chaine de traction hybride série	20
Figure 2	Chaine de traction hybride parallèle	21
Figure 3	Chaine de traction hybride série-parallèle	22
Figure 4	les familles de véhicules hybrides et électriques	24
Figure 5	Véhicule tout électrique	25
Figure 6	Toyota Prius (NHW10, first generation).....	27
Figure 7	Photo de la Toyota Prius I et II (XW10/XW11/20)	28
Figure 8	Photo de la Toyota Prius III (XW30).....	30
Figure 9	Prototype de Prius III Plug-in Hybrid (avril 2011).....	31
Figure 10	Photo de la Toyota Prius +	31
Figure 11	Toyota Prius IV Business Edition+ PHEV	32
Figure 12	Toyota Prius restylée à Los Angeles en 2019	34
Figure 13	Photo de la Toyota Prius 5(2022)	35
Figure 14	Configuration de la chaine de traction de la Prius.....	41
Figure 15	Configuration de la chaine de traction de la Prius.....	42
Figure 16	Vue interne d'une batterie	43
Figure 17	Modèle statique équivalent de la batterie.....	43
Figure 18	Batterie Ni-MH de la Toyota Prius.....	44
Figure 19	Batterie Ni-MH de la Toyota Prius.....	45
Figure 20	Onduleur de traction dans la Prius.....	46
Figure 21	Convertisseur DC/DC (201,6 V DC to 500 V DC)	47
Figure 22	Convertisseur DC/DC (201,6 V CC to 12 V CC).....	48
Figure 23	Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius	48
Figure 24	Moteurs Electriques de traction dans la Prius	50
Figure 25	Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius	51
Figure 26	Configuration de la chaine de traction de la Prius.....	52
Figure 27	les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride	54
Figure 28	Densité de courant équivalente.....	60
Figure 29	Machine à double denture « vernier »	60
Figure 30	Machine à réluctance variable à double saillance MRVDS 6/4	61
Figure 31	Structure élémentaire d'une MRV monophasée.....	61

Figure 32 Positions extrêmes de la MRV élémentaire	62
Figure 33 Séquences d'alimentation des phases pour produire un mouvement de.....	63
Figure 34 MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle.....	64
Figure 35 MRV pour une machine à laver	64
Figure 36 Circuit équivalent d'une phase électrique du MRV	67
Figure 37 Géométrie du moteur MRV 18/12	75
Figure 38 Interface de ansys maxwell	78
Figure 39 interface de Project manager	79
Figure 40 interface de History Tree.....	80
Figure 41 Les coordonnées	80
Figure 42 Type de Solution(Maxwell 2D)	81
Figure 43 une géométrie	83
Figure 44 Création de coordonnées de systèmes	83
Figure 45 Création de géométrie à partir de primitives	84
Figure 47 Courbe du Flux en fonction de le courant à différentes positions	87
Figure 48 Courbe du courant continu d'entré en fonction de la vitesse.....	88
Figure 49 Courbe du le rendement en fonction de la vitesse de rotation.....	88
Figure 50 Courbe de variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation.....	89
Figure 51 Courbe du le couple mécanique en fonction de la vitesse de rotation.....	89
Figure 52 forme du courant de phase issue de la simulation	90
Figure 53 variation du courant de phase maximal en fonction du degré électrique.....	90
Figure 54 Courbe de couplage de flux en fonction de de l'angle électrique.....	91
Figure 55 la variation de l'inductance en fonction l'angle électrique	91
Figure 56 Forme d'onde carré de la tension de phase.....	92
Figure 57 Maillage d'un segment de machine à réluctance variable dans Ansys Maxwell....	93
Figure 58 Répartition de la densité de flux magnétique (B) à l'intérieur du moteur	93
Figure 59 Répartition de potentiel vecteur (A) à l'intérieur du moteur	94
Figure 60 Évolution du couple électromagnétique instantané obtenu lors de la simulation transitoire	95
Figure 61 Répartition des courant s'alimentation du moteur.....	96

TABLEAU DES TABLEAUX

Tableau 1 Synthèse types d'hybride et le gain en carburant relative.....	23
Tableau 2 Synthèse des diverses architectures des VEHs.....	25
Tableau 3 Caractéristiques techniques de la Prius I (type XW10)	27
Tableau 4 Caractéristiques techniques de la Prius II (XW10/XW11/20	29
Tableau 5 Caractéristiques techniques de la Prius III (XW30	30
Tableau 6 Caractéristiques techniques de la Prius IV.....	33
Tableau 7 Caractéristiques techniques de la Prius IV.....	35
Tableau 8 Caractéristiques techniques de la Prius IV.....	36
Tableau 9 Spécifications des composantes des convertisseurs statiques dans la Prius.....	46
Tableau 10 Paramètres géométrique du MRV	75
Tableau 11 Comparaison entre IPMSM et MRV*	76
Tableau 12 Matériaux utilisés dans le MRV 18/12.....	77
Tableau 13 Caractéristiques électriques et mécaniques.....	85
Tableau 14 Pertes principales générées par le moteur MRV	85

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de la traction électrique a connu un essor considérable ces dernières années. Les véhicules électriques hybrides (VEH) et les véhicules électriques (VE) se sont largement imposés sur le marché automobile mondial grâce à leur haute efficacité énergétique et à la réduction significative des émissions de gaz à effet de serre, tout en devenant de plus en plus abordables. De nombreux constructeurs automobiles développent actuellement de nouveaux modèles de VEH et de VE. L'un des principaux défis réside dans la conception de machines de traction répondant à des critères tels que l'efficacité, la fiabilité, la robustesse et un coût réduit. D'un point de vue industriel, les machines les plus couramment utilisées dans ces véhicules sont : les machines synchrones à aimants permanents et les machines asynchrones.

La machine à réluctance variable constitue une alternative prometteuse, car elle ne nécessite pas d'aimants permanents dans sa structure et peut offrir des performances satisfaisantes en termes de rendement, de fiabilité et de coût, ce qui la rend attrayante pour l'industrie. Parmi les entreprises qui s'y intéressent, on trouve Toyota, qui a développé un prototype de machine à réluctance variable à haute densité de couple, destinée à remplacer la machine synchrone à aimants permanents dans la nouvelle génération de ses véhicules hybrides.

Cette machine se distingue par sa simplicité de conception et sa tolérance élevée aux défauts grâce à sa redondance. Cependant, elle présente deux inconvénients majeurs : une ondulation de couple importante et un bruit acoustique élevé. Par ailleurs, cette technologie est caractérisée par un comportement fortement non linéaire et un couplage prononcé entre ses paramètres, rendant son contrôle plus complexe par rapport aux autres types de machines.

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir un moteur à réluctance variable (MRV) de 18/12 pôles, en se basant sur des dimensions identiques à celles d'un moteur synchrone à aimants permanents utilisé dans la Toyota Prius de 2010, et de simuler sa conception géométrique à l'aide du logiciel ANSYS Maxwell, dans le but d'en extraire les caractéristiques électromagnétiques. L'approche de modélisation adoptée est celle par éléments finis.

Le **premier chapitre** est consacré à une étude générale sur les véhicules électriques et hybrides avec la présentation de véhicule Toyota-Prius en présentant leurs différentes générations,

Dans le deuxième chapitre, nous avons commencé par un état de l'art sur la Toyota Prius, nous avons étudié en suite quelque partie de la chaine de traction de ce véhicule telle que la batterie, les convertisseurs statiques DC/DC bidirectionnel, onduleur et la machine électrique de traction en basant sur la technique de la commande de cette dernière

Dans le **troisième chapitre**, Nous présenterons les classifications structurales des machines à réluctance variable et le principe de fonctionnement pour une structure de MRV monophasée élémentaire. Cette partie est suivie par la représentation de la conversion d'énergie pour les types de ces machines avec quelques applications dans l'industrie.

Le quatrième **chapitre** contient les paramètres dimensionnels de prototype réel de MRV 18/12 sur lesquels nous appliquerons la méthode de calcul par éléments finis avec la validations des résultats sur le prototype proposé.

CHAPITRE

I

Chapitre I : Véhicules électriques et hybrides

1. Introduction :

Le secteur des transports, et plus particulièrement le parc automobile, constitue aujourd'hui un enjeu majeur en matière de consommation énergétique et d'impact environnemental. Pour améliorer l'efficacité des véhicules, deux solutions technologiques émergent : l'intégration de systèmes hybrides combinant moteur thermique et propulsion électrique – avec des degrés variables d'électrification –, et le développement de véhicules entièrement électriques, dont l'adoption reste néanmoins limitée par des défis persistants liés à l'autonomie des batteries et aux coûts de production.

L'essor des véhicules hybrides, particulièrement marqué depuis le début du XXI^e siècle, s'inscrit dans un contexte réglementaire mondial orienté vers la transition écologique. Des accords internationaux comme le Protocole de Kyoto (1997) et l'Accord de Paris sur le climat (2015) ont accéléré les investissements des constructeurs automobiles dans cette technologie. Des groupes industriels tels que Toyota, Honda et Ford ont ainsi développé des modèles hybrides commercialement viables, à l'instar de la Toyota Prius. Lancée en 1997, cette dernière est devenue un symbole pionnier de l'écomobilité, démontrant la faisabilité technique et l'acceptation croissante de ces véhicules par le grand public.

2. Historique sur les véhicules électriques et hybrides :

Un véhicule électrique repose sur deux éléments clés : **un moteur électrique** et **un système de stockage d'énergie par batteries**. Le fonctionnement du moteur électrique, dont le principe fut découvert par Michael Faraday en 1821, s'est concrétisé à partir de 1832 grâce aux avancées sur l'induction électromagnétique. Cette technologie se substitue au moteur thermique classique en tirant son énergie de batteries rechargeables.

Historiquement, les véhicules électriques ont connu un âge d'or au XIX^e siècle avant de décliner face à l'essor des moteurs à combustion interne, plus performants et alimentés par un carburant alors peu coûteux. Toutefois, depuis la fin du XX^e siècle, une prise de conscience écologique accrue, couplée à la raréfaction des ressources fossiles, a favorisé un retour en force de l'électromobilité.[1]

Les innovations technologiques, notamment dans la densité énergétique des batteries, ont transformé ces véhicules en une alternative crédible pour une mobilité durable. 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. En 1902, la compagnie Krieger construisit quelques prototypes hybrides équipés d'un moteur thermique qui rechargeait les batteries via une dynamo. Ce constructeur basé à Paris fabriquait déjà des véhicules électriques avec roues avant motrices. L'intérêt pour les véhicules hybrides commence à baisser avec le développement des moteurs thermiques et des chaînes de production d'Henry Ford à partir de 1904.

Entre 1910 et 1918, la société Commercial Construction Trucks a produit des véhicules dont le moteur à essence entraîne une génératrice qui alimentait directement le moteur de traction, éliminant ainsi la nécessité d'une transmission ou d'une batterie. En 1969, les voitures hybrides réapparurent après une longue période sans avancée. La General Motors 512 a été conçue pour fonctionner selon trois modes : en tout électrique pour une vitesse inférieure à 10 miles/h, en combiné électricité-essence entre 10 et 13 miles/h et en tout thermique au-delà de 13 miles/h.

L'intérêt pour la technologie hybride revient après l'embargo pétrolier de 1973. Volkswagen développe un véhicule hybride appelé « Taxi » avec la plage de rendement la plus grande de tous les hybrides présentés dans le monde jusque-là puisqu'une commutation est possible entre le moteur électrique et son moteur à essence. En 1989, Audi présente son hybride Duo. C'est un hybride bi-mode dont le moteur électrique, alimenté par une batterie au nickel-cadmium, est connecté aux roues arrière du véhicule alors que le moteur thermique entraîne les roues avant.

L'ère moderne de l'automobile hybride commence en 1997 avec la commercialisation de la Toyota Prius au Japon. Deux ans plus tard, Honda dévoile l'Insight, suivi 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.[1]

3. Classification des véhicules électriques hybrides

3.1. Classification par Architectures des VEHs

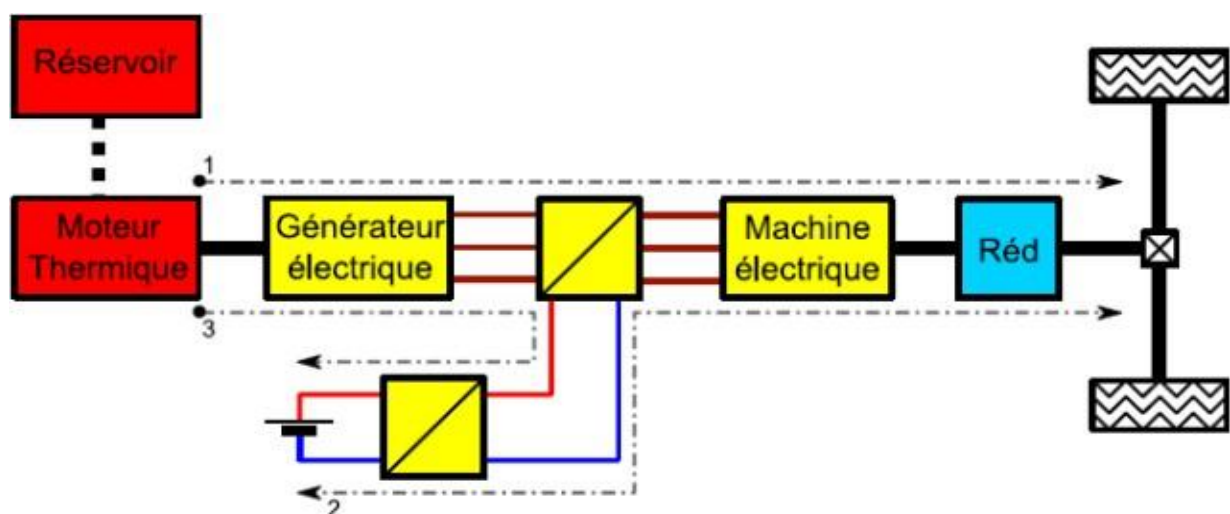
Cette classification est la plus répandue et la plus exhaustive. Elle offre la possibilité d'identifier les couplages impliqués. Ce rapport se concentre sur trois dénominations principales : **hybride série**, **parallèle et mixte**. Les explications suivantes sont généralistes et ne couvrent pas l'intégralité des possibilités offertes par la solution hybride. En ce qui concerne **les modes de fonctionnement d'un VEH**, une modélisation structurelle s'avère nécessaire.[1]

3.1.1. Structure série :

L'hybride série est l'architecture hybride la plus simple et la plus proche d'un véhicule 100% électrique. Dans cette configuration seule la machine électrique est connectée directement à la transmission et donc aux roues, elle doit être dimensionnée pour assurer la traction du véhicule. Le moteur thermique est associé à une génératrice électrique, faisant ainsi office de groupe électrogène et transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. L'électricité ainsi générée peut être emmagasinée dans batterie électrochimique ou être utilisée par le moteur électrique pour propulser le véhicule. La transmission est donc électrique et constitue un avantage par rapport aux autres architectures car étant très flexible. Sur le marché des véhicules hybrides lourds, c'est l'architecture la plus rencontrée.[1]

Le moteur thermique n'étant pas couplé directement aux roues, la stratégie de type «Range Extender» peut être adoptée par ce type d'architecture afin de faire fonctionner le moteur thermique dans une plage de fonctionnement optimale. Ceci permet d'obtenir des véhicules à émissions faibles[3]

Figure 1 Chaîne de traction hybride série



3.1.2. Structure parallèle :

L'hybride parallèle est une évolution de l'architecture des véhicules conventionnels. Le schéma de principe est illustré sur la figure (I.2). Ici, les moteurs électrique et thermique assurent tous les deux la rotation des roues, par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie. Un hybride parallèle se compose d'un moteur thermique, un moteur électrique, une batterie, un inverter, et d'une transmission.

Le moteur électrique, est alimenté cette fois par la batterie et non par le moteur thermique, il fonctionne également en tant que générateur pour recharger la batterie. L'inconvénient est qu'il ne peut produire de l'électricité durant la conduite. Encore une fois 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[4]

3.1.3. Hybride série/parallèle

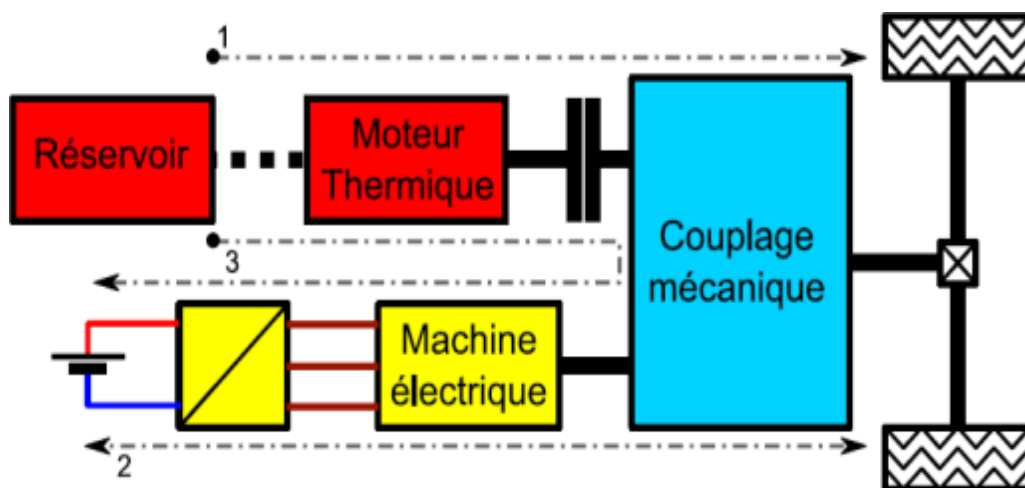


Figure 2 Chaîne de traction hybride parallèle

La catégorie des architectures combinées (mixte) correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie[4]. Ce type de véhicule est constitué d'un moteur thermique, de deux machines électriques et d'une batterie. La première machine (quelques kW) et la seconde (quelques dizaines de kW) réalisent respectivement l'addition de vitesse et l'addition de couple. Cette architecture porte aussi le nom d'hybride à dérivation de puissance, car l'énergie mécanique est prélevée à un endroit de la chaîne de traction (ex: du moteur thermique) et réinjectée à un autre endroit de la chaîne (ex: au moteur électrique). La dérivation de puissance est réalisée via un train planétaire tel qu'il est utilisé dans TOYOTA Prius. Ce concept est connu sous le nom de Power Split Device. Ce composant réalise un accouplement entre le moteur thermique, le moteur électrique et la génératrice.[3]

3.2. Par hybridation :

La classification par hybridation consiste à hiérarchiser les véhicules électriques hybrides en fonction du ratio (exprimé en %) entre la capacité de puissance disponible à partir de la seconde source d'énergie (typiquement des batteries ou super condensateurs dans le cas décrit) 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". Il est important de souligner qu'une définition universelle de la classification par hybridation n'existe pas. Certains auteurs considèrent les fonctionnalités du véhicule (par exemple la capacité en mode tout électrique, l'arrêt du MCI à l'arrêt du véhicule, etc).[4]

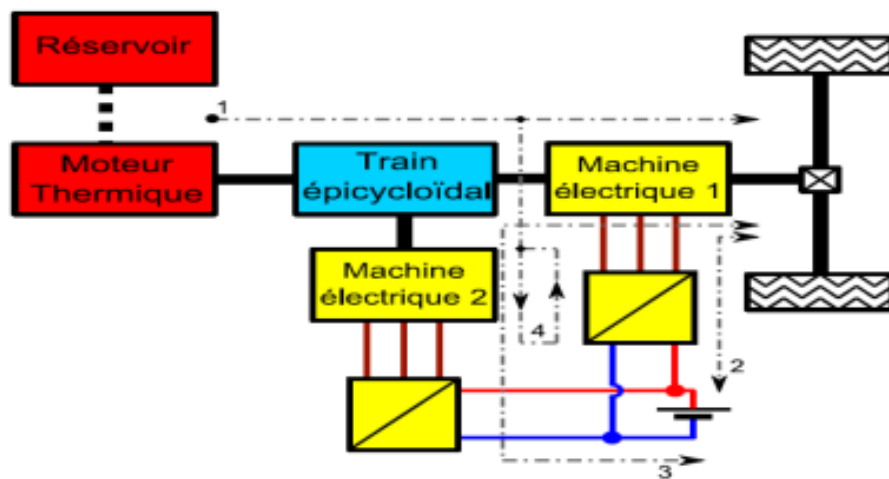


Figure 3 Chaîne de traction hybride série-parallèle

Tableau 1 Synthèse types d'hybride et le gain en carburant relative

Type d'hybride	Fonctions	Gain en carburant sur cycle urbain
Micro hybrid ou Stop & start	Arrêt du (MT) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le MT est stoppé afin de moins consommer ; Redémarrage du MT: (ME) (alternodémarrreur) intégrée redémarre le MT quand le conducteur active la pédale d'accélérateur, Accélération : l'alternodémarrreur peut aider le MT au démarrage et pendant de courtes accélérations ; Mode normal : le MT fonctionne seul, un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier aux acyclismes du MT.	5 à 8 %
Mild hybrid	La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est le remplacement de l'alternodémarrreur par une ME; La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le MT ; La ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants que dans le cas d'un Micro hybrid et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.	20 à 30 %
Full hybrid	Sa configuration est quasiment la même que le Mild-hybrid mais les composants sont encore plus puissants ; La ME propulse souvent le véhicule seul, particulièrement pour une conduite en ville, Le MT peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée. Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.	30 à 40 %

Plug-in hybrid	Son architecture est semblable au Full hybrid mais avec la possibilité de recharger la batterie par une source extérieure, sur le réseau par exemple. La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances. Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full-hybrid.	Aucun carburant consommé en mode tout électrique. Comparable au Full-hybrid lorsque le moteur thermique est utilisé.
----------------	---	---

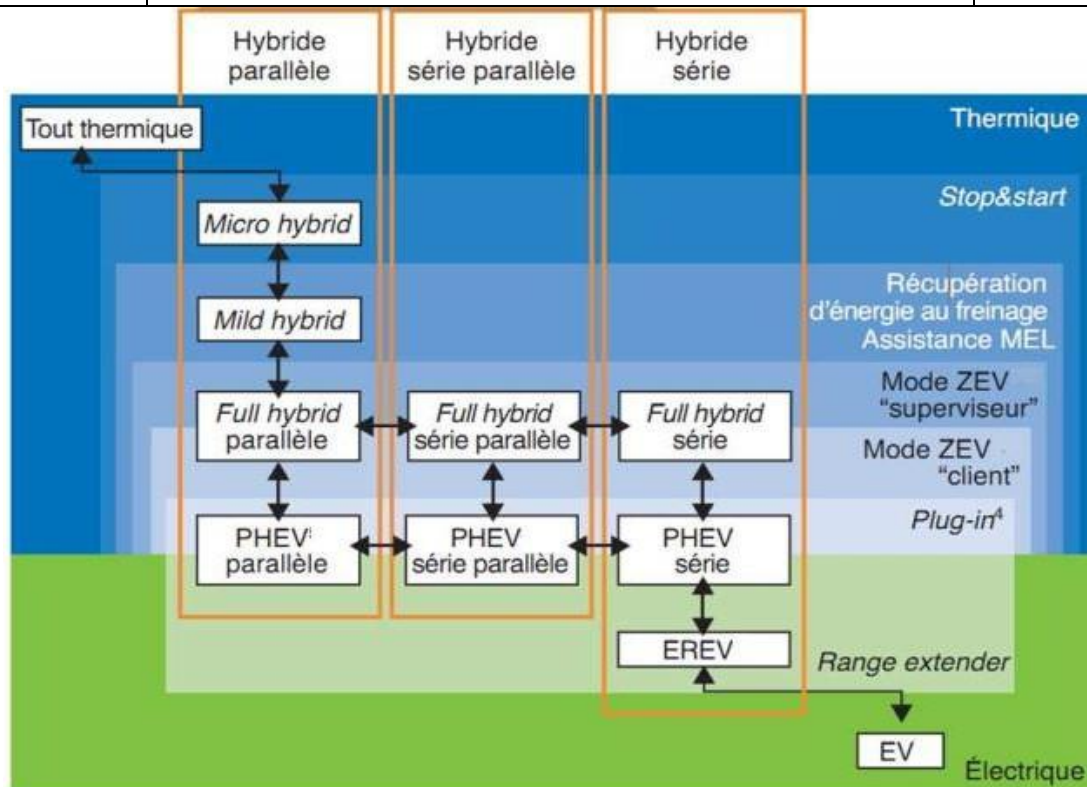


Figure 4 les familles de véhicules hybrides et électriques

3.2.1. Véhicules électriques 'pur' :

La chaîne de traction d'un Véhicule Electrique (VE) moderne est nettement plus simple que celle d'un véhicule thermique ; elle est constituée principalement d'un moteur électrique, d'une source d'énergie électrique et d'une transmission mécanique nettement plus simple.[3] Les véhicules tout électriques proposés actuellement sont, leur autonomie est comprise entre 70 et 120 km avec des technologies de batteries relativement conventionnelles (plombacide et cadmium-nickel) et 150 à 200 km avec des technologies plus avancées (nickel-métal-hydrure et lithium). Le freinage récupératif permet d'accroître sensiblement l'autonomie, surtout en cycle urbain (d'environ 20%).[1]

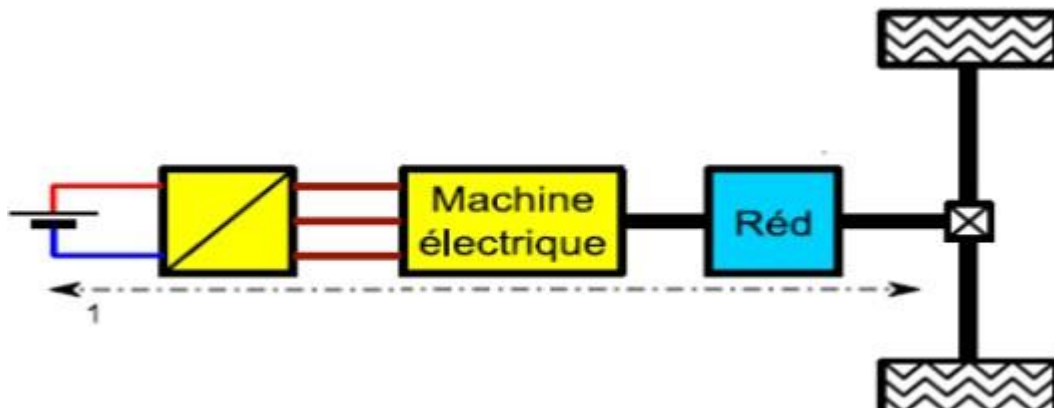


Figure 5 Véhicule tout électrique

Pour une synthèse de diverses architectures, nous récapitulons les avantages et les inconvénients de chaque structure dans le tableau (I.2)

Tableau 2 Synthèse des diverses architectures des VEHS

Architecture	Avantages	Inconvénients
Série	- Bon rendement énergétique en mode tous électrique en zone urbaine. - Gestion relativement facile - Très bon contrôle du moteur Thermique - Bonnes performances dynamiques de la machine électrique de traction (confort d'utilisation).	- Faible rendement énergétique de la chaîne globale en zone extra-urbaine. - Utilisation de trois machines dont une (au moins) de forte puissance. - Mode tous thermique impossible.
Parallèle	- Bon rendement énergétique. - Modes tout électrique et tous thermique possibles. - Utilisation d'une seule machine électrique de puissance plus faible que pour l'architecture série. - Transmission peu modifiée (dans certains cas) par rapport au véhicule conventionnel. - Fourniture d'un couple supplémentaire de la machine électrique	- Gestion délicate. - Fonctionnement du moteur thermique pas toujours optimal. - Couplage mécanique et implantation des composants complexes.

	pour pallier les acyclismes du moteur thermique.	
Série Parallèle	- Bon rendement énergétique. - Tous les modes sont possibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle). - Très bonne répartition de l'énergie. - Pas de rupture de couple à la roue.	- Gestion très délicate. - Couplage mécanique et implantation des composants très complexes. - Utilisation de trois machines. - Coût élevé.
Tout électrique	- Zéro émission. - Silencieux. - Confort d'utilisation.	- Problème d'autonomie - Utilisation urbaine - Coût élevé

4. Toyota Prius :

La Toyota Prius est une génération de véhicules électriques hybrides, est très semblable au full-hybride, avec les deux motorisations (électrique et thermique) de puissance équivalente, puis une batterie avec une capacité encore plus intéressante. La nouveauté pour cette technologie est de permettre la recharge de la batterie sur une source extérieure (grâce à un chargeur et un câble), comme le réseau électrique.[6] Quelques commercialisations de VE sont réalisées à partir des années 1990, mais les chiffres ne sont pas vraiment encourageants. L'association entre le thermique et l'électrique au sein du véhicule hybride rechargeable a eu un grand succès sur le marché, particulièrement en 1997 avec le modèle de la Toyota « Prius ».

Ensuite, depuis les années 2010, le VEHR connaît son essor avec des progrès technologiques importants et plusieurs constructeurs proposent maintenant des modèles hybrides.[6]

4.1. Etat de l'art de la Toyota Prius

La Toyota Prius est une automobile hybride électrique produite par Toyota depuis 1997 avec Cinq générations déjà commercialisées. La dénomination Toyota Prius couvre plusieurs modèles d'automobiles à motorisation hybride, présentant une double motorisation thermique et électrique et équipés du système Hybrid Synergy Drive (HSD)

4.1.1. Première génération (XW10; 1997) :

Toyota Prius (NHW10, première génération) NHW10 (1997–2000) En 1995, Toyota a présenté un concept de voiture hybride au Salon de l'automobile de Tokyo, suivi de tests un an plus tard. La première Prius, modèle NHW10, a été commercialisée le 10 décembre 1997. La première

génération de Prius (NHW10) était disponible uniquement au Japon. À son lancement, la première génération de Prius est devenue la première voiture hybride essence-électrique produite en série au monde. Lors de son introduction en 1997, elle a remporté le prix de la Voiture de l'année au Japon et, en 1998, elle a reçu le prix de la Voiture de l'année décerné par la Conférence des chercheurs et journalistes automobiles au Japon. La production a commencé en décembre 1997 à l'usine de Takaoka à Toyota, Aichi, et s'est achevée en février 2000 après une production cumulée de 37 425 véhicules. Le design de la Prius NHW10 a été créé par des designers basés en Californie, qui ont été sélectionnés parmi plusieurs studios de design de Toyota.[5]



Figure 6 Toyota Prius (NHW10, first generation)

Tableau 3 Caractéristiques techniques de la Prius I (type

XW10)[7] [8]

Moteur et transmission	
Moteurs	1.5
Cylindrée	1 497 cm ³
Puissance maximale	53 à 72 ch
Couple maximal	115 à 4 200 Nm
Transmission	Traction
Boîte de vitesses	E-CVT
Poids et performances	
Poids à vide	1 225 kg
Vitesse maximale	160 km/h
Accélération	0 à 100 km/h en 13,4 s
Consommation mixte	4,6 à 5,9 L/100 km
Émission de CO ₂	138 g/km

4.1.2. Deuxième génération (XW20; 2003):

Présentée en avril 2003 au Salon international de l'automobile de New York pour l'année modèle 2004 aux États-Unis, la Prius NHW20 a été entièrement repensée. Elle est devenue une

berline compacte à hayon, positionnée entre la Corolla et la Camry, avec une réorganisation de l'espace mécanique et intérieur augmentant significativement l'espace pour les jambes à l'arrière et le volume du coffre. Selon l'EPA, la deuxième génération de Prius est plus respectueuse de l'environnement que le modèle précédent. Elle est plus longue de 150 mm (6 pouces) par rapport à la version précédente. Son design aérodynamique de type Kammback équilibre la longueur et la résistance au vent, avec un coefficient de traînée de $C_d=0,26$. L'effort de développement, dirigé par l'ingénieur en chef Shigeyuki Hori, a conduit à l'enregistrement de 530 brevets pour ce véhicule.[5]

La production a commencé en août 2003 à l'usine de Tsutsumi à Toyota, Aichi, et a été complétée en octobre 2004 par l'usine de Fujimatsu à Kariya, Aichi. La Prius utilise un compresseur de climatisation entièrement électrique, une première dans l'industrie automobile. Combinée à une batterie NiMH plus petite et plus légère, la XW20 est plus puissante et plus efficace que la XW10. Aux États-Unis, la batterie des modèles 2004 et suivants est garantie pour 150 miles (240 km) ou 10 ans dans les États ayant adopté les normes d'émissions plus strictes de la Californie, et pour 100 000 miles (160 000 km) ou 8 ans ailleurs.[5]



Figure 7 Photo de la Toyota Prius I et II (XW10/XW11/20)

Tableau 4 Caractéristiques techniques de la Prius II (XW10/XW11/20[7] [8])

Moteur et transmission	
Moteurs	- A essence 1,5 L, 14, DOHC 16 soupapes, à cycle Atkinson - Electrique: 500V, 400 Nm à 0 tr/min, 28 hp (20.9 kW) à 36 hp (26.8 kW)
Puissance maximale	Totale : 110 ch
Couple maximal	115 Nm à 4 200 tr/min (moteur à essence seul) ; 478 (pour l'ensemble) Nm
Batterie	201.6-volt en Ni-MH
Transmission	Traction, E-CVT (train épicycloïdal)
Poids et performances	
Poids à vide	1 320 kg
Consommation mixte	4,3 ⁴ L/100 km
Émission de CO ₂	104 g/km

4.1.3. Troisième génération (XW30 ; 2009) :

Toyota a dévoilé la nouvelle Prius (modèle américain de l'année 2010) lors du Salon international de l'automobile d'Amérique du Nord en janvier 2009, et les ventes ont débuté au Japon le 18 mai 2009. Toyota a réduit le prix de la Prius de 2,331 millions de yens à 2,05 millions de yens pour mieux concurrencer la Honda Insight, ce qui a conduit certains à se demander si l'augmentation des ventes de la Prius ne se ferait pas au détriment des ventes d'autres véhicules à plus forte marge. La concurrence des hybrides moins chères, comme la Honda Insight, a également rendu difficile pour Toyota de tirer pleinement parti du succès de la Prius. En juin 2013, Toyota avait vendu environ 1 688 000 unités de la troisième génération de la Prius dans le monde. Parmi les nouvelles caractéristiques de série de la Prius, Toyota a introduit trois modes de conduite sélectionnables par l'utilisateur : Mode EV : permet un fonctionnement uniquement électrique à basse vitesse. Mode Eco : optimise l'efficacité énergétique. Mode Power : améliore les performances.[5]



Figure 8 Photo de la Toyota Prius III (XW30)

:

Tableau 5 Caractéristiques techniques de la Prius III (XW30) [7] [8]

Moteur et transmission	
Moteurs	- A essence 1,8 litre, I4, DOHC 16 soupapes, 98 ch (73 kW) à 5 200 tr/min, 142 Nm, cycle Atkinson, VVT - Electrique: 650 V, 207 Nm à 0 tr/min, 36 ch (27 kW)
Puissance maximale	Totale : 134 ch (100 kW)
Batterie	201.6-volt en Ni-MH
Transmission	Traction, E-CVT (Train épicycloïdal)
Poids et performances	https://fr.wikipedia.org/wiki/Train_épicycloïdal
Poids à vide	1 370 kg
Vitesse maximale	180 km/h
Consommation mixte	3,8 L/100 km
Émission de CO ₂	89 ⁵ g/km

4.1.4. Prius hybride rechargeable :

Une version Plug-in Hybrid de la Prius III est présentée lors de différents salons en 2009. Des expérimentations sont menées au cours de l'année 2010 au Japon, aux États-Unis et en France, à Strasbourg pour déterminer les conditions dans lesquelles sont utilisés les VHR et l'infrastructure de charge.

La version de série de la Toyota Prius III hybride rechargeable (Plug-in) a été présentée au Salon de l'automobile de Francfort en septembre 2011 et sa commercialisation a débuté en Europe au cours de l'été 2012.

Ce nouveau modèle est équipé d'une batterie lithium-ion de 4,4 kWh qui autorise jusqu'à 23 km d'autonomie en mode électrique. Le temps de recharge via une prise classique est de 90 minutes. Cette version rechargeable est dotée des mêmes moteurs que la Prius III classique : à essence 1,8 L de 100 ch, associé à un moteur électrique de 81 ch. Au total, la combinaison des deux moteurs offre une puissance de 136 chevaux. Toyota annonce une consommation moyenne en cycle mixte de 2,2 L/100 km et un taux de CO₂ de 49 g/km (chiffres en cours d'homologation européenne).[5]



Figure 9 Prototype de Prius III Plug-in Hybrid (avril 2011).

4.1.5. Prius + (2012):

La Prius + ou PRIUS α (ZVW40W) est une Prius monospace a été présentée au salon de Détroit en 2011. Lancée en mai 2011 au Japon sous le nom de « Prius Alpha », elle est commercialisée à partir de juin 2012 en Europe sous le nom de « Prius + ». Comme les Prius rechargeables elle bénéficie de la technique des batteries Litium-ion plus compactes que celles des Prius non-rechargeables. Ces batteries sont donc placées entre des deux sièges avant pour faire place à deux sièges supplémentaires dans le coffre, tout au moins sur les versions européennes.[5]



Figure 10 Photo de la Toyota Prius +

4.1.6 Quatrième génération (XW50 ; 2015) :

La quatrième génération de la Prius a été présentée pour la première fois en septembre 2015 à Las Vegas et a été mise en vente pour les clients au détail au Japon le 9 décembre 2015.

Le marché nord-américain a été concerné en janvier 2016, et en février en Europe et au Moyen-Orient. En août 2013, Satoshi Ogiso, directeur général de Toyota et ingénieur en chef de la gamme Prius, a annoncé certaines améliorations et caractéristiques clés de la prochaine génération de Prius. Ce fut la première génération de la Prius à utiliser la plateforme modulaire Toyota New Global Architecture (TNGA), offrant un centre de gravité plus bas et une rigidité structurelle accrue. Ogiso a également expliqué que la Prius hybride rechargeable de nouvelle génération, la Prius Prime, a été développée en parallèle avec le modèle Prius standard. Le modèle Prius Eco de l'année 2018 s'est classé comme la deuxième voiture à essence la plus économe en carburant sans capacité de recharge disponible aux États-Unis cette année-là, après la Hyundai Ioniq Blue hybride.[5]



Figure 11 Toyota Prius IV Business Edition+ PHEV

Tableau 6 Caractéristiques techniques de la Prius IV[7] [8]

Moteur et transmission	
Énergie	Essence et électrique
Moteur	4-cylindres
Cylindrée	1 798 cm ³
Puissance maximale	98 (thermique) ; 122 (combiné) ch Euro 6 (66 kW)
Transmission	Traction AV, intégrale
Boîte de vitesses	E-CVT
Poids et performances	
Poids à vide	1 280 à 1 388 kg
Vitesse maximale	180 km/h
Consommation mixte	1,42 à 5,35 L/100 km
Émission de <u>CO₂</u>	32 à 144 g/km

Au salon de Los Angeles 2018, Toyota présente la phase deux de la quatrième génération de Prius, avec une version E-Four à quatre roues motrices, Elle à une retouche à la fois cosmétique et technologique. Extérieurement, le style de la face avant devient plus « sage ». Finis les feux tarabiscotés, place à des optiques un peu plus conventionnelles. Le bouclier avant est aussi redessiné. On se rapproche de la version rechargeable de la Prius. A l'arrière en revanche, on « tarabiscote ».

Très verticaux sur l'ancienne version, les feux passent à l'horizontale avec une partie qui déborde sur le hayon. En forme de « Z », ils sont sans doute moins sujets à la casse lors d'un léger choc sur le parechoc .C'est aussi techniquement que cette Toyota Prius évolue. En effet, elle bénéficie de ce que Toyota appelle le « Hybrid AWD-i: hybride quatre roues motrices-i ». C'est un nouveau système 4×4 hybride électrique intelligent qui amène une conduite plus sûre et plus apaisante. En gros, un autre moteur électrique est placé sur l'essieu arrière .



Figure 12 Toyota Prius restylée à Los Angeles en 2019

4.1.7. Cinquième génération (depuis 2022)

La cinquième génération de Toyota Prius est présentée le 16 novembre 2022 au salon de l'automobile de Los Angeles, vingt-cinq ans après la première génération. Elle est commercialisée au printemps 2023.

La Prius V est plus longue et plus basse que la quatrième génération, tandis que l'empattement grandit. Elle reçoit des jantes de 19 pouces et un pare-brise reculé, ainsi qu'une nouvelle signature lumineuse en forme de crochets. L'écran central tactile mesure 12,3 pouces et l'instrumentation numérique 7 pouces. Comme pour sa prédécesseure, cette cinquième génération de Prius propose, en option, un toit doté de panneaux solaires .[5]

Caractéristiques techniques

La Prius repose sur la seconde génération de la plateforme technique TNGA GA-C de Toyota³⁵.

Motorisations

La Prius V est disponible en version hybride à l'international, et uniquement en hybride rechargeable en Europe³⁶. La nouvelle Prius est équipée d'un quatre cylindres essence 2 l de 148 ch et d'un moteur électrique de 160 ch. L'ensemble délivre une puissance combinée de 194 ch sur la version non rechargeable et 223 ch pour la version rechargeable associée à une batterie au lithium-ion de 13,6 kWh. Alors que celle de la Prius IV avait une capacité de 8,8 kWh, cette batterie permet d'augmenter l'autonomie électrique de la Prius hybride rechargeable de 50 % (70 km)³⁴. Celle-ci dépasse les 100 km avec des jantes de 17 pouces.[5]



Figure 13 Photo de la Toyota Prius 5(2022)

Tableau 7 Caractéristiques techniques de la Prius IV[7] [8]

Moteur et transmission	
Énergie	Essence et Électricité
Moteur(s)	Essence : 4-cyl. 2.0 148 ch + moteur électrique synchrone à aimants permanents 160 ch
Position du moteur	Transversale avant
<u>Puissance maximale</u>	223 ch DIN
Transmission	Traction ou intégrale
Boîte de vitesses	e-CVT

Pour avoir une idée sur des caractéristiques de conception et des spécifications publiées des Prius nous représentons dans le tableau I.6 des comparaisons des VEH Prius 2008 LS 600h, Hybrid Camry, Prius 2004 et Prius 2004

Tableau 8 Caractéristiques techniques de la Prius IV[8]

Caractéristiques de conception	2008 LS 600h	Camry Hybrid	Prius 2004	Prius 2010
Puissance de pointe du moteur	165KW @ 5250 Révolutions par minute	105KW @ 4500 tr/min	50KW @ 1200- 1540 tr/min	60 KW
Couple nominal de pointe du moteur	300 Nm	270 Nm	400 Nm	207 Nm
Indice de vitesse de rotation	10.230 tr/min	14.000 tr/min	6.000 tr/min	13.500 tr/min
Générateur séparé utilisé	oui	oui	oui	oui
Source de puissance MG2	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur
Conception du rotor de la MSAP	AP intérieurs avec configuration triangulaire	PM intérieurs Avec configuration en «V»	Similaire à Camry	Similaire à Camry
Configuration de l'enroulement du moteur	Parallèle	Parallèle	Série	Série
Nombre de pôles du rotor	8	8	8	8
Bi-directional dc-dc convertir output voltage	~288-650 Vdc	250-650 Vdc	200-500 Vdc	200-650 Vdc
Tension de sortie du convertisseur DC-DC bidirectionnel	36.5 Kw	30 Kw	20 Kw	27 Kw
Refroidissement de la MSAP	Identique à Camry encore avec des gicleurs d'huile pour stator	Circulation d'huile et eau / glycol échangeur de chaleur	Similaire à Camry	Identique à Camry pourtant pas de direct échangeur de chaleur
Refroidissement du convertisseur	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol
Transmission hybride	Identique à Camry pourtant ravigneaux haut et bas rapport utilisé pour la réduction de vitesse	Engrenage planétaire utilisé pour la réduction de vitesse et la division du pouvoir	Un seul engrenage planétaire utilisé pour la répartition de la vitesse et de la puissance	Similaire à Camry
Batterie de haute tension (HV) Ni-MH Refroidi par ventilateur	288V, 6.5 Ah, 36.5 Kw	244.8V, 6.5 Ah, 30 Kw	201.6V, 6.5 Ah 20 Kw	201.6V, 6.5 Ah, 27 Kw

5. Avantages et inconvénient des véhicules électriques

5.1. Les Avantages des véhicules électriques :[4]

Les VE possèdent de nombreux avantages :

- ❖ Ne pas polluer l'environnement.
- ❖ Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.

- ❖ Le démarrage est très rapide.
- ❖ Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages.
- ❖ Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 40(par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- ❖ L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composé de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- ❖ Leurs chaînes de conversion est réversible et elle peut permettre la récupération d'énergie dans les descentes ou lors des freinages

5.1. Les inconvénients des véhicules électriques :

Les inconvénients notables d'un véhicule électrique concernent son système de stockage d'énergie

- ❖ Une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie.
- ❖ Une longue durée de recharge ou une puissance excessive de charge.
- ❖ La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.
- ❖ D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, les véhicules hybrides électriques ont été présentés en mettant l'accent sur l'architecture de la chaîne de traction et les stratégies de contrôle. Certaines architectures de véhicules, comme le mode parallèle ou le mode à répartition de puissance, sont principalement choisies par les constructeurs pour la production de leurs voitures.

Le choix est généralement fait afin d'adapter un véhicule thermique conventionnel en un véhicule hybride. De plus, le dimensionnement des composants suit la même méthodologie : la taille du moteur à combustion interne (ICE) reste généralement identique à celle du véhicule thermique, et le choix du pack batterie est limité par l'espace disponible dans le véhicule.

La stratégie de contrôle, qui est directement liée à l'architecture du véhicule et à la taille des composants, doit prendre en compte le manque d'énergie d'une batterie de petite taille ainsi que le meilleur point de fonctionnement d'un moteur thermique surdimensionné. Comme décrit dans la littérature, plusieurs solutions offrent de très bons résultats en termes de consommation de carburant, mais la stratégie de contrôle est fortement contrainte par ce mauvais dimensionnement. Cela conduit à des contrôles en temps réel très efficaces pour les trajets urbains, mais qui ne peuvent pas atteindre les performances des contrôles effectués.

CHAPITRE

II

Chapitre II : Motorisation électrique dans la Toyota Prius

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des différents composants de la chaîne de traction hybride, en particulier celle de la Toyota Prius. La chaîne de traction électrique se compose généralement de sources d'énergie (telles que les batteries, les piles à combustible (PAC) ou les supercondensateurs (SC)) et de récepteurs (principalement le moteur de traction et les systèmes auxiliaires). La gestion de l'énergie entre ces éléments nécessite l'utilisation de convertisseurs statiques afin d'assurer un transfert optimal et contrôlé de l'énergie.

La principale source de stockage de l'énergie dans ce système est la batterie, laquelle est couplée à un convertisseur continu–continu bidirectionnel. Le stockage de l'énergie représente un défi majeur pour une adoption généralisée des véhicules électriques. En effet, la densité énergétique des batteries reste inférieure à celle des carburants fossiles, ce qui engendre un poids plus élevé pour une autonomie plus réduite. De plus, le coût élevé des batteries ainsi que le temps de recharge, bien plus long qu'un simple ravitaillement en

2. Les composants électriques dans la Toyota Prius

Dans ce paragraphe nous décrivons les évaluations des caractéristiques de conception et d'emballage des sous-systèmes de VEH Toyota Prius III. Après avoir fourni une description générale de la conception du véhicule, des explications sur les fonctionnalités du système hybride sont présentées avec des illustrations et des photographies d'accompagnement.

2.1. Unité de contrôle de puissance (PCU)

Dans cette partie nous allons faire une exposition approfondie qui commence par l'unité de contrôle de puissance (PCU: power control unit), dans lequel les composants du convertisseur et de l'onduleur tels que les dispositifs EP et les condensateurs sont entièrement examinés.

L'unité de contrôle de puissance (PCU) de la Prius III est un dispositif associé à un convertisseur DC-DC bidirectionnel, un convertisseur pour moteur et un convertisseur pour la génératrice, leurs emplacements généraux sont illustrés à la figure (15).

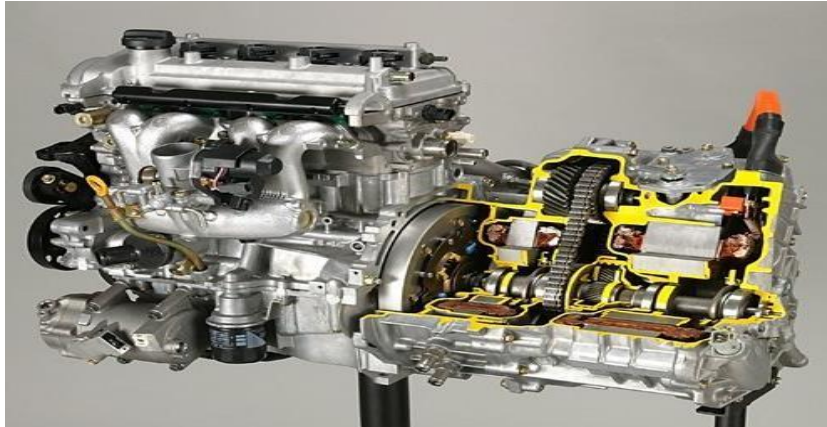
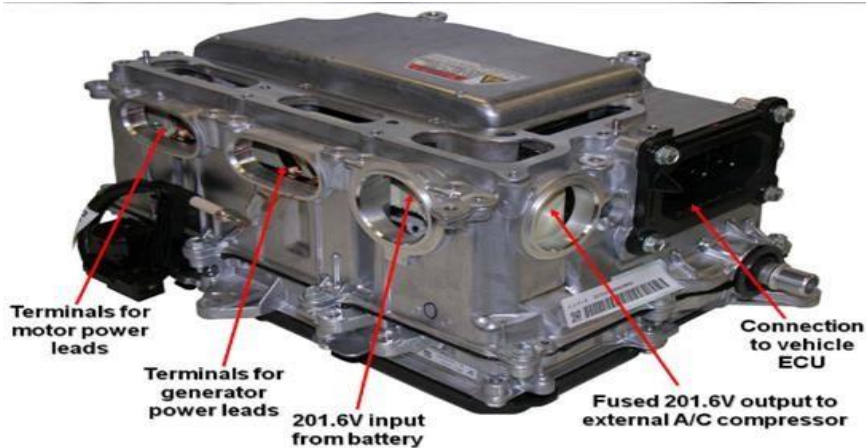


Figure 14 Configuration de la chaîne de traction de la Prius



L'architecture d'hybridation adoptée dans Toyota Prius II, III, IV et Prius α est l'architecture série-parallèle Full-hybrid sans transmission standard. Mais dans la deuxième phase de la Prius IV le système de traction adopte une autre architecture avec quatre roues. Au lieu de cela, un petit ensemble d'engrenages planétaires (train épicycloïdal), appelé "Power Split Device" (PSD) sert de mécanisme pour entraîner les roues du véhicule d'une manière qui simule une transmission à variation continue. Des commandes électroniques complexes gèrent le PSD, c'est pourquoi s'appelle une transmission électronique à variation continue (ECVT) .[16]

Comme son nom l'indique, il répartit la puissance motrice entre les roues et le générateur. De cette façon, la puissance émanant du moteur thermique peut suivre deux voies, l'une mécanique et l'autre électrique. C'est également lui qui assure la transmission de couple du moteur électrique aux roues [1]. La chaîne de traction électrique étudiée dans ce travail est celle du Toyota Prius III dont le principe illustré à la figure (16).[7][16][21]

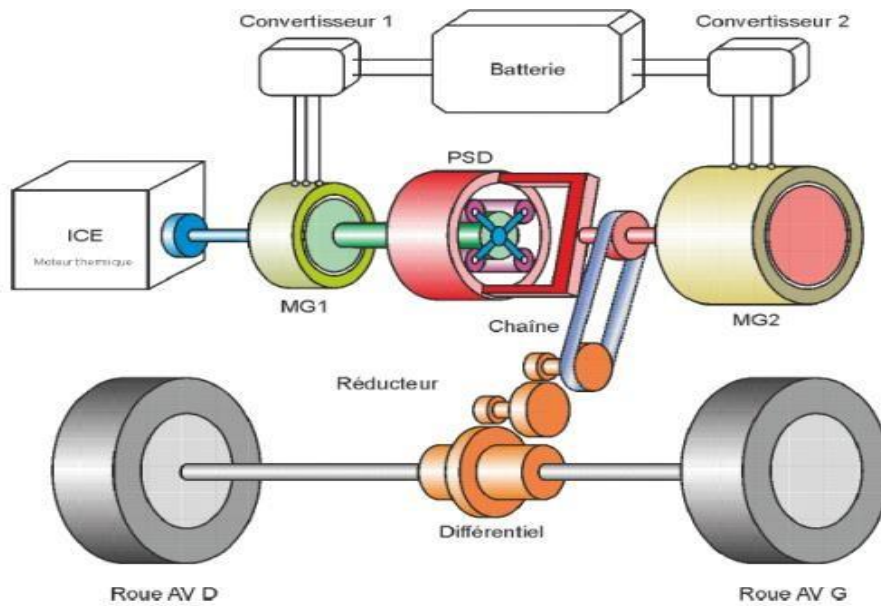


Figure 15 Configuration de la chaîne de traction de la Prius

Comme le montre le diagramme ci-dessous, le train planétaire différentiel est fixé à l'arbre du moteur thermique, l'engrenage attaché au plus petit générateur/moteur électrique MG1 entraîné par l'ICE (Internal Combustion Engine). Il sert à recharger la batterie HV et à fournir du courant électrique au MG2. Il sert également de démarreur du moteur thermique. MG2 est le moteur d'entraînement, alimentant les roues avec ou sans l'aide de l'ICE à l'aide de quelques réducteurs et d'un différentiel standard.

Le système hybride utilise les forces motrices fournies par le moteur thermique et par le moteur électrique MG2, et il utilise le MG1 comme générateur. Le répartiteur de puissance "PSD", est intégré à la transmission hybride au même titre que le générateur, le moteur électrique et les réducteurs [16] [21].

2.2. Batteries des Véhicules Électriques

2.2.1. Le principe de fonctionnement

La batterie est une réaction chimique pour le stockage d'énergie d'électricité, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), il peut y avoir soit libération d'énergie soit accumulation, est caractérisée par sa capacité et son énergie massique, afin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique.[6][40]

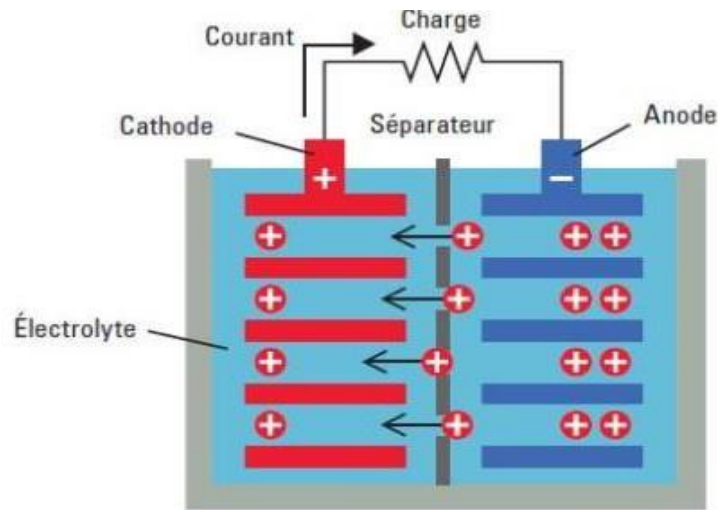


Figure 16 Vue interne d'une batterie

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 [8]. Une batterie est modélisée comme un générateur de tension parfait en série avec la résistance interne de la batterie, comme dans la figure (17).

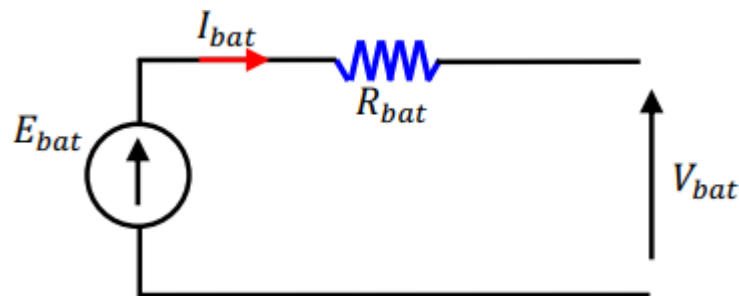


Figure 17 Modèle statique équivalent de la batterie

Pour calculer la tension de la batterie on utilise l'équation suivante :

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{bat}I_{bat}$$

Tel que : R_{bat} est la résistance interne, et I_{bat} est le courant fourni par la batterie.

2.2.2. Types des batteries

Il existe des batteries de différentes formes (structure ou technologie), par contre l'utilisation de ces différentes technologies dans les voitures électriques doit respecter certaines conditions parmi lesquelles:

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant des accélérations

importantes.

- 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 charge/ décharge, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Entretien faible et recyclable. Parmi ces différentes technologies de batteries, certaines batteries peuvent être utilisées sur les véhicules électriques notamment [5]:
 - La batterie Plomb (Pb) utilisée sur la C15 électrique.
 - La batterie nickel cadmium (Ni Cd) utilisée sur Saxo électriques.
 - La batterie Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride: Ni-MH) est utilisée sur les véhicules japonais et américains.
 - La batterie Lithium-ion (Li-ion) est montée sur le prototype 106 Vedlic qui embarque 25000Wh pour 250 kg de batterie.

Le tableau (II.1) résume les principales caractéristiques des batteries utilisées ou à l'étude pour la traction d'un véhicule terrestre [6] [29].

2.2.3. Batterie utilisée dans la Prius

Le système THS-II (Hybrid Synergy Drive) a adopté des batteries étanches hydrure de métal nickel (Ni-MH) pour la batterie HV. Cette batterie HV possède des caractéristiques une densité à haute puissance, elle est légère et possède une remarquable longévité spécifiquement conçue aux caractéristiques du système THS-II.

Une prise de service chargée de couper le circuit est installée en intermédiaire de 28 modules (entre le module no.19 et le module no.20). Avant de procéder à des travaux d'entretien de n'importe quelle partie du circuit haute tension, il ne faut pas oublier de débrancher au préalable la prise de service [17]



Figure 18 Batterie Ni-MH de la Toyota Prius

La batterie utilisée par le système hybride de la Prius se compose de 228 éléments NiMH (Nickel Métal Hydrure) regroupés dans un bloc placé sous les sièges arrière avec une masse totale de 52 kg (figure 20). Chaque élément présente une tension d'environ 1,2 V et une capacité de 6,5 Ah.

Le courant maximal est de 80 A à la décharge et de 50 A à la charge.

Tension totale de la batterie : $U = 228 \times 1,2 = 273,6 \text{ V}$.



Figure 19 Batterie Ni-MH de la Toyota Prius

2.3. Onduleur de traction dans la Prius

2.3.1 Onduleurs :

Le choix de la technologie des composants de puissance est généralement resté à faire sur les calibres en courant, tension, puissance ainsi que sur les fréquences de découpage. 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). L'onduleur du Toyota Prius est à base de Si IGBT, avec une fréquence de découpage de 16 kHz et une tension batterie d'environ 201.6V, et une puissance de 21 kW [2].

Ces transistors sont également utilisés pour le chargeur de batterie du véhicule.

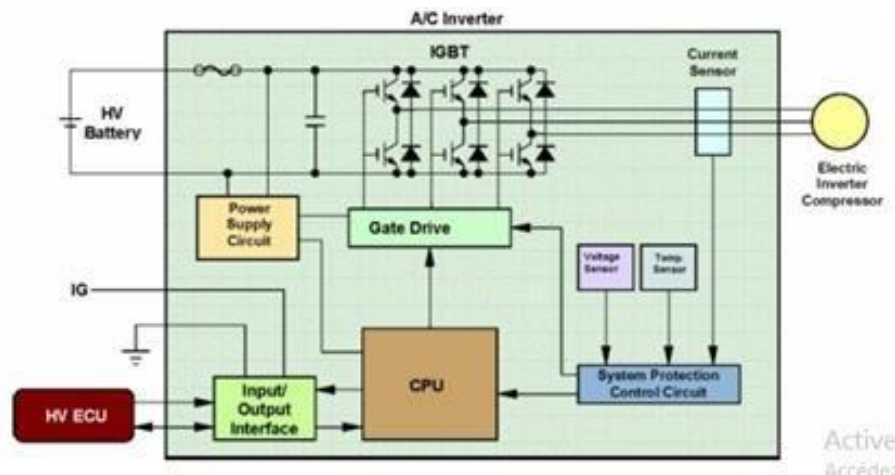


Figure 20 Onduleur de traction dans la Prius

Dans le tableau (9) on représente les spécifications des composantes des convertisseurs.

Tableau 9 Spécifications des composantes des convertisseurs statiques dans la Prius

Caractéristique de conception	Valeurs
Puissance nominale du convertisseur DC-DC	27 kW
Voltage de batterie	201.6V
Condensateur de filtre (côté BT)	470 Vdc, 315 μ F
Inductance	225.6 μ H à 1 kHz
Petite résistance (côté HT)	53.8 k Ω
Petit condensateur de filtre (côté HT)	860 Vdc, 0.562 μ F 900 Vdc, 0.8 μ F 950 Vdc, 0.562 μ F
Condensateur de lissage (côté HT)	750 Vdc, 888 μ F

2.3.2 Convertisseur DC/DC (201,6 V DC to 500 V DC).

Le convertisseur DC/DC est 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 évalué à 201,6 V à une tension de courant continu approximative de 500V. 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 500V 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.[33]

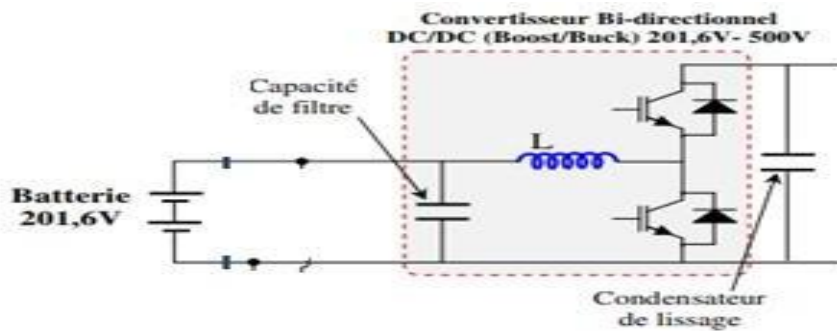


Figure 21 Convertisseur DC/DC (201,6 V DC to 500 V DC).

2.3.3 Convertisseur DC/DC (201,6 V CC to 12 V CC).

L'alimentation des équipements auxiliaires du véhicule, tels que les phares, le système audio et la climatisation (à l'exception du compresseur de climatisation), ainsi que du calculateur électronique, est assurée par un système CC 12 V. Le générateur THS-II délivrant une tension nominale de 201,6 V CC, le convertisseur transforme cette tension en 12 V CC pour recharger la batterie auxiliaire. Le convertisseur est installé sous l'onduleur.

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. 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.[3]

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. L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative, l'utilisation des onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs triphasés, les alimentations de secours, ... etc.

Grâce au développement technologique des semi-conducteurs, et l'apparition des nouvelles techniques de commandes les onduleurs sont devenus plus performants. D'autre part la forme de tension de sortie d'un onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde pour laquelle le taux d'harmoniques soit le plus faible possible, cette dernière dépend largement de la technique de commande utilisée.[3][5][33]

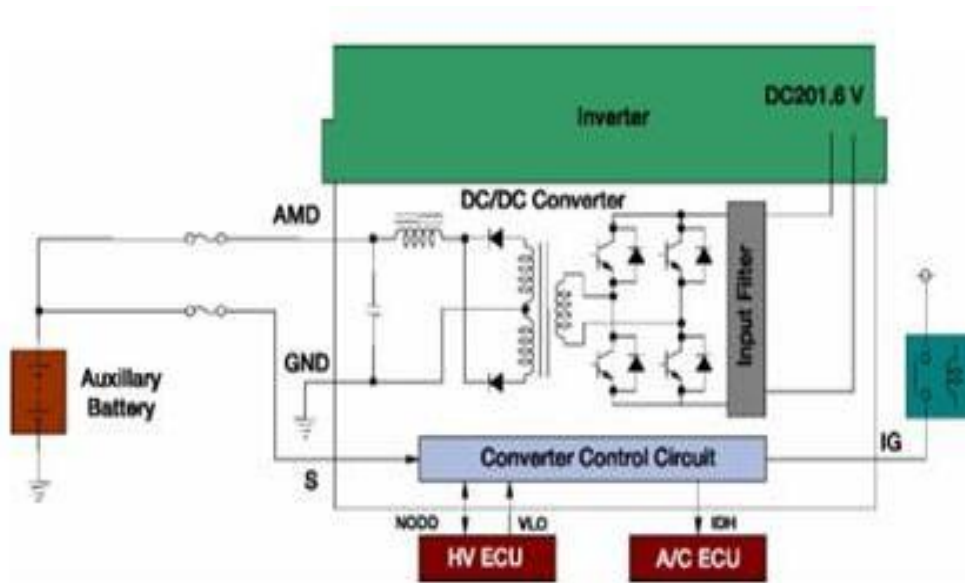


Figure 22 Convertisseur DC/DC (201,6 V CC to 12 V CC).

La figure (23) représente le schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius .

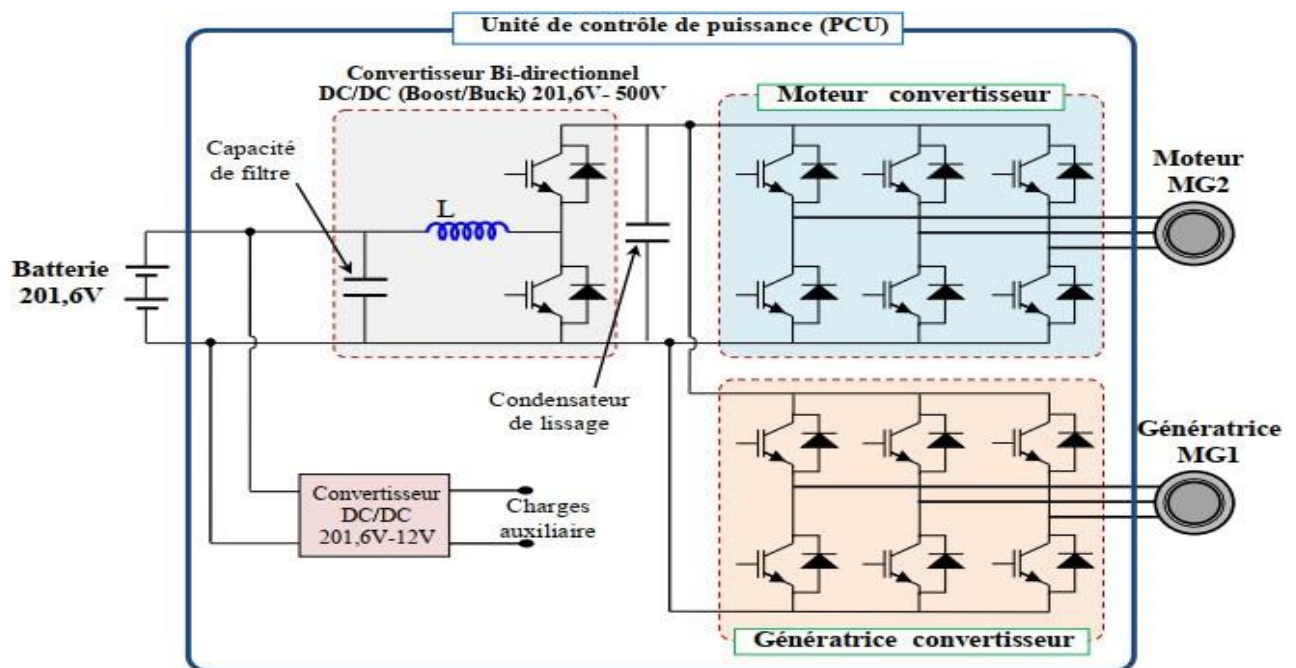


Figure 23 Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius

2.4 Moteurs Electriques de traction dans la Prius

2.4.1. Description MG1:

Le MG1 recharge la batterie haute tension (HV) et fournit de l'énergie électrique pour entraîner le MG2. De plus, en régulant la quantité d'énergie électrique générée (et donc en faisant varier la résistance interne et la vitesse de rotation du MG1), le MG1 contrôle efficacement la transmission à variation continue (CVT) de la boîte-pont. Le MG1 sert également de démarreur pour le moteur.

Générateur électrique / petit moteur MG1 :

- **Fonctions principales :**
 - Démarrage du moteur à essence (remplaçant le démarreur traditionnel).
 - Conversion d'une partie de l'énergie du moteur thermique en électricité pour recharger la batterie.
 - Régulation de la vitesse du moteur thermique en fonction des conditions.

2.4.2. Description MG2:

Le MG2 et le moteur travaillent ensemble pour entraîner les roues. Le couple élevé du MG2 permet d'obtenir d'excellentes performances dynamiques, y compris un démarrage et une accélération en douceur. Lors du freinage régénératif, le MG2 convertit l'énergie cinétique en énergie électrique, qui est ensuite stockée dans la batterie haute tension.

Moteur électrique principal : MG2

- **Puissance :** environ 80 chevaux (60 kW).
- **Rôle :**
 - Propulsion électrique du véhicule à basse vitesse.
 - Assistance à l'accélération.
 - Récupération de l'énergie cinétique lors du freinage (freinage régénératif).

MG2 est le moteur qui agit directement sur les roues avant via le système de transmission

Remarque :

Remorquer une Prius endommagée avec ses roues avant au sol peut entraîner la génération d'électricité par le MG2. Cela pourrait provoquer une fuite de l'isolation électrique et entraîner un

incendie. Il est donc impératif de toujours remorquer le véhicule avec les roues avant levées ou sur une dépanneuse à plateau. L'unité de train épicycloïdal est utilisée comme dispositif de répartition de la puissance. L'engrenage solaire est relié au MG1, l'engrenage annulaire est relié au MG2 et le porte-satellites est relié à l'arbre de sortie du moteur. La force motrice est transmise du pignon à chaîne à l'unité de réduction via une chaîne silencieuse.[38]

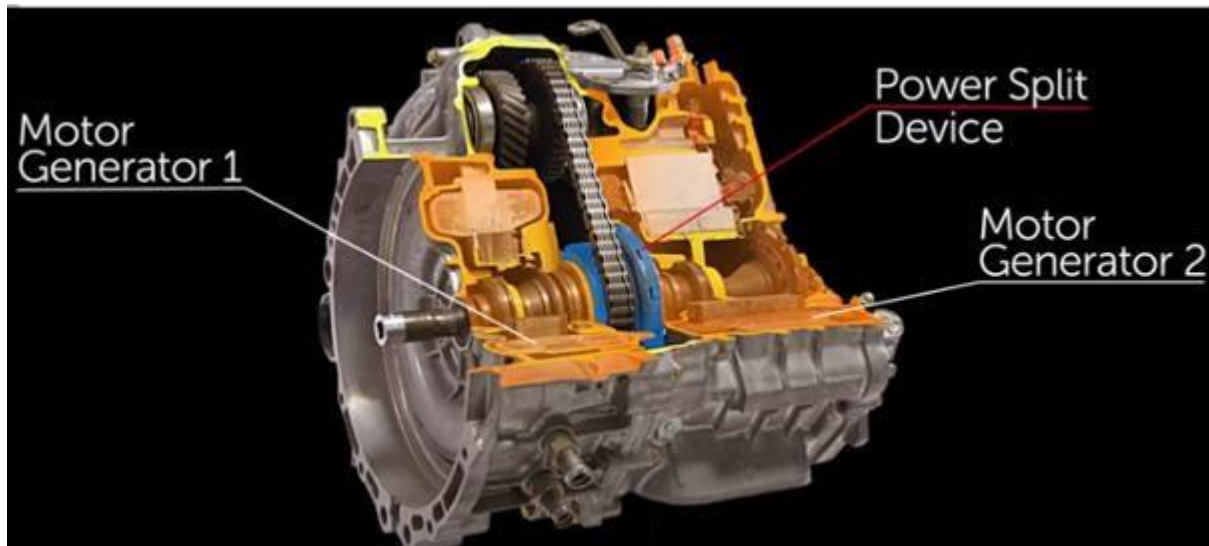


Figure 24 Moteurs Electriques de traction dans la Prius

2.5. Système de transmission planétaire (Planetary Gear System) :

- Connu sous le nom de "e-CVT", bien qu'il ne s'agisse pas d'une boîte de vitesses conventionnelle.
- Composé d'un ensemble d'engrenages planétaires régulant le flux d'énergie entre :
 - Le moteur thermique.
 - MG1.
 - MG2.
 - Les roues avant.
- Fonctionne comme une transmission à variation continue électrique (CVT), sans paliers de vitesse.

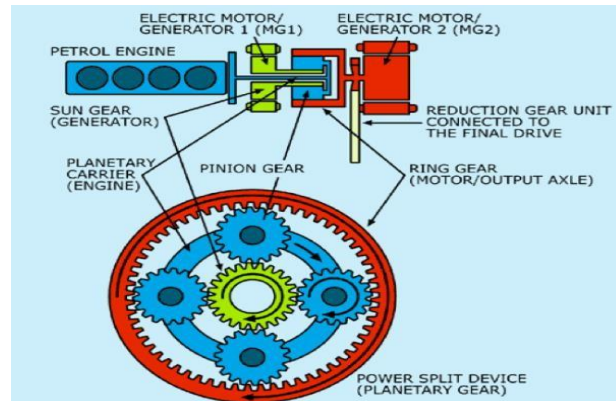
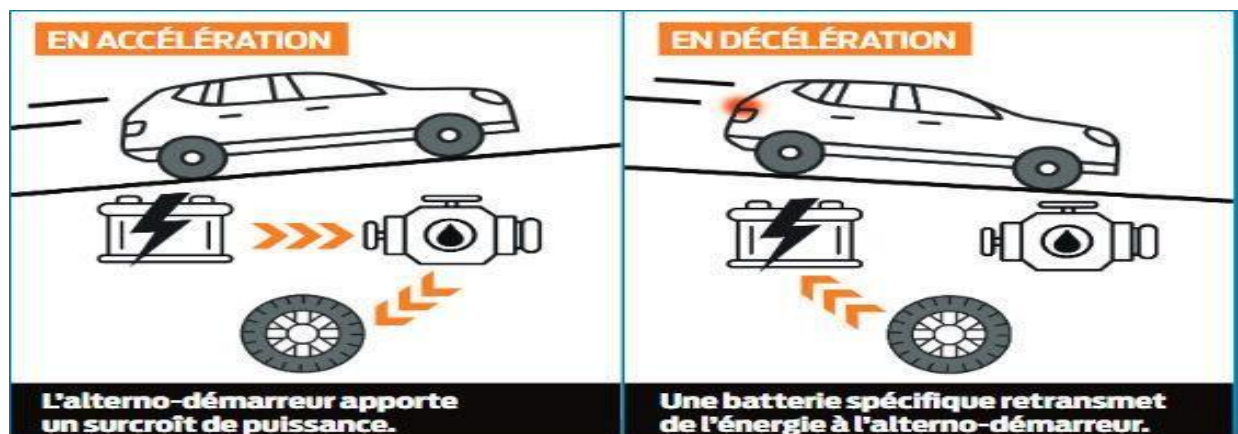


Figure 25 Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius

Un des éléments qui détermine en partie l'utilisation possible du véhicule hybride est la capacité de la batterie car elle détermine l'autonomie du véhicule en mode électrique pur. Actuellement, le prix des batteries est relativement élevé et donc, dans l'immédiat, les premiers véhicules hybrides commercialisés (Toyota Prius, Nissan Tino, Honda Insight) ne disposent que d'une faible capacité de batterie ne permettant pas le fonctionnement en mode électrique pur /Badin & al. 2001/.

On peut émettre l'hypothèse que, plus tard, avec l'introduction en plus grande quantité de véhicules hybrides sur le marché, le prix des batteries diminuera et l'autonomie en mode électrique pur atteindra entre 30 et 60 km. Le véhicule hybride pourrait alors être utilisé en mode électrique pur pour assurer la plupart des petits trajets quotidiens. Les kilomètres effectués en mode électrique pur auront un prix de revient très faible (de l'ordre de 1.5 €/100km /AVERE 2001/) en comparaison à celui du carburant /Frank 2001/.

Dans ce contexte, le véhicule hybride cumule alors les avantages du véhicule électrique pour les courts trajets et ceux du véhicule conventionnel pour les trajets plus longs.[35]



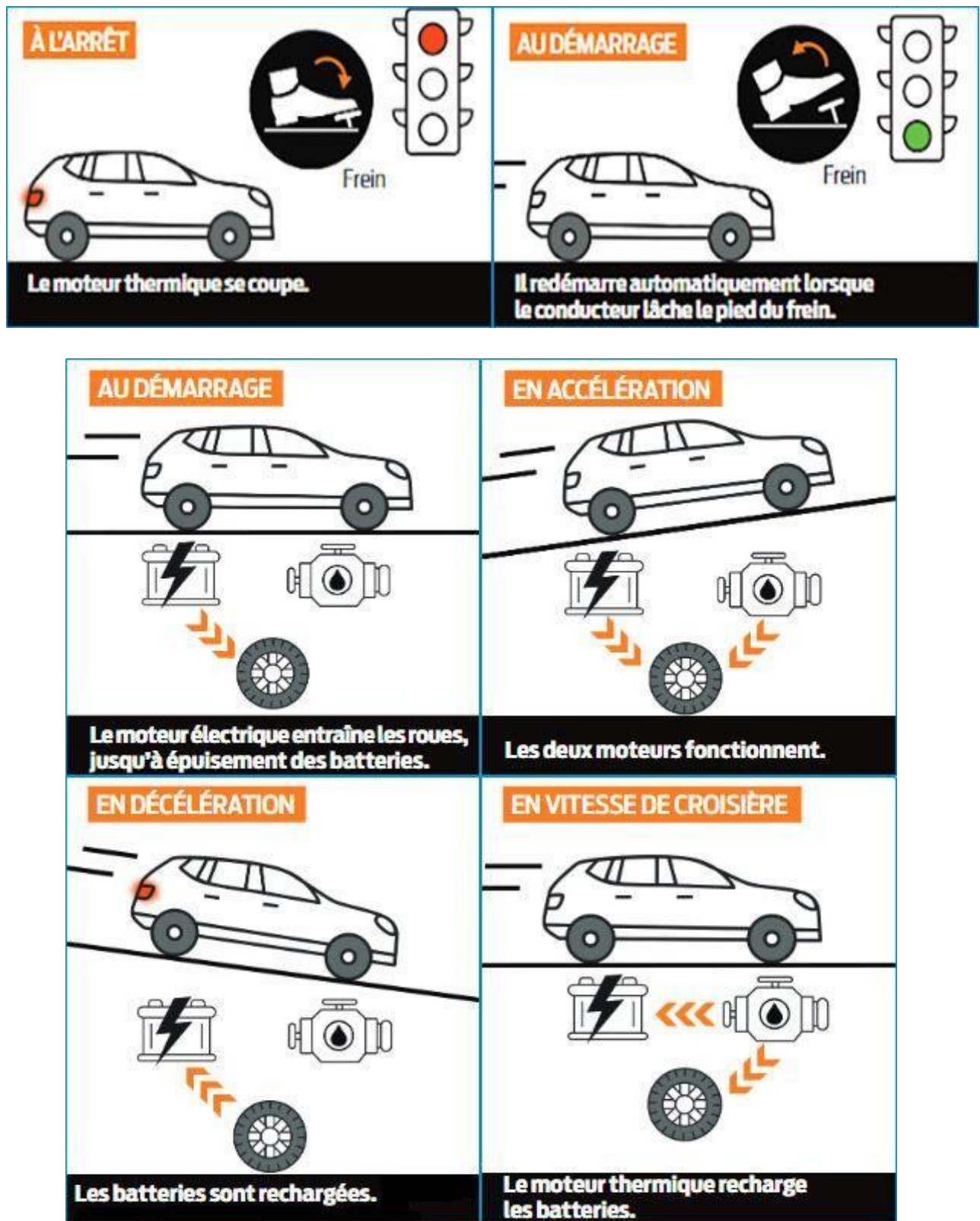


Figure 26 Configuration de la chaîne de traction de la Prius

3. Principaux modes de fonctionnement

Les véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie pour assurer leur propulsion, on distingue trois principaux modes de fonctionnement possibles, figure 5. D'une façon très générale, on peut les résumer de la manière suivante :

- le mode thermique pur correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur thermique. Les performances en termes de consommation et de pollution sont alors similaires à celles d'un véhicule conventionnel ;
- Le mode électrique pur correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique. Le véhicule est alors dit ZEV (Zero Emission Vehicle) et les performances en termes de dynamique et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. Ce mode conduit à plus ou moins long terme à la décharge des batteries ;
- Le mode hybride correspond à une propulsion assurée par les deux moteurs simultanément. Plusieurs cas de figures sont envisageables, figure 15. En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être délivrée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul. Le moteur électrique est alors utilisé pour recharger les batteries en roulant. En freinage, le moteur électrique récupère une partie de l'énergie cinétique du véhicule ainsi qu'un supplément délivré par le moteur thermique.

Une fois l'architecture sélectionnée, le choix des technologies et le dimensionnement des composants sont essentiels car ils déterminent non seulement les performances dynamiques du véhicule (accélération maximale, vitesse maximale, etc.) mais aussi la consommation moyenne du véhicule et ses émissions de polluants. Généralement, ces choix sont des compromis entre performances dynamiques, consommation et émissions, et bien sur, coût de fabrication.

Cependant, tous ces choix ne peuvent être effectués uniquement au regard de critères purement techniques. Les attentes des consommateurs, les différentes utilisations possibles du véhicule hybride sont également des facteurs à prendre en compte dans la problématique générale des véhicules hybrides.[35]

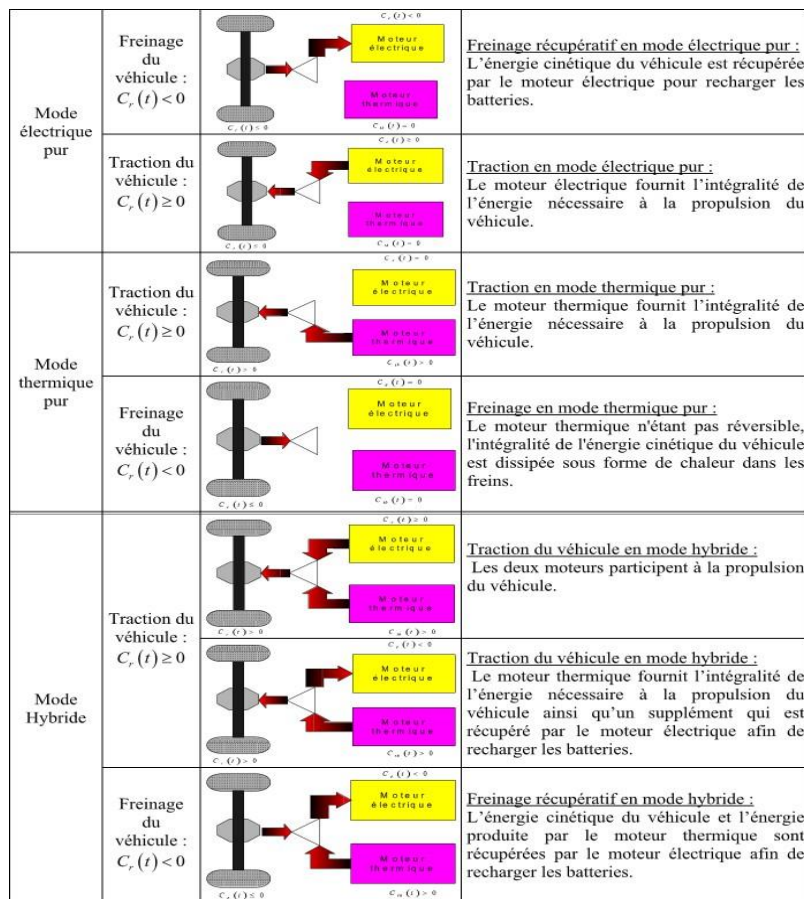


Figure 27 les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride

3.1. Principales améliorations en faveur de la troisième génération :

- Moteur plus grand et plus efficace.
- Batterie plus puissante avec un meilleur système de refroidissement.
- Système de climatisation amélioré, entièrement électrique.
- Consommation de carburant réduite.
- Meilleure accélération et contrôle.
- Design intérieur plus confortable et fluide.[35]

4. Entretien du système hybride de la Toyota Prius.

Les voitures hybrides comme la Toyota Prius peut sembler techniquement complexes, mais elles sont en réalité conçues pour être faciles à entretenir et moins coûteuses que les voitures traditionnelles. Voici les détails :

1. Entretien du moteur à essence :

- Vidange d'huile et remplacement du filtre tous les 10 000 à 15 000 km.
- Le moteur fonctionne moins d'heures que les moteurs classiques, ce qui réduit son usure.
- Pas de courroie de distribution (Timing Belt), mais une chaîne métallique plus durable.

2. Entretien du système électrique :

- Moteurs électriques (MG1 et MG2) : ne nécessitent pas d'entretien régulier.
- Inverseur/convertisseur : seulement un contrôle périodique du liquide de refroidissement.
- Batterie hybride :
 - o Durée de vie de 8 à 15 ans, voire plus.
 - o Certains utilisateurs ont parcouru plus de 300 000 km sans avoir à remplacer la batterie.
 - o Possibilité de réparer ou de remplacer uniquement les cellules, plutôt que la batterie complète (moins coûteux).[34]

3. Système de refroidissement :

- Le système comporte deux circuits de refroidissement distincts :
 - o Un pour le moteur thermique.
 - o Un pour l'inverseur et les moteurs électriques.
- Contrôle et remplacement du liquide de refroidissement tous les 160 000 km environ.

4. Système de freinage :

- Durée de vie des plaquettes de frein plus longue que celle des voitures traditionnelles grâce au freinage régénératif.
- Rarement besoin de changer les freins avant 100 000 km.
- Contrôle régulier du système de freinage hydraulique et électronique (ABS, VSC...).[34]

5. Système électronique et unité de contrôle :

- Pas d'entretien direct requis, mais il est recommandé de mettre à jour le logiciel chez le concessionnaire ou dans un centre spécialisé en cas de nouvelles versions.
- Tout problème électrique est immédiatement affiché à l'écran et enregistré dans l'unité de contrôle.

L'entretien de la Prius est-il plus cher que celui des voitures classiques ?

En réalité, non. Bien au contraire, dans de nombreux cas, il est moins coûteux à long terme, pour plusieurs raisons :

- Pas de remplacement de courroie d'alternateur ou de climatisation (fonctionnement électrique).
- Moins d'usure des freins.
- Moins de pannes mécaniques.
- Consommation de carburant plus efficace.[36]

5. Conclusion

L'analyse du fonctionnement du système Hybrid Synergy Drive de la Toyota Prius a permis de mettre en lumière le rôle fondamental de chacun de ses composants — à savoir la batterie haute tension, l'onduleur/convertisseur, l'unité de contrôle de puissance (PCU), les moteurs électriques MG1 et MG2, ainsi que le dispositif de répartition de puissance. Ensemble, ces éléments assurent une gestion intelligente de l'énergie et contribuent à l'optimisation du rendement énergétique du véhicule.

Cette architecture hybride autorise une transition harmonieuse entre la propulsion électrique et thermique, tout en permettant la récupération d'énergie lors des phases de freinage, positionnant ainsi la Prius comme une référence dans le domaine des technologies hybrides.

Ce principe de fonctionnement constitue le socle de notre projet de fin d'études, lequel vise à étudier la faisabilité du remplacement du moteur électrique conventionnel par une machine à réluctance variable (SRM), dans l'objectif d'améliorer le rendement global du système et de réduire les coûts de production.

CHAPITRE

III

Chapitre III : Modélisation du moteur à réluctance variable

1. Introduction

Les machines à réluctance variable (MRV) représentent une famille de machines électriques à **déplacement magnétique variable**, dont le fonctionnement repose sur la **modification dynamique de la géométrie de l'entrefer (espace d'air)** pendant la rotation. Bien qu'elles partagent cette caractéristique fondamentale, elles divergent radicalement par **leurs structures mécaniques, leurs caractéristiques opérationnelles et leurs domaines d'application**. Ce chapitre vise à recenser la diversité de conception de ces machines en les classant selon leurs architectures, puis à analyser théoriquement leurs mécanismes de fonctionnement.

2. La définition de la Machines à reluctance variable :

La machine à réluctance variable (MRV), pionnière dans la conversion électromécanique et les moteurs rotatifs dès le XIX^e siècle, fonctionne via une commutation séquentielle et synchronisée des enroulements statoriques, générant un **champ pulsant** (contrairement au champ tournant des machines classiques). Son rotor, à aimantation induite par le stator, produit un couple via la minimisation de la réluctance.

Son pilotage exige un **convertisseur électronique** et un **capteur de position précis**, d'où son nom anglophone *Switched Reluctance Machine (SRM)* [18] Pour ces raisons, entre autres, le développement de cette machine n'a été possible qu'à partir de 1980, grâce à l'émergence de composants clés : des semi-conducteurs de puissance améliorés, des méthodes de commande innovantes, ainsi que des outils de modélisation et des logiciels de simulation et de conception. La machine à réluctance variable (MRV) présente de multiples avantages.

Selon les fabricants, son rapport performance-coût est nettement supérieur à celui d'autres machines électriques, en raison de sa structure simple et robuste. Son stator à pôles saillants facilite l'intégration des enroulements, tandis que son rotor passif, dépourvu de bobinages et d'aimants permanents, renforce sa fiabilité. Elle combine également une forte densité de couple, une robustesse adaptée aux applications haute puissance/haute vitesse (traction) et aux forts couples/basses vitesses (éoliennes à entraînement direct). Comparée à la

machine asynchrone, la MRV affiche un meilleur rendement, un couple de démarrage plus élevé et une capacité de surcharge accrue.

Cependant, elle présente des inconvénients, tels que des oscillations de couple, un bruit acoustique marqué et des contraintes mécaniques liées à la nécessité d'un entrefer minimal. Certains de ces défis ont toutefois été atténués grâce aux travaux des chercheurs et aux innovations des constructeurs[20][25]

2.1. Historique de la MRV

Le principe de réluctance variable a été également choisi pour la génération de courants hautes fréquences (de quelques kHz à 20 kHz) dans l'alimentation de fours à induction et dans l'émission des ondes radio. Les premiers alternateurs "à fer tournant" apparurent dans les années 1888 ; une structure remarquable, de type homopolaire, fut conçue et commercialisée à cette époque par la société OERLIKON , sa puissance était de 70 chevaux. Au XX siècle, d'autres alternateurs à réluctance variable, homopolaires, ou hétéropolaires (structures de Lorentz- Schmitt et Guy) furent réalisés et utilisés.

Il semble que les premières structures à double saillance, telles que nous les connaissons aujourd'hui, soient apparues dans les années 1920. Un article de 1927 sur les applications de l'électricité dans les bateaux de guerre décrit un moteur de type 6/4 pareil à celui que nous étudions actuellement. Il était utilisé comme transmetteur de mouvement entre deux points éloignés.[12]

2.2. Différents types de la MRV :

Les machines à réluctance variable se divisent, de part leur construction, en deux grandes catégories :

- Les machines à stator lisse.
- Les machines à double denture dite « vernier ».

Dans ces deux types le rotor est à N_r dents identiques et régulièrement réparties.[12]

2.2.1. Machines à stator lisse :

Dans ce type de machine, le stator est cylindrique de révolution de rayon r_s dans lequel sont creusées des encoches destinées à loger les conducteurs. La définition du stator lisse est due surtout à la faiblesse de la largeur des d'encoche au niveau de l'entrefer qui constituent une irrégularité locale négligeable dans la géométrie. On peut ainsi calculer, au niveau de chaque encoche, la densité de courant équivalente au courant N_i passant dans le

conducteur qui y est logé, la perméabilité du stator étant supposée infinie, la densité de courant équivalente sera donc égale à;[12]

$$J = \frac{NI}{\varepsilon}$$

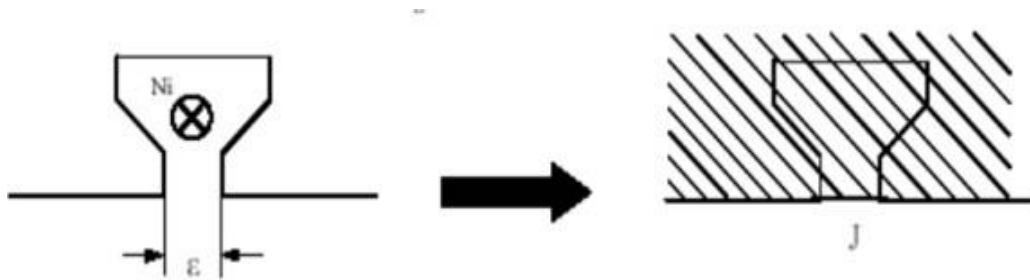


Figure 28 Densité de courant équivalente

2.2.2. Machine à double denture :

Ce sont des machines dont le stator, vu l'importance de ces encoches relativement à la dentures rotorique, ne peut être assimilé à un stator lisse. Les irrégularités locales dues au positionnement relatif des dents rotoriques et statoriques sont d'ailleurs la cause de la conversion d'énergie. La figure (30) représente une machine à réluctance variable à double denture avec six pôles statoriques (chaque deux pôles diamétralement opposés reçoivent deux bobinages alimentés en série) et quatre pôles rotoriques, il ne comporte ni conducteur électrique ni aimant, ce qui lui confère une grande robustesse et une extrême simplicité.[12]

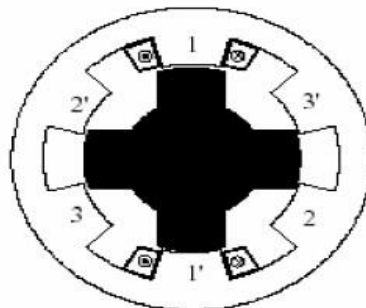


Figure 29 Machine à double denture « vernier »

3. Le principe de fonctionnement d'une MRV

La machine à réluctance variable étudiée ici est caractérisée par une **double saillance** (MRVDS) : un rotor comportant N_r dents et un stator doté de N_s dents bobinées. Cette machine se distingue par l'absence de circuit d'excitation dédié (il s'agit d'une MRV « pure »). Les deux structures polaires (stator et rotor) sont constituées d'un assemblage stratifié de tôles en matériau ferromagnétique.[13][39]

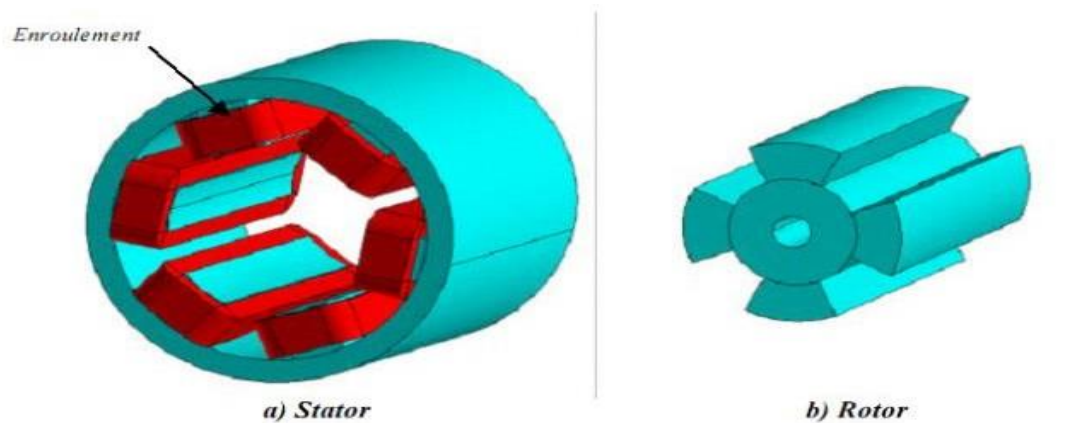


Figure 30 Machine à réluctance variable à double saillance MRVDS 6/4

Le principe de fonctionnement d'une machine à réluctance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle représentée ci-dessous (Figure 31) :

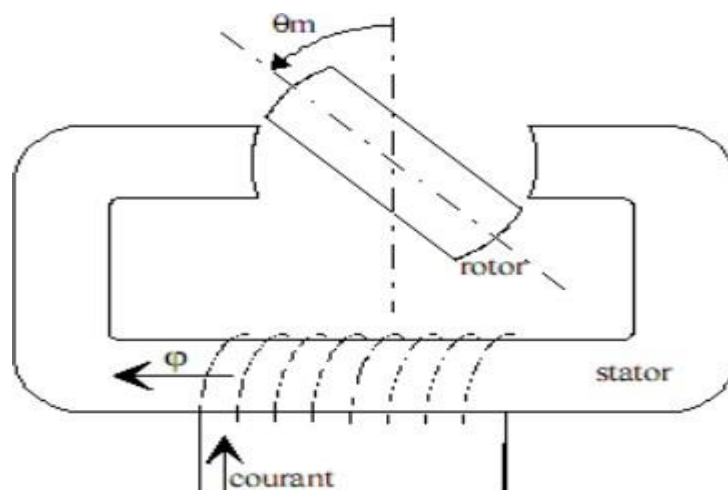


Figure 31 Structure élémentaire d'une MRV monophasée

Cette structure possède deux positions extrêmes remarquables :

- une position d'**opposition** pour laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale ou inductance minimale
- une position de **conjonction** où la réluctance est minimale donc d'inductance maximale.

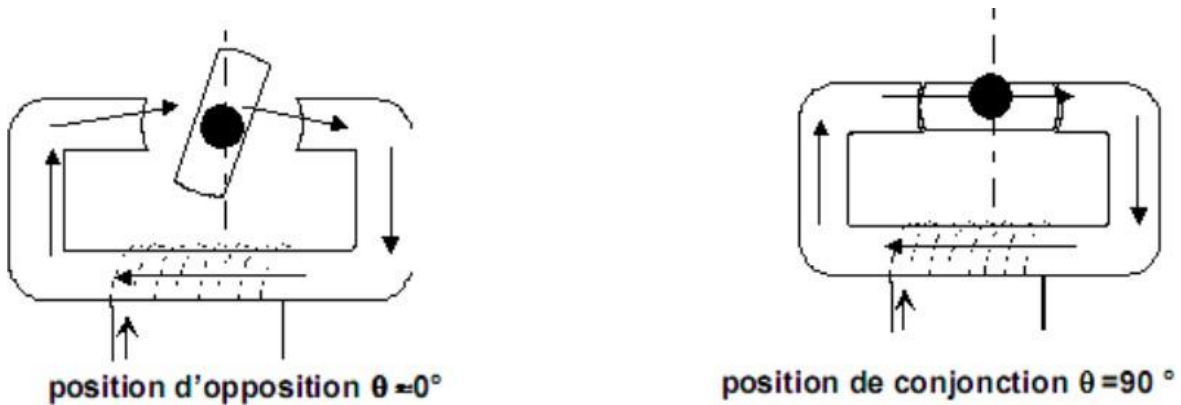


Figure 32 Positions extrêmes de la MRV élémentaire

Lorsque le rotor est situé dans une position intermédiaire entre l'**opposition** et la **conjonction**, l'injection d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état du système. Ce dernier tend alors à adopter une **réluctance minimale** (selon la règle du flux maximal), provoquant une rotation du rotor vers la position de **conjonction**. Si le courant est coupé et que l'**énergie cinétique** accumulée lors de la rotation est suffisante pour amener le rotor jusqu'à l'**opposition**, le cycle peut être répété, générant ainsi un **mouvement de rotation continu**. [13]

Ce principe fondamental peut être étendu à la **machine triphasée** utilisée dans notre application. (Fig.34)

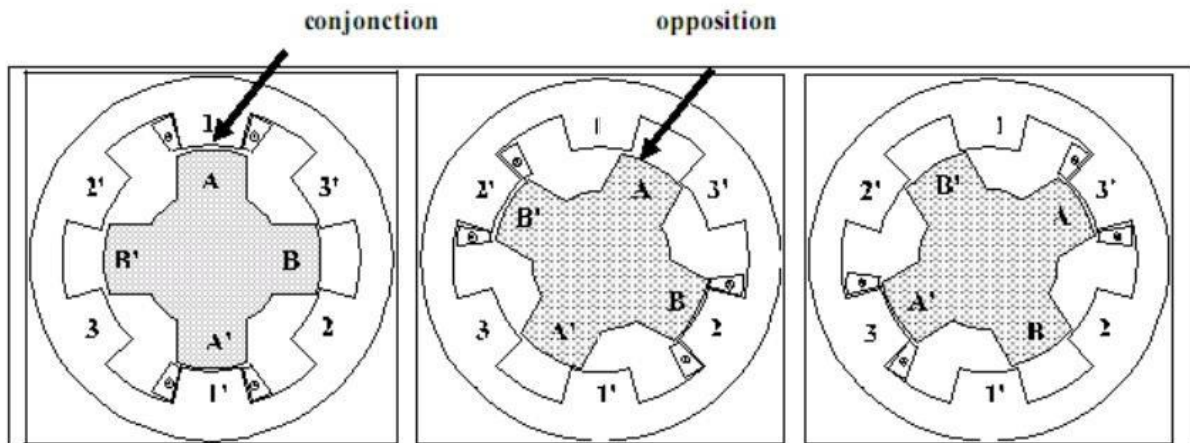


Figure 33 Séquences d'alimentation des phases pour produire un mouvement de

L'alimentation de la phase 1 aligne AA' avec 11'.

L'alimentation de la phase 2 aligne BB' avec 22'.

L'alimentation de la phase 3 aligne AA' avec 33'

4. Domaines d'utilisation :

Les machines à réluctance variable (MRV) ont trouvé des applications variées dans l'industrie, grâce à leurs nombreux avantages. Dans le domaine naval (sous-marins, bateaux), les MRV sont utilisées pour améliorer la compacité et la manœuvrabilité. Par exemple : une MRV de 7,5 kW (1200 tr/min) a été développée pour une unité de propulsion navale générant un couple de 350 N·m .un autre projet a exploré l'utilisation d'une MRV de 3 CV pour entraîner électriquement de petites embarcations.[23]

Dans le secteur ferroviaire, le train allemand ICE3 (figure I.11) est le premier train à grande vitesse à intégrer une MRV. Celle-ci est dédiée à la climatisation du circuit d'air, avec une puissance nominale de 40 kW et une vitesse de rotation de $3,0 \times 10^4$ tr/min (30 000 tr/min). Par ailleurs, une MRV à vitesse ultra-élevée, conçue par Morel, intègre une nouvelle structure de rotor visant à augmenter la rigidité mécanique du rotor et la vitesse maximale du moteur.[23]

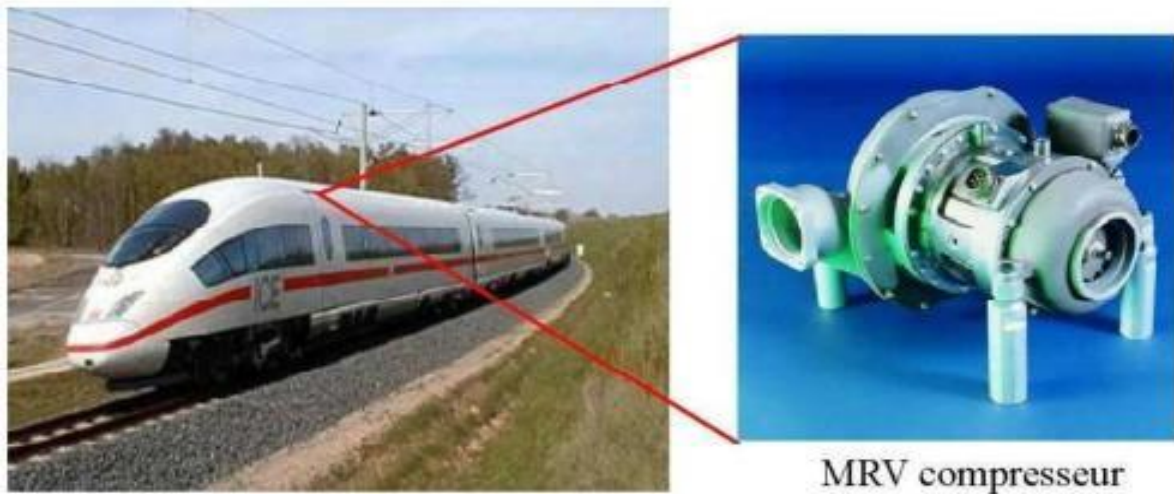


Figure 34 MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle

Dans certaines applications domestiques, la MRV est également utilisée. Les contraintes sont: coût et ergonomie [13]. On pourra citer à titre d'exemple les machines à laver et les aspirateurs.



Figure 35 MRV pour une machine à laver

La MRV est aussi utilisée dans beaucoup d'autres types d'applications ou de produits existants comme les pompes, les portes glissantes, le secteur automobile (véhicule éclectique) et dans le domaine aéronautique et robotique.

5. Avantages et inconvénients d'une MRV

Structure du rotor simple et robuste :

Le rotor est dépourvu d'enroulements, de conducteurs ou d'aimants permanents. Mécaniquement, le moment d'inertie d'une MRV est faible, typiquement la moitié de celui

d'une machine asynchrone de même rayon de rotor, ce qui permet une accélération rapide. Sur le plan thermique, les pertes dans le rotor sont faibles, permettant ainsi l'utilisation d'un système de refroidissement simple.

- **Excellentes performances en environnements extrêmes** : Ces machines sont bien adaptées aux applications nécessitant des températures ou des vitesses élevées.
- **Grande capacité de surcharge momentanée** : Cette capacité est limitée uniquement par la température maximale des enroulements et la saturation des matériaux magnétiques, ce qui leur permet de fournir un couple de démarrage élevé ou une accélération importante.
- **Potentiellement faible coût de fabrication et de maintenance** : Malgré les exigences de fabrication élevées liées à la faible épaisseur de l'entrefer, le coût global reste relativement bas.
- **Fonctionnement sur une large plage de vitesses à puissance constante** : Leur rendement peut rester élevé au-delà de la vitesse nominale, ce qui les rend particulièrement adaptées aux véhicules électriques ou hybrides.

Fiabilité élevée de l'alimentation : Les phases sont alimentées de manière indépendante dans le temps, ce qui fait qu'un défaut sur une phase a peu d'effet sur les autres.[15]

Inconvénients principaux des machines à réluctance variable :

- **Ondulation de couple, vibrations et bruit acoustique** : Ces effets sont généralement plus marqués que dans les machines asynchrones ou à aimants permanents. Cependant, plusieurs méthodes actives ou passives permettent aujourd'hui de les atténuer efficacement.
- **Exigences particulières en alimentation électrique** : Les MRV conventionnelles nécessitent une alimentation en courant unidirectionnel, ce qui implique souvent l'usage de convertisseurs spécifiques. Toutefois, des convertisseurs bipolaires (demi-pont ou pont complet) sont aussi utilisés dans certaines applications.

Complexité de commande à basse vitesse : Le bon fonctionnement à faible vitesse exige des formes d'onde de courant complexes ainsi qu'une mesure précise de la position du rotor.[15]

6. Modélisation du moteur à reluctance variable:

6.1. Définition d'un modèle mathématique

Dans le domaine des sciences appliquées, un modèle mathématique est un type de modèle scientifique qui emploie un formalisme mathématique pour exprimer des relations, des prédictions, des variables, des paramètres, des entités et des relations entre des variables et/ou des entités ou opérations. Ces modèles servent à analyser les comportements de systèmes complexes dans des situations difficiles à observer dans la réalité.

Concernant les mathématiques proprement dites, un modèle mathématique est un ensemble d'équations reliant les différentes variables caractéristiques et faisant intervenir aussi les paramètres du système. La théorie des modèles est la branche des mathématiques qui se consacre à l'étude systématique des propriétés des modèles. Les modèles mathématiques constituent une traduction de la réalité physique permettant d'appliquer les instruments et les techniques des théories mathématiques dans l'étude du comportement de systèmes complexes. À l'inverse, il est possible de transposer les résultats numériques à la réalité physique.

Les modèles mathématiques peuvent être soit déterministes (les données employées sont tout à fait connues et déterminées) soit stochastiques (ce sont des modèles probabilistes, étant donné que l'on ne connaît pas le résultat attendu mais plutôt sa probabilité) Pour ce qu'il en est de la fonction de l'origine de l'information utilisée, les modèles mathématiques peuvent être soit heuristiques (basés sur les explications à propos des causes ou des mécanismes naturels qui sont à l'origine du phénomène étudié) soit empiriques (basés sur les observations directes ou les résultats des expériences faites au phénomène en cours d'étude) .[15]

6.2. Modélisation de la MRV

Afin d'analyser le comportement de la MRV, il est nécessaire de développer un modèle mathématique capable de représenter sa dynamique fortement non linéaire.

6.2.1. L'inductance

La dynamique non linéaire du moteur à reluctance variable est due à ses caractéristiques qui varient à la fois en fonction de l'angle mécanique du rotor et l'intensité du courant qui circule dans les phases du moteur. Un modèle de l'inductance pourrait être obtenu en utilisant un développement en série de Fourier finie par rapport à l'angle du rotor afin de représenter la périodicité en fonction de la position (équation (II.1)) et polynomiale par rapport au courant

afin de prendre en compte l'effet de la saturation magnétique (équation (II.2)). Le modèle de l'inductance est donné comme suite :

$$L_j(\theta_e, i_j) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n(i_j) \cos(n\theta_e) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$$a_n(i_j) = \sum_{p=0}^P b_{np} i_j^p \quad (\text{II. 2})$$

Où θ est l'angle électrique, N et a représentent respectivement le nombre des termes et les coefficients du développement en série de Fourier. P représente l'ordre des fonctions polynomiales. Le choix du nombre des termes du développement en série de Fourier N , et l'ordre des fonctions polynomiales P , doit être effectué avec précaution pour obtenir un modèle analytique de l'inductance à la fois précis et simple.[15]

6.2.2. Equations électrique

Un circuit élémentaire équivalent d'une phase électrique du MRV peut être obtenu en négligeant le couplage magnétique entre les phases du moteur comme est indiquée par la figure (37) :

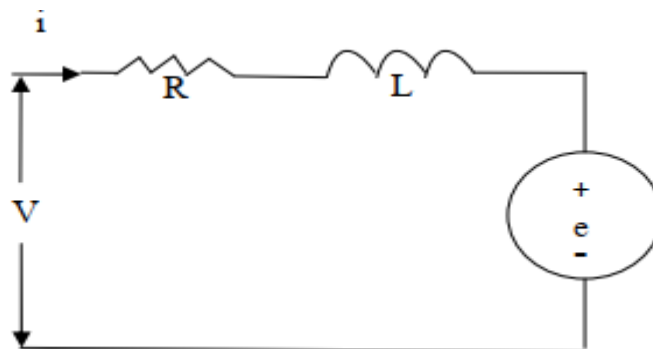


Figure 36 Circuit équivalent d'une phase électrique du MRV

La tension instantanée appliquée sur l'enroulement d'une phase du moteur est liée à flux
par la loi de Faraday:

$$V_j = R i_j + \frac{d\Psi_j(\theta_e, i_j)}{dt} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$$\Psi(\theta_e, i_j) = L_j(\theta_e, i_j) i_j \quad (\text{II. 4})$$

V Et i dénotent respectivement la tension et le courant circulant dans la phase j ($j = 1, 2, \dots$

m), R est la résistance électrique de l'enroulement de la phase, $d\Psi$ représente le flux magnétique de la phase j , et L représente son inductance magnétique. Le comportement du flux et de l'inductance magnétique est fortement non linéaire. Cette non linéarité peut être prise en compte en utilisant un modèle qui la caractérise. Ce modèle sera détaillé dans la section suivante. L'équation (II.2) peut être développée comme suit:

$$\frac{d\Psi(\theta_e, i_j)}{dt} = L_j(\theta_e, i_j) \frac{\partial i_j}{\partial t} + i_j \frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial t} \quad (\text{II. 5})$$

$$\frac{d\Psi(\theta_e, i_j)}{dt} = L_j(\theta_e, i_j) \frac{\partial i_j}{\partial t} + i_j \left(\frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial i_j} \frac{\partial i_j}{\partial t} \right) \quad (\text{II. 6})$$

En remplaçant la dérivée temporelle du flux de l'équation (II.6) dans l'équation (II.3), on obtient :

$$V_j = R i_j + \left(L_j(\theta_e, i_j) + i_j \frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial i_j} \right) \frac{\partial i_j}{\partial t} + i_j \Omega \frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial \theta_e} \quad (\text{II. 7})$$

Avec Ω est La vitesse de rotation mécanique. L'équation (II.5) peut être reformulée sous la

forme suivante :

$$V_j = R i_j + L_{inc j} (\theta_e, i_j) \frac{\partial i_j}{\partial t} + E \Omega \quad (II. 8)$$

Avec :

$$L_{inc j} = L_j (\theta_e, i_j) + i_j \frac{\partial L_j (\theta_e, i_j)}{\partial i_j} \quad (II. 9)$$

$$E = i_j \frac{\partial L_j (\theta_e, i_j)}{\partial \theta_e} \quad (II. 10)$$

Où L_{12} est l'inductance incrémentale et E est la force contre électromotrice.[15]

6.2.3 Equation mécanique

Pour réaliser la commande en vitesse du moteur à reluctance variable et concevoir le régulateur, en plus des équations électriques, il est nécessaire de déterminer les paramètres mécaniques du système, son model est décrit par l'équation (II. 11) suivante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_m}{dt} = \Omega \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_{ch} - f\Omega \end{cases} \quad (II. 11)$$

Ou Ω est la vitesse de rotation mécanique, θ ; est la position mécanique, f est le coefficient de frottement, J représente l'inertie du rotor, C ; représente le couple électromagnétique et C_2 est le couple de charge. D'après l'équation (I.7) on a :

$$C_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L (\theta_m)}{\partial \theta_m} = k i(t)$$

Avec :

$$k = \frac{1}{2} i \frac{\partial L (\theta_m)}{\partial \theta_m} \quad (II. 12)$$

Lorsque la machine est à vide ($C_2 = 0$) le modèle dynamique global du moteur à réluctance variable peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_e}{dt} = \Omega \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (k i_j - f\Omega) \\ \frac{\partial i_j}{\partial t} = \frac{1}{L_{incj}(\theta_e, i_j)} (V_j - R i_j - E_j \Omega) \end{array} \right. \quad (II. 13)$$

Avec

$$j = 1, \dots, 3$$

Le seul moyen de déterminer les valeurs inconnues des paramètres de ce modèle est de faire un ensemble de relevés expérimentaux. Comme on ne dispose pas du banc d'essai on va supposer que les paramètres L_{12} , k et E varient entre deux valeurs minimale et maximale.[15]

7. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les différents types de MRV avec leurs constitutions et conditions de fonctionnement avec quelque application industrielle. Le principe de son fonctionnement est expliqué aussi que les équations qui gouvernent la production du couple à l'aide du circuit équivalent du moteur et du principe de la variation de la co-énergie dans un système électromagnétique. Après avoir examiné les bases théoriques pour son fonctionnement, nous allons développer dans la partie suivant les aspects des différents modèles liés à la modélisation de la machine, où nous allons présenter des méthodes numériques pour la résolution et on va compter sur la méthode des éléments finis.

CHAPITRE

IV

Chapitre IV : Modélisation de la MRV par méthode éléments « ANSYS Maxwell »

1. Introduction

Ce chapitre décrit l'établissement d'un modèle mathématique de la structure d'un séparateur qui décrit les processus physiques de conception d'un séparateur magnétique en modélisant, sur la base des équations de Maxwell, qui est un modèle d'équation aux dérivées partielles locales, formé par la combinaison du théorème d'Ampère et de la loi de Faraday en électromagnétisme. Les formes et intensités des aimants permanents, ainsi que les caractéristiques géométriques, sont nécessaires pour la modélisation de tout dispositif de séparation magnétique. La solution de ces équations, qui sont liées aux règles du comportement magnétique du séparateur en, est obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis pour calculer et visualiser la distribution des propriétés de forme et de magnitude magnétiques entourant un séparateur magnétique, dans des états statiques et rotatifs, et d'autres paramètres, avec ou sans présence de particules non ferreuses.

2. La méthode des éléments finis (FEM)

Afin de résoudre le problème mathématique posé, nous faisons appel au logiciel *ANSYS Maxwell Multiphysics*, qui repose sur la méthode numérique des éléments finis (MEF) pour obtenir des solutions approchées des équations aux dérivées partielles régissant le domaine magnétique. La MEF constitue une technique de calcul avancée, largement utilisée dans les domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées, pour traiter des équations différentielles ou intégrales complexes. Elle repose sur le principe de la discrétisation du domaine étudié en un ensemble d'éléments finis, dans chacun desquels la grandeur inconnue est approchée à l'aide de fonctions d'interpolation, souvent des polynômes de Lagrange d'ordre un ou deux. L'interpolation dans chaque élément s'effectue à partir des valeurs en ses nœuds, assurant ainsi la continuité de la fonction inconnue aux interfaces entre les éléments.[41]

2.1 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode des éléments finis réside dans la division du domaine élémentaire de dimensions finies en sous-domaines appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme d'ordre variable selon l'application. Les principales étapes de construction d'une méthode des éléments finis sont les suivantes : il y a des différents types des éléments :

- Discrétisation de l'environnement continu, représentant le domaine d'études dans le sous- domaine (élément).[41]
- Construction de l'approximation nodale par sous-domaine.
- Calcule des matrices élémentaires (pour chaque élément) correspondant à l'intégrale du problème.
- Assemblage de matrices élémentaires en tenant compte des conditions limites
- Résoudre le système d'équation.
- Résoudre le système d'équation.
- Élément linéaire (1D).
- Élément de surface (2D).
- Élément de volume (3D)

3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

3.1. Avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités.
- Temps de calcul relativement avantageux.[42]

3.2. Inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération des domaines infinis.
- Présence des singularités dans le domaine d'études.[42]

4. Implémentation du modèle dans l'ansys Maxwell

ANSYS Maxwell est un logiciel interactif haute performance utilisé Analyse d'éléments limités (FEA) pour résoudre des problèmes électriques ou magnétiques. Maxwell résout les problèmes de champ électromagnétique en résolvant Maxwell Équations dans un espace limité avec des conditions de frontière appropriées et Conditions préliminaires spécifiées par l'utilisateur pour obtenir une solution garantie unicité [27]. L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell qui lient les grandeurs magnétiques aux grandeurs électriques.

5. Conception de la machine à réluctance variable

Le moteur à réluctance variable (MRV ou SRM) construit est de 18 pôles au stator et 12 pôles au rotor de trois phases, ce moteur est alimenté par une source de tension continue de 650 V et un courant de 240A, la vitesse nominale du moteur est de 3000 tr/ min. Le MRV 18/12 en cours de conception doit respecter les caractéristiques couple-vitesse ainsi que le diamètre extérieur (264 mm), et la longueur axiale (108 mm) du stator. Les paramètres du moteur sont présentés dans le tableau 15. La géométrie du moteur MRV 18/12 utilisé dans notre travail est présentée sur la figure 51. Sur la figure II.3, β_s et β_r sont les arcs polaires du stator et du rotor, D_s et D_{in} sont le diamètre extérieur et intérieur du noyau du stator, D_r et D_{inr} sont le diamètre extérieur et intérieur du noyau du rotor, h_s et h_r sont les hauteurs des pôles du stator et du rotor, t_s et t_r sont les largeurs des pôles du stator et du rotor, y_s et y_r sont les largeurs de culasse du stator et du rotor

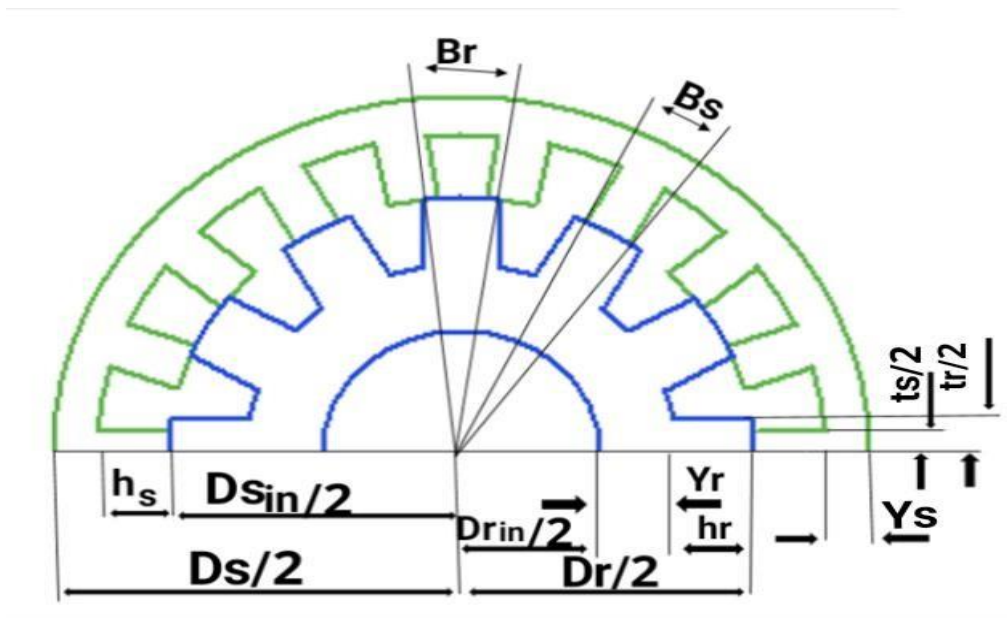


Figure 37 Géométrie du moteur MRV 18/12

Tableau 10 Paramètres géométrique du MRV

Paramètres	Valeur
Nombre de pôles du stator	18
Diamètre extérieur du stator [mm]	264
Diamètre intérieur du stator [mm]	190
Hauteur des pôles du stator [mm]	87
Arc polaire du stator [deg]	0.5

Largeur de culasse du stator [mm]	14
Facteur de remplissage de fente [%]	0.95
Nombre de spires	13
Epaisseur d'entrefer [mm]	0.5
Nombre de pôles du rotor	12
Diamètre extérieur du rotor [mm]	189
Diamètre intérieur du rotor [mm]	80
Hauteur des pôles du rotor[mm]	87
Arc polaire du rotor [deg]	0.5
Largeur de culasse du rotor [mm]	25
Rayon de pointe polaire (pole tip radius) [mm]	4
Rayon du fond du poteau (pole bottom radius) [mm]	4

Le moteur MG2 a une puissance nominale maximale de 60 kW, un couple nominal maximal de 207 Nm et une vitesse de rotation maximale de 10 000 tr/min. On note à travers la comparaison entre le MSAP et MRV 18/12 que le moteur MSAP peut être remplacé par le moteur MRV 24/16, notamment en termes de taille, de performance et de rendement électrique.

Tableau II - 2 : Comparaison entre IPMSM et MRV*

*Tableau 11 Comparaison entre IPMSM et MRV**

Moteur	MSAP	MRV 18/12
Critère		
Diamètre extérieur du stator	264 mm	264 mm
Longueur axiale	108 mm	107 mm
Epaisseur d'entrefer	0.8 mm	0.5 mm

Nombre de spires	12	13
Facteur de remplissage	54	54
Tension d'alimentation DC	650 v	650v
Courant nominal DC	240 A	240A
Le couple maximale	207 nm	208 nm
Plage de vitesse	2768 tr/min _13900 tr/min	2768 tr/min _13900 tr/min

Spécifications des matériaux du MRV 18/12

Les matériaux utilisés dans le moteur affectent les caractéristiques du moteur telles que le poids, la température de fonctionnement et divers changements climatiques qui peuvent affecter le fonctionnement du moteur, il est donc essentiel de choisir les matériaux qui conviennent à la nature et garantir une durée de vie plus longue et un bon travail. Le tableau 17 montre les matériaux utilisés dans notre moteur MRV 18/12

Tableau 12 Matériaux utilisés dans le MRV 18/12

Description	Matériau
Stator	Steel_1008
Rotor	Steel_1008
fil de bobinage	cuivre: 100 %
Matériau isolant dans le stator	résine époxy

5.2. Maxwell Designs

Un design peut être ajouté à un projet Maxwell à partir de la barre de menu Projet

5.2.1 Types de Maxwell Designs- RMxpert :

Rotating Machinery Expert est un outil analytique interactif utilisé pour concevoir et Analyser des machines électriques.

- Maxwell 2D :

Maxwell 2D utilise l'analyse par éléments finis pour simuler et résoudre des champs électromagnétiques 2D dans des plans XY ou RZ

- Maxwell 3D :

Maxwell 3D utilise l'analyse par éléments finis pour simuler et résoudre des champs électromagnétiques.

5.2.2 Maxwell GUI (Graphical user interface)

On simplifier la GUI de l'ansys Maxwell sur la (figure 2.2) suivant :

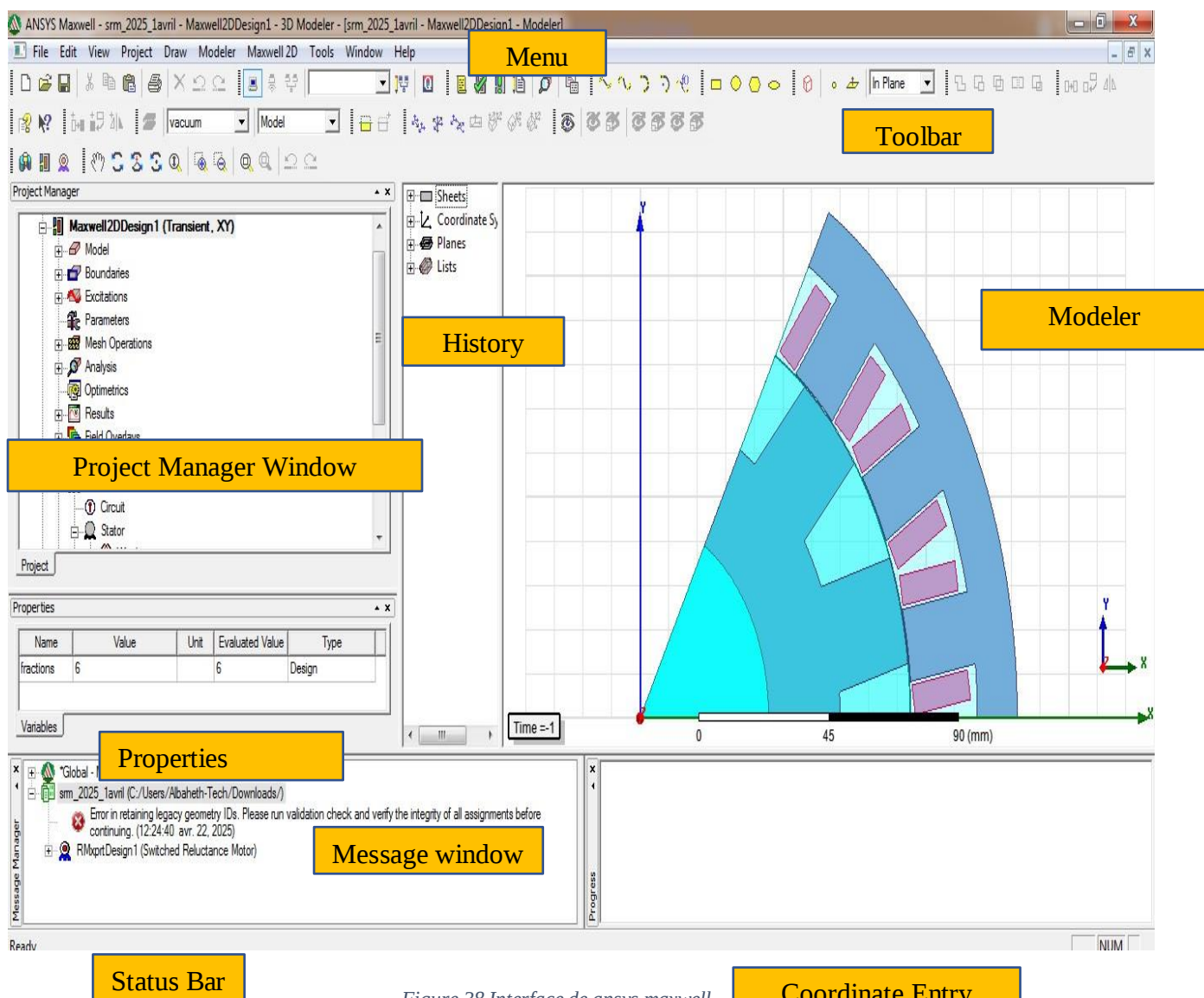


Figure 38 Interface de ansys maxwell

a) Menu bar

Si tu cliques sur le menu bar vous trouverez la :

- **File Menu** : Ouverture, fermeture et sauvegarde d'un projet.
- **Edit Menu** : Sélection et manipulation de la géométrie.
- **View Menu** : Définir l'option d'affichage ou masquer/afficher l'objet géométrique.
- **Project Menu** : Insérer les dessins, Ensembles de données et variables du projet.
- **Draw Menu** : Objets géométriques de primitives.
- **Modeler Menu** : les Opérations de géométrie et commandes d'analyse
- **Maxwell 3D/2D Menu** : Configuration de l'analyse Maxwell et contrôles après traitement.
- **Outils, Fenêtre et Aide** : Enregistrement et exécution des scripts, gestion des fenêtres, accès aux commandes d'aide.

b) Project Manager window

La fenêtre Project Manager contient tous les détails de la configuration du problème Effectuée pour n'importe quel projet on peut le voir sur la (figure 2.3.) ci-dessous :

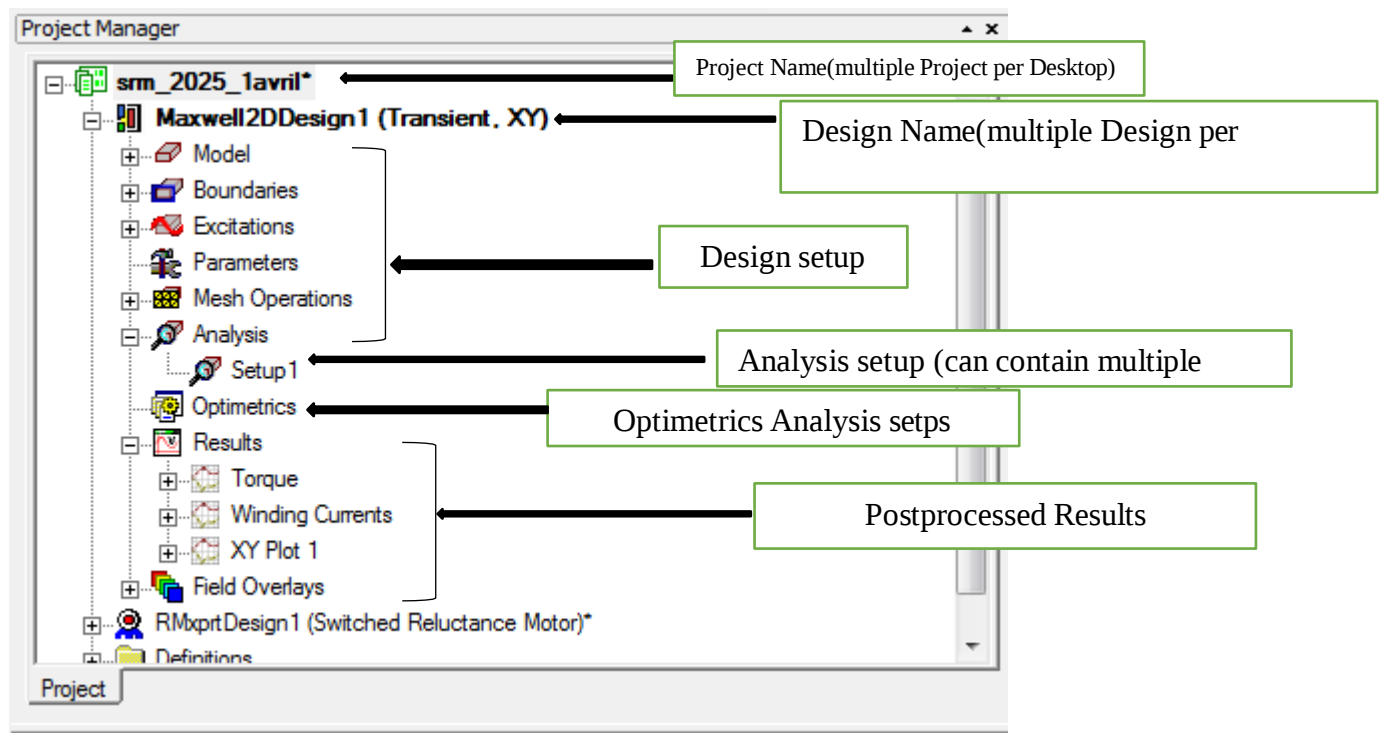


Figure 39 interface de Project manager

c) History Tree

- L'arbre historique contient les détails de toutes les opérations géométriques effectuées dans un Design, Toute ligne, surface ou objets solides, systèmes de coordonnées ou ses plans peuvent être accessible à partir de l'arbre historique,

Les objets solides sont catégorisés en fonction des matériaux assignés en 3D tandis que les objets en feuille 2D sont catégorisés

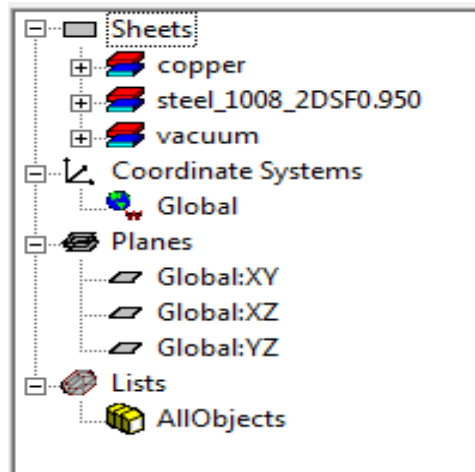


Figure 40 interface de History Tree

d) Toolbar

➤ La plupart des commandes de la barre de menus sont accessibles à partir de la barre d'outils sous forme d'icône, La barre d'outils peut être personnalisée pour ajouter ou supprimer des options en cliquant avec le bouton droit de la souris sur la barre d'outils ou en sélectionnant l'élément de menu

Tools→Customize

e) Properties Window

➤ Affiche toutes les propriétés de ces entités et L'entité sélectionnée peut être un objet géométrique, des opérations géométriques réalisées à partir de l'arborescence historique ou des entités de configuration ajoutées sélectionnées à partir du projet Fenêtre gestionnaire en suit La fenêtre Afficher les propriétés change selon l'entité choisie.

Double-cliquer sur une entité sélectionnée lancera également une boîte de dialogue pour la propriété afficher et éditer.

f) Coordinate Entry Field

➤ Cette fenêtre s'affiche à chaque transaction nécessitant l'entrée de coordonnées et les valeurs de coordonnées peuvent être saisies sous forme cartésienne, cylindrique ou sphérique



Figure 41 Les coordonnées

g) Status Bar

Affiche l'état de la fenêtre Maxwell, invite la marche à suivre pour toute opération géométrique ou des informations sur une commande sur laquelle la souris est placée

h) Message Window

- Affiche les messages d'erreur, d'avertissement ou d'information résultant d'une opération
- Il est possible de copier et coller des messages dans un fichier texte, si nécessaire.

i) Progress Window

- Indique l'état d'avancement de l'analyse en cours.

5.2.3 Solvers in Maxwell**5.2.2.1 Type de solveur**

- Le solveur Maxwell approprié peut être choisi selon l'application à résoudre.
- Le type de solveur peut être défini en sélectionnant l'élément de menu

Maxwell 2D→Solution type

- Pour la 2D, les utilisateurs peuvent également préciser si le problème sera résolu sur le plan XY ou RZ

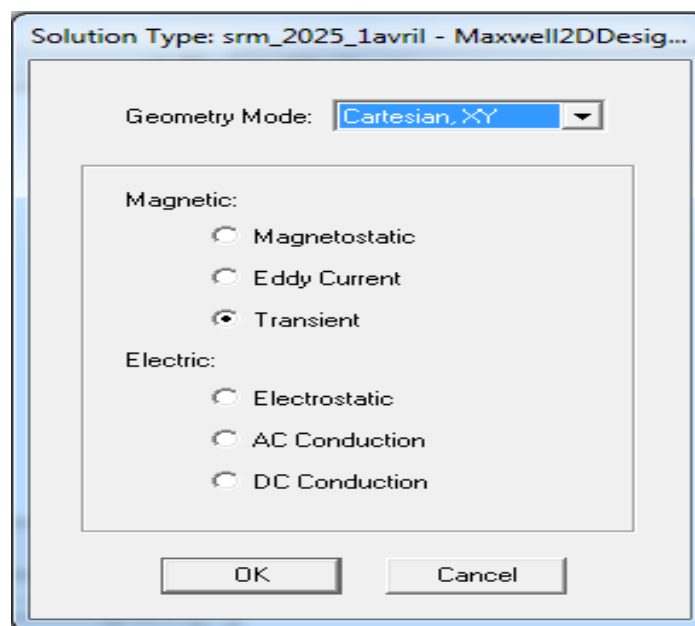


Figure 42 Type de Solution(Maxwell 2D)

a. Magnetic Solvers

- Magnetostatic Solver :

- Résout les champs magnétiques statiques causés par les courants DC et les aimants permanents.
- Peut résoudre les matériaux linéaires et non linéaires.

- Eddy Current Solver :

- Résout les champs magnétiques sinusoïdaux dans le domaine de fréquence.

Résout uniquement les matériaux de revêtement en 3D. Considère les courants de déplacement. Les champs induits tels que la peau et les effets de proximité actuels sont également pris en compte

- Transient Magnetic :

- Résout les champs magnétiques transitoires causés par des sources électriques temporelles ou mobiles et des aimants permanents dans des matériaux linéaires ou non linéaires. Les champs induits tels que la peau et les effets de proximité actuels sont pris en compte.

b. Electric Solvers

- Electrostatic Solver :

- Résout les champs électrostatiques dans des matières linéaires.

- DC Conduction :

- Résout la tension, le champ électrique et la densité de courant à partir du potentiel.
- Peut résoudre les champs électriques dans les isolateurs aussi bien.

- AC Conduction (seulement 2D) :

- Résout les champs électriques sinusoïdaux dans le domaine Fréquence. Disponible uniquement avec le solveur 2D.

- Transient Electric :

- Champs électriques transitoires causés par des tensions, des distributions de charge ou des excitations de courant dans des matériaux non homogènes. Le potentiel électrique est la quantité de solution.

5.2.3 Maxwell Geometry

ANSYS Maxwell utilise une technique de modélisation primitive où la structure de base est créée à l'aide de primitives de géométrie, puis les opérations de géométrie sont effectuées pour atteindre l'objet final. La géométrie peut également être créée dans ANSYS Design Modeler et peut être utilisée dans Maxwell via l'interface ANSYS Workbench qui a été discutée en ANNEXE.

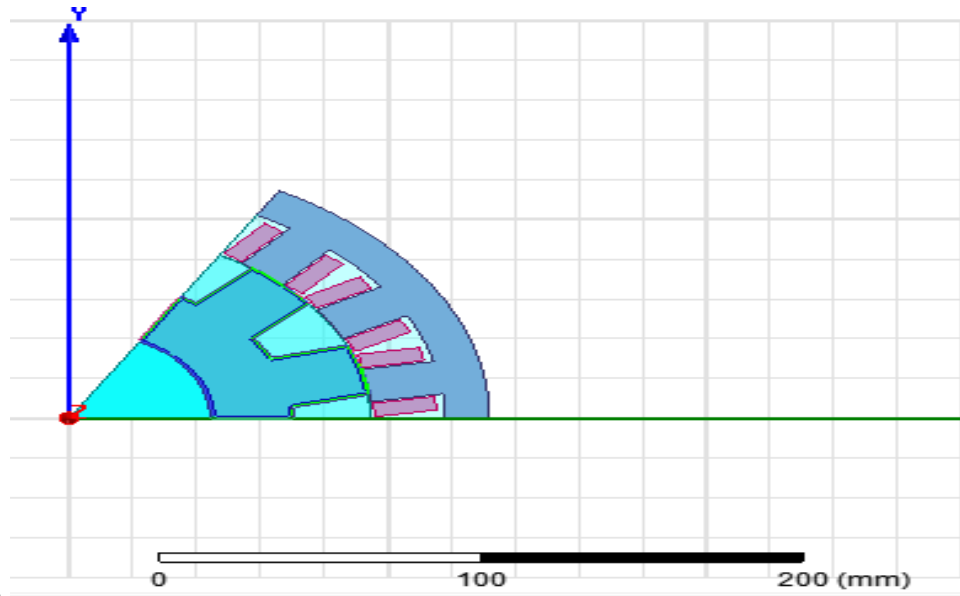


Figure 43 une géométrie

- Geometry Selection :

➤ Les commandes de sélection de géométrie sont accessibles via la barre de menu Modifier ou un clic droit sur l'espace de dessin

- Geometry Coordinate :

➤ Un CS relatif peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate** → **System** → **Create** → **Relative CS**

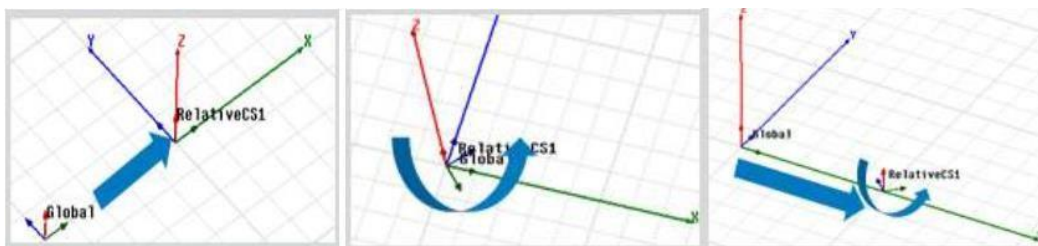


Figure 44 Création de coordonnées de systèmes

a- décalage
tourné

b-tourné

c-décalage et

- Face Coordinate Systems :

➤ Visage de CS peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate System** → **Create** → **FaceCS**

- Object Coordinate Systems :

➤ L'objet de CS peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate System** → **Create** → **Object CS**

- Geometry Creation :

➤ Les entités géométriques peuvent être créées à l'aide de primitives dans la barre de menus **Draw**

	Inputs
Line Objects	
Line	Start and End Points
Spline	Start, intermediate and end points
Arc	Coordinates of Three points of arc or Center and two end points
Equation Based Curve	X, Y, Z Coordinates as a function of the variable " _t "
Sheet Objects	
Rectangle	Coordinates of two diagonal points
Ellipse	Coordinates of center and major, minor radius
Circle	Coordinates of center and Radius
Regular Polygon	Coordinates of center, Radius and Number of sides
Equation Based Surface	X, Y, Z coordinates as a function of the variable " _u " and " _v "
Solid Objects	
Box	Coordinates of two diagonal points of base and height
Cylinder	Coordinates of center of base and radius
Regular Polyhedron	Coordinates of center of base, radius and number of segments
Cone	Coordinates of center of Base, lower and higher radius and height
Sphere	Coordinates of center and radius
Torus	Coordinates of Center, Inner and Outer radius
Helix	Sheet defining cross section, helix vector, pitch and turns
Spiral	Sheet defining cross section, spiral vector, radius change and turns

Figure 45 Création de géométrie à partir de primitives

1. Résultats d'analyse du modèle avec " Ansys Maxwell" :

L'étude des performances du moteur consiste à l'analyse des caractéristiques suivantes : Des inductances, de couple électromagnétique-vitesse ; de couple électromagnétique ; et caractéristique de densité du flux dans l'entrefer. Une fois terminé l'analyse du modèle on a obtenu les résultats ci-dessous qu'on peut visualiser en cliquant sur « Results » et on aura les figures suivantes :

6.1. Caractéristiques électriques et mécaniques :

Avec Maxwell Ansys, nous avons également pu extraire les propriétés et valeurs électriques et mécaniques du modèle utilisé dans ce travail sous forme de tableau, tels que le courant, le couple, la tension, le rendement, la puissance de sortie, etc., comme indiqué dans le tableau 18

Tableau 13 Caractéristiques électriques et mécaniques

	Prototype Design 1
Torque(N.m)	208
Output power(kw)	60.3
Efficiency(%)	91.5
RMS voltage(v)	650
RMS current(A)	192

6.2. Les pertes :

Grâce au logiciel Maxwell Ansys, nous avons pu calculer toutes les pertes du moteur, sur un tableau simple et précis indiquant les pertes de cuivre et de fer, y compris les pertes par Pertes par frottement et ventilation Transistor. etc. Les pertes totales générées sont de 5599.9W, le maximum des pertes était enregistré si les pertes dans le cuivre (pertes joule) en 5599.75W (81,06%). Comme indiqué dans le tableau 19.

Tableau 14 Pertes principales générées par le moteur MRV

	Prototype Design1
Frictional and Windage Loss(w)	0
Iron-CoreLoss(w)	0.144847
Winding Copper Loss(w)	5599.75
Diode Loss(w)	0
Transistor Loss(w)	0
Total Loss(w)	5599.9

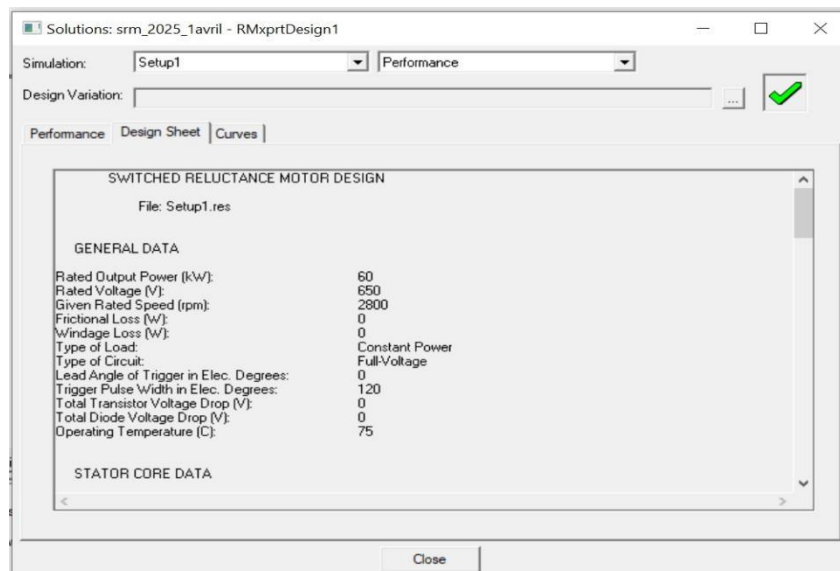
2. Extraction des données de performance à partir de RMXprt dans ANSYS Maxwell:

Après avoir terminé la conception du moteur à réluctance variable à l'aide de l'outil **RMXprt** dans le logiciel **ANSYS Maxwell**, une simulation préliminaire est lancée en exécutant l'analyse (Analyze) pour le paramètre défini (par exemple : *Setup1*). Une fois le calcul terminé, les résultats peuvent être consultés via l'onglet "**Performance**", puis en sélectionnant "**Design Sheet**", où s'affiche une fenêtre contenant un tableau récapitulatif des principales caractéristiques du moteur. Le tableau fournit des informations techniques importantes telles que :

- La puissance nominale (*Rated Output Power*), la tension nominale (*Rated Voltage*) et la vitesse de rotation nominale (*Rated Speed*).
- Le type de charge (*Type of Load*) et le type de circuit d'alimentation (*Type of Circuit*).
- L'angle de déclenchement (*Lead Angle*) et la largeur d'impulsion de commande (*Trigger Pulse Width*).
- Les pertes électriques et mécaniques, ainsi que la température de fonctionnement.

Ces données constituent une référence essentielle pour l'évaluation des performances globales du moteur. Elles sont ensuite utilisées pour valider la conception ou pour passer à une simulation plus détaillée à l'aide des modules Maxwell 2D ou 3D.

Les données ont été extraites directement après la simulation, via la fenêtre **Curves** dans l'onglet **Performance** de l'outil RMXprt. Ces valeurs sont affichées automatiquement après avoir cliqué sur le paramètre de l'analyse exécutée (tel que **Setup1**). Les courbes (Curves) sont principalement utilisées pour analyser le comportement du système et déterminer les facteurs influençant ses performances.



Les courbes montrent la relation entre le flux lié et le courant à différentes positions du rotor, ce qui met en évidence l'effet de la position sur les caractéristiques de saturation magnétique de la machine

On remarque que le flux augmente de manière non linéaire avec le courant, surtout aux faibles angles, ce qui indique une entrée en saturation de la machine.

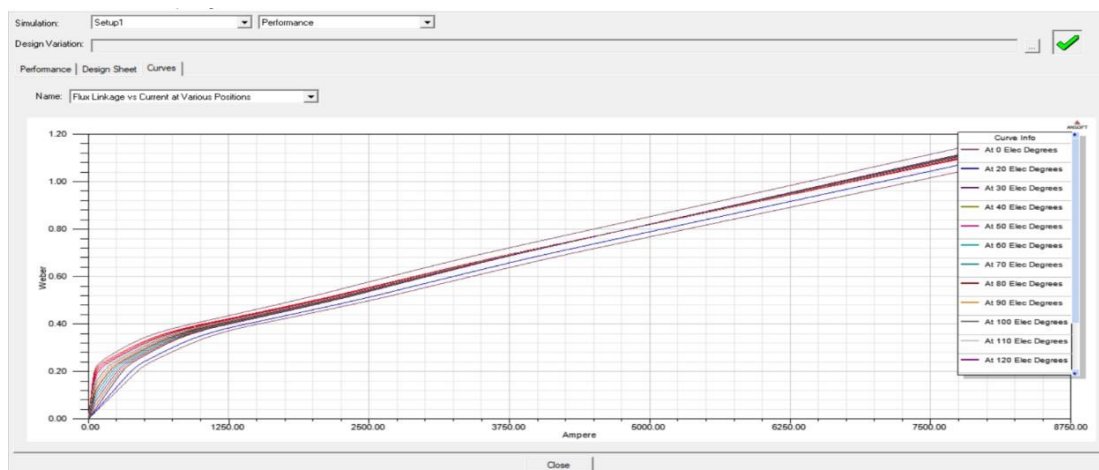


Figure 46 Courbe du Flux en fonction de le courant à différentes positions

Le graphique montre une diminution rapide du courant continu d'entrée avec l'augmentation de la vitesse ce qui reflète une amélioration de l'efficacité du moteur à haute vitesse et une réduction du besoin en courant pour maintenir les performances dynamiques

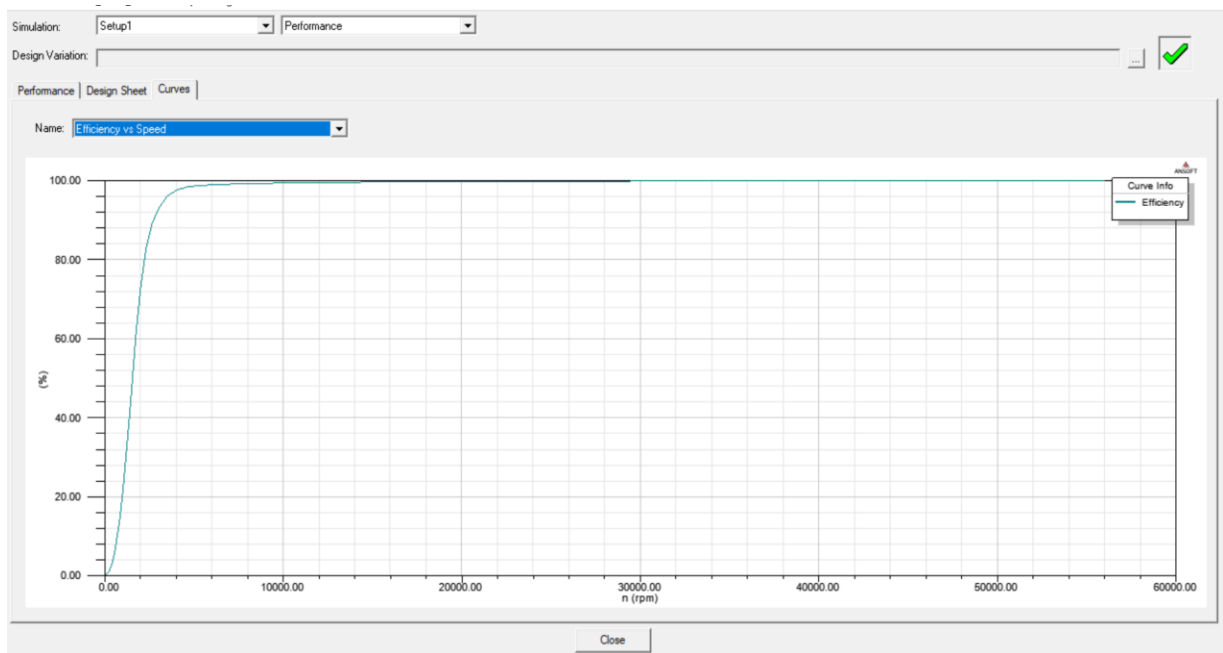


Figure 47 Courbe du courant continu d'entré en fonction de la vitesse

Le graphique montre la relation entre le rendement et la vitesse de rotation. Le rendement augmente rapidement à basse vitesse, puis se stabilise à des niveaux élevés avec l'augmentation de la vitesse. Cette relation est essentielle pour analyser les performances des systèmes techniques et déterminer la plage de fonctionnement optimale afin d'atteindre une efficacité opérationnelle élevée.

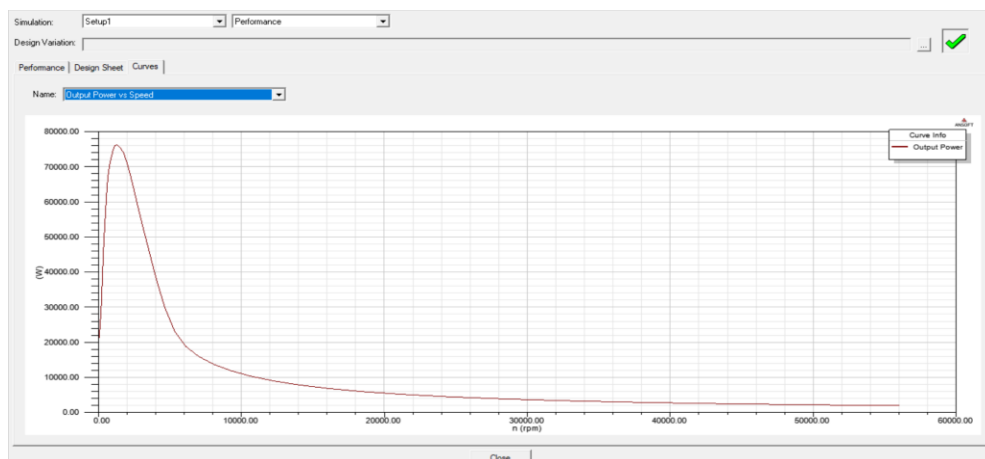


Figure 48 Courbe du le rendement en fonction de la vitesse de rotation

Le graphique montre la diminution de la puissance mécanique avec l'augmentation de la vitesse de rotation, commençant par une valeur élevée à basse vitesse puis se stabilisant à des niveaux inférieurs à mesure que la vitesse augmente. Cette relation est importante pour analyser les performances des systèmes dynamiques et déterminer la plage de fonctionnement optimale.

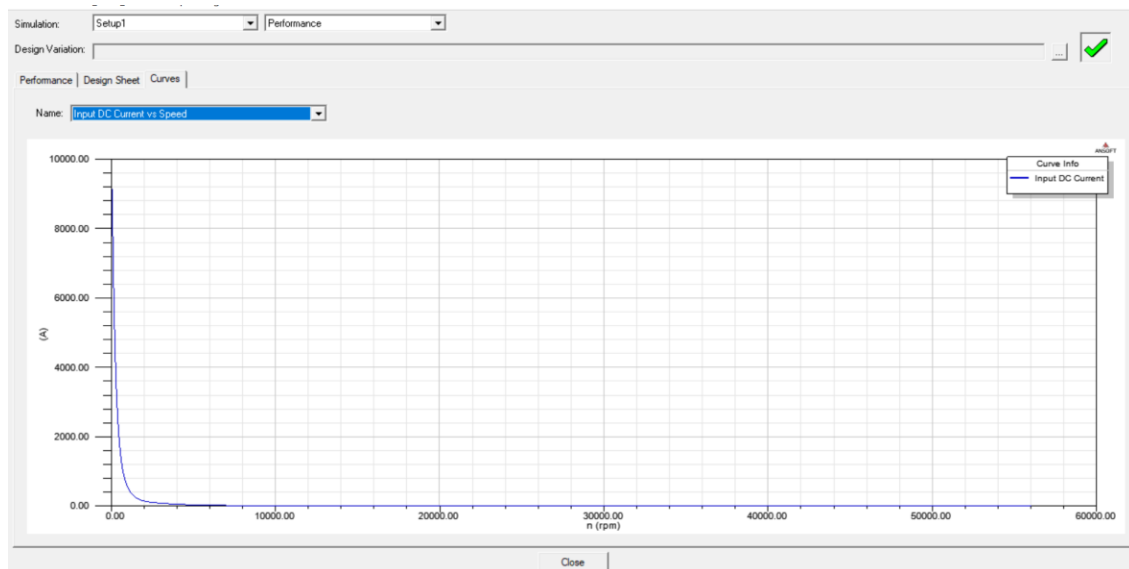


Figure 49 Courbe de variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation

Le graphique montre la relation entre le couple mécanique et la vitesse de rotation. Le couple commence à une valeur élevée à basse vitesse, puis diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à atteindre une certaine stabilité. Cette relation est utilisée pour analyser les performances des moteurs et déterminer la plage de fonctionnement optimale.

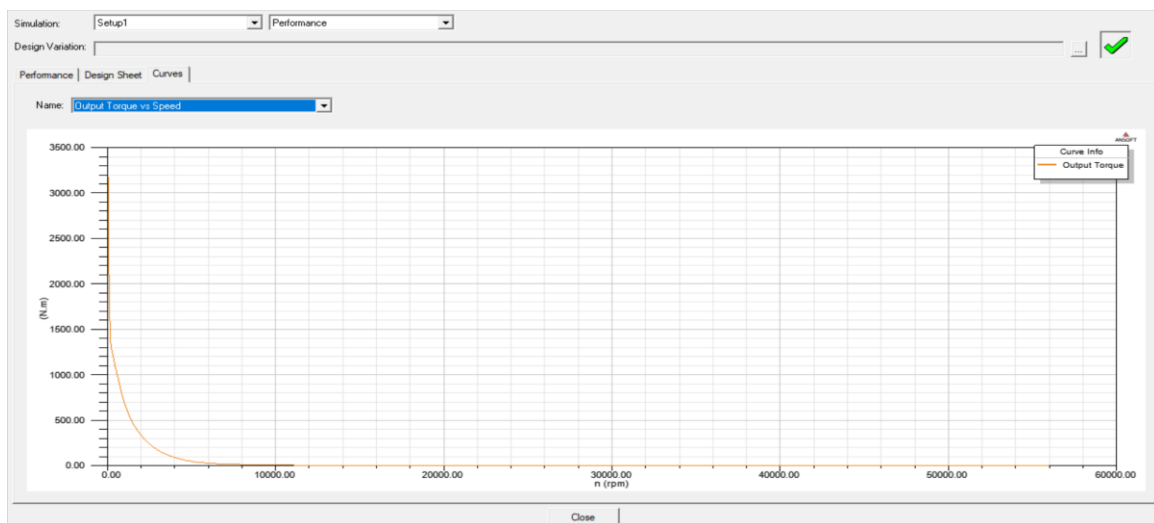


Figure 50 Courbe du le couple mécanique en fonction de la vitesse de rotation

Le graphique montre la forme du courant de phase résultant de la simulation. On remarque que le courant n'est pas sinusoïdal et présente des pics prononcés, ce qui indique la présence d'harmoniques élevées pouvant affecter les performances de la machine électrique.

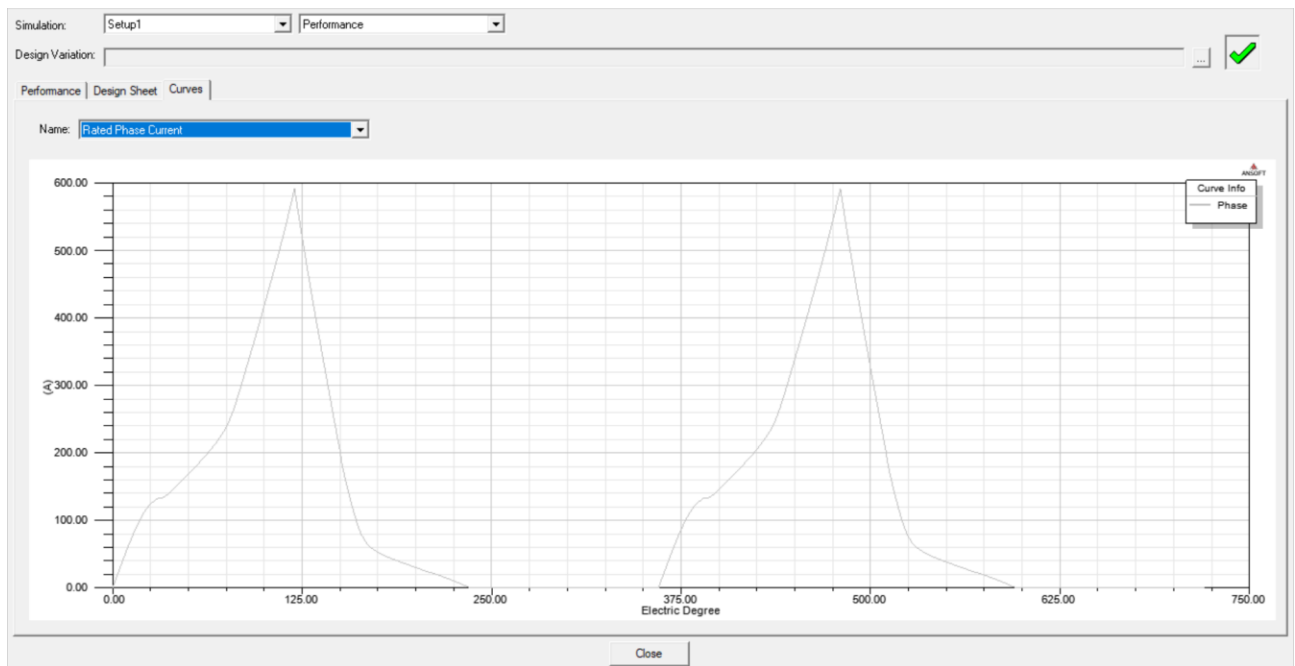


Figure 51 forme du courant de phase issue de la simulation

Le graphique montre la relation entre le « courant de phase maximal » et le « degré électrique », et montre deux pics marquants, avec un courant atteignant 12 000 ampères. Cette analyse est importante pour comprendre les performances du système électrique et le comportement du courant en fonction de l'angle électrique.

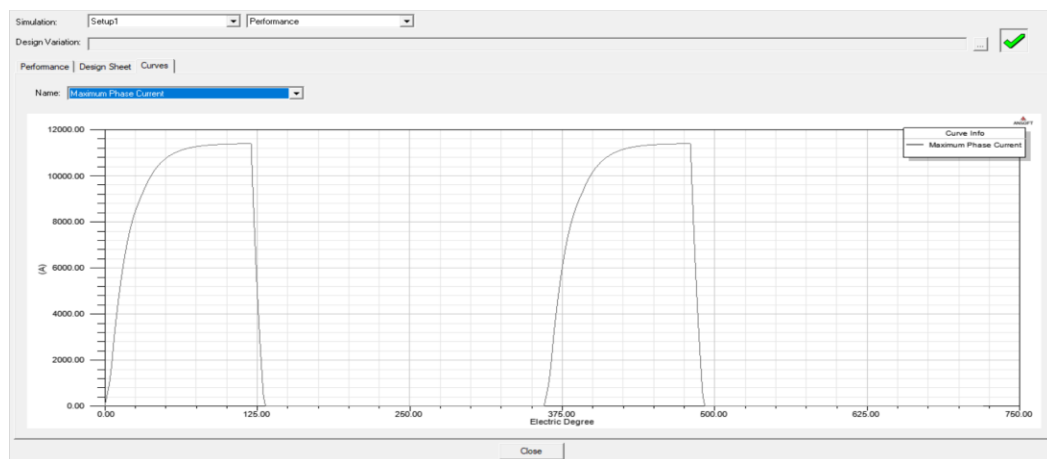


Figure 52 variation du courant de phase maximal en fonction du degré électrique

Le graphique montre la forme du couplage de flux (Flux Linkage) en fonction de l'angle électrique. On observe que la courbe adopte une forme triangulaire régulière, ce qui indique une variation linéaire du flux due au mouvement du rotor à l'intérieur de la machine électrique.

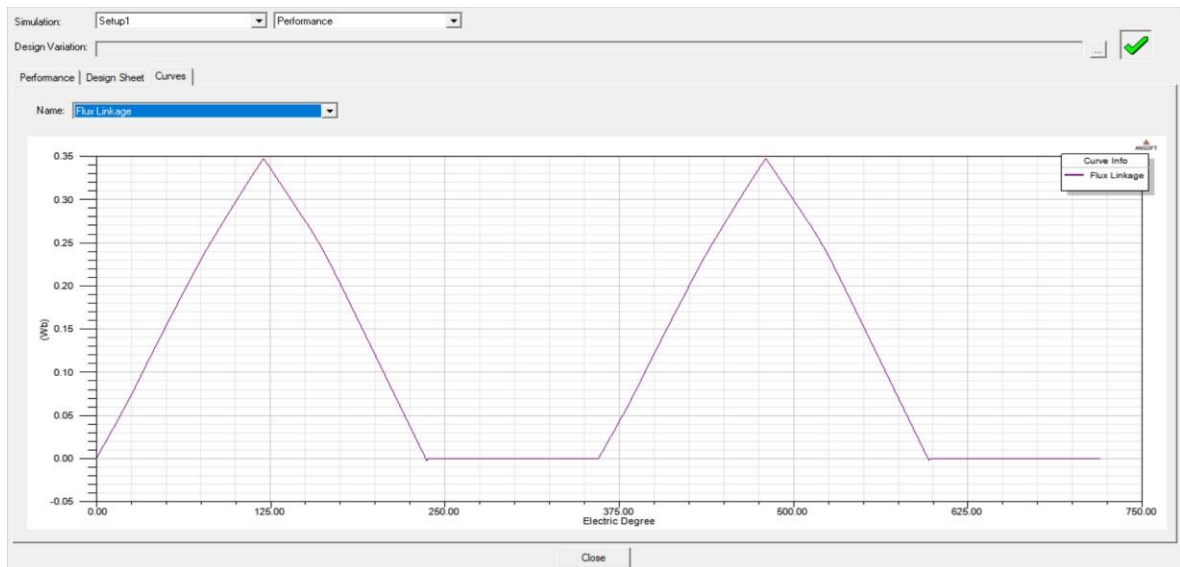


Figure 53 Courbe de couplage de flux en fonction de de l'angle électrique

Le graphique montre la variation de l'inductance avec l'angle électrique, présentant un motif périodique avec des pics à 125 et 500 degrés électriques. Cela est important pour analyser les performances des composants électriques tels que les inductances dans différentes applications.

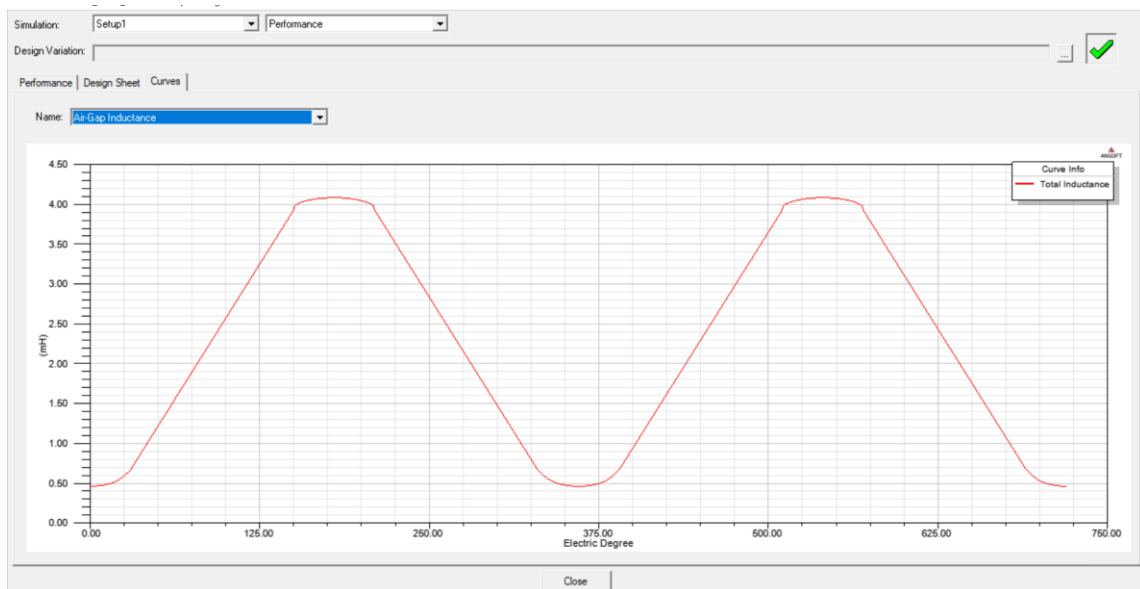


Figure 54 la variation de l'inductance en fonction l'angle électrique

Le graphique montre la forme de la tension de phase résultant de la simulation. Elle apparaît sous forme d'une onde carrée reflétant la méthode de commutation de l'onduleur (Inverter), ce qui indique l'utilisation d'un contrôle non sinusoïdal générant des tensions fortement harmoniques.

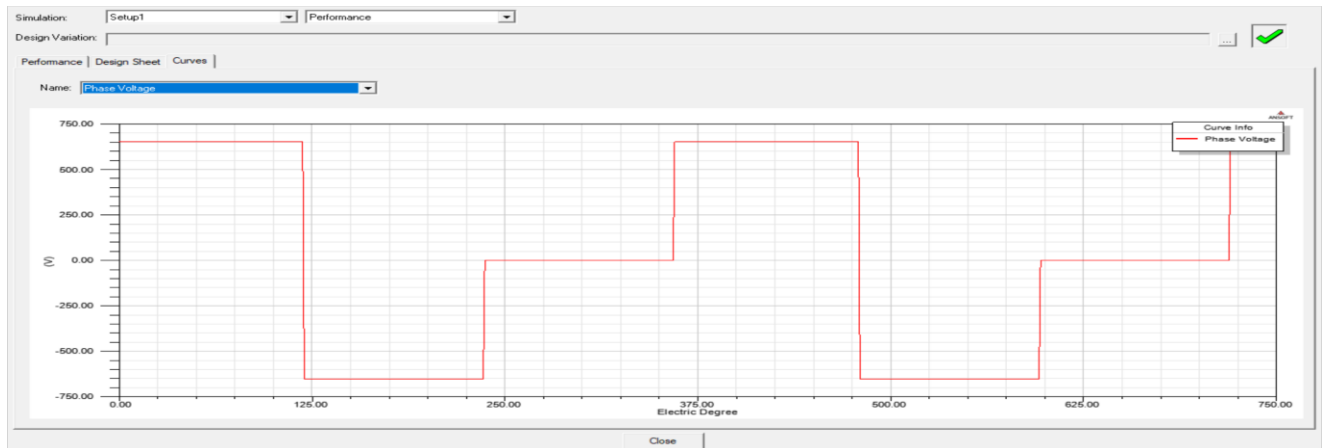


Figure 55 Forme d'onde carré de la tension de phase

3. Analyse électromagnétique 2D dans Maxwell :

Après la validation initiale de la conception à l'aide de RMxpert, une analyse plus détaillée a été réalisée dans **Maxwell 2D**, qui permet une modélisation plus précise du comportement électromagnétique du moteur à réluctance variable. Contrairement à RMxpert, qui utilise des modèles analytiques simplifiés, **Maxwell 2D** repose sur la méthode des éléments finis (FEM) pour simuler les phénomènes physiques dans le moteur avec plus de fidélité.

Cette étape de simulation 2D permet notamment d'observer :

- La distribution du flux magnétique dans le stator et le rotor.
- La densité de flux (Flux Density) dans les différentes parties du moteur.
- Le couple électromagnétique instantané (Instantaneous Torque).
- L'évolution temporelle des courants dans les bobines.
- Les pertes magnétiques et par courant de Foucault (si les matériaux sont définis en conséquence).

8.1. Maillage de la machine a reluctance variable

Pour obtenir un calcul précis de la force, nous avons besoin d'un maillage particulier très fine de chaque milieu. Il est également judicieux d'utiliser un maillage fin dans l'aimant et son noyau de fer, car cela le calcul du champ magnétique sera plus exact.

- Cliquez-gauche sur la fenêtre **Maxwell 2D**, Sélectionner **Mesh Operation** et puis **Assign** et choisissez le type des opérations de maillage.

- Types d'opérations de maillage :

- Sur la sélection / Longueur
- Sur sélection / Profondeur de peau
- Sélection interne / Basé sur la longueur
- Approximation de surface
- Résolution du modèle
- Traitement de l'écart cylindrique

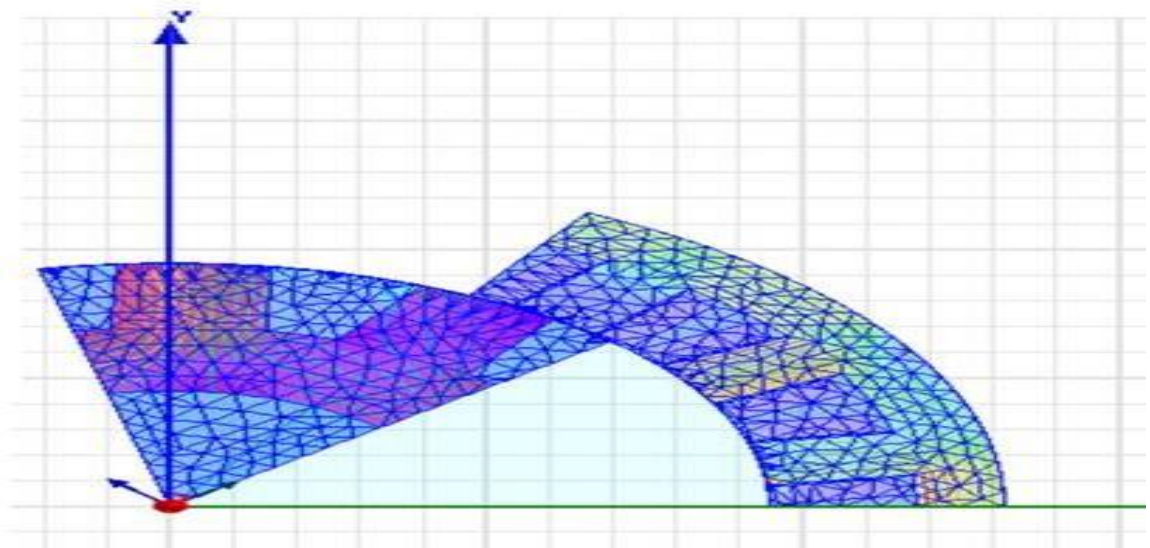
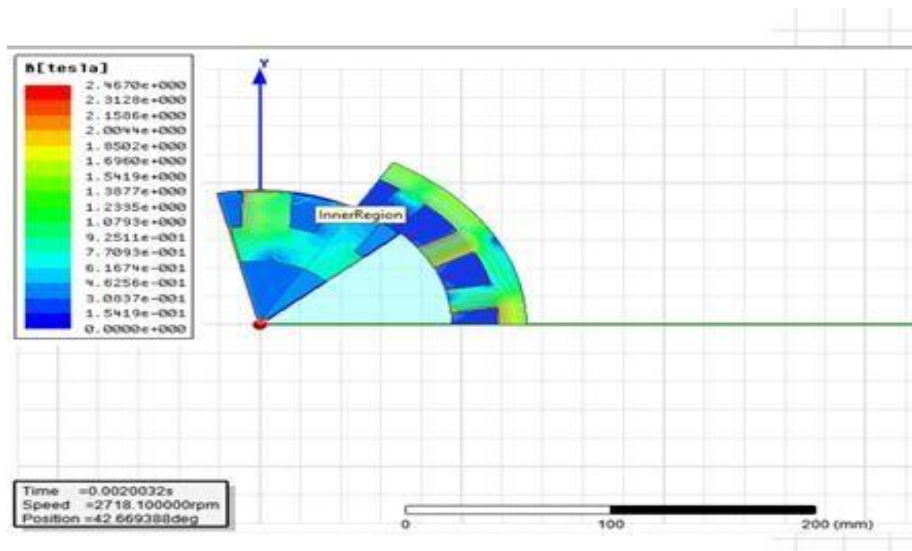


Figure 56 Maillage d'un segment de machine à réluctance variable dans Ansys Maxwell

8.2. Analyse de flux magnétique dans la machine

Répartition de la densité de flux magnétique (B) à l'intérieur du moteur à un instant donné lors de la simulation transitoire effectuée avec **Maxwell 2D**. La carte en couleurs met en évidence les zones de forte densité de flux (en rouge) et les zones de faible densité (en bleu). On observe que le flux se concentre principalement dans les dents (Teeth) et les chemins magnétiques du stator et du rotor, ce qui reflète la circulation du flux induit par l'excitation électrique des enroulements. En bas de l'image, on trouve des informations temporelles indiquant la vitesse de rotation (2718,1 tr/min) et la position angulaire du rotor (environ $42,67^\circ$), ce qui permet de relier l'instant représenté à la phase temporelle de la simulation.



8.3. Analyse du potentiel magnétique vectoriel dans la machine

La figure présentée illustre la distribution du potentiel magnétique vectoriel dans une portion de la machine, à un instant précis (0,0020032 s), correspondant à une vitesse de rotation d'environ 2718 tr/min et une position angulaire du rotor de 42,67°. Le potentiel magnétique vectoriel est exprimé en Weber par mètre (Wb/m), et sa répartition est visualisée par une échelle de couleurs allant du rouge (valeurs positives) au bleu (valeurs négatives).

Cette cartographie permet d'analyser la répartition spatiale du flux magnétique au sein du circuit magnétique de la machine, englobant le stator et le rotor. Elle est particulièrement utile pour identifier les zones de forte densité de flux susceptibles d'entraîner une saturation magnétique, ainsi que les régions où le flux peut être mal orienté ou non uniformément réparti.

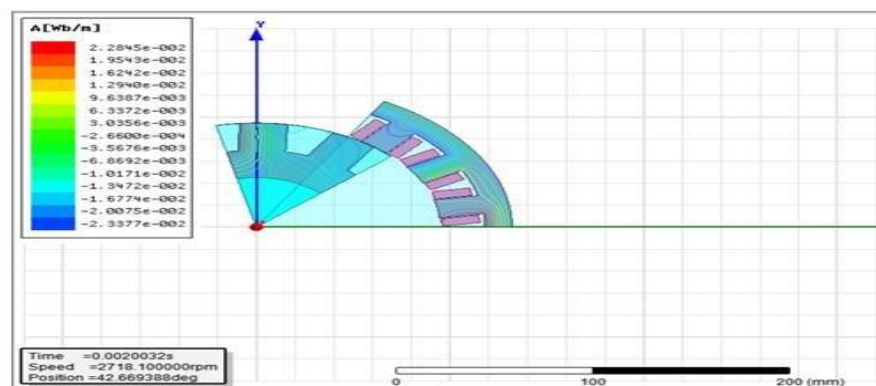


Figure 58 Répartition de potentiel vecteur (A) à l'intérieur du moteur

8.4 Couple électromagnétique dans la machine

représente l'évolution du couple électromagnétique généré par la machine durant la même période de simulation. Le graphe montre un couple élevé dépassant 500 N.m, avec la présence d'ondulations périodiques. Ces ondulations sont dues aux variations du flux magnétique dans la machine, causées par la structure géométrique des pôles statoriques et rotoriques

Malgré ces ondulations, la valeur moyenne du couple reste élevée, démontrant la capacité de la machine à fournir un couple important dès les basses vitesses. Cela confirme son adéquation pour des applications nécessitant un couple de démarrage élevé, comme la traction électrique dans les véhicules hybrides.

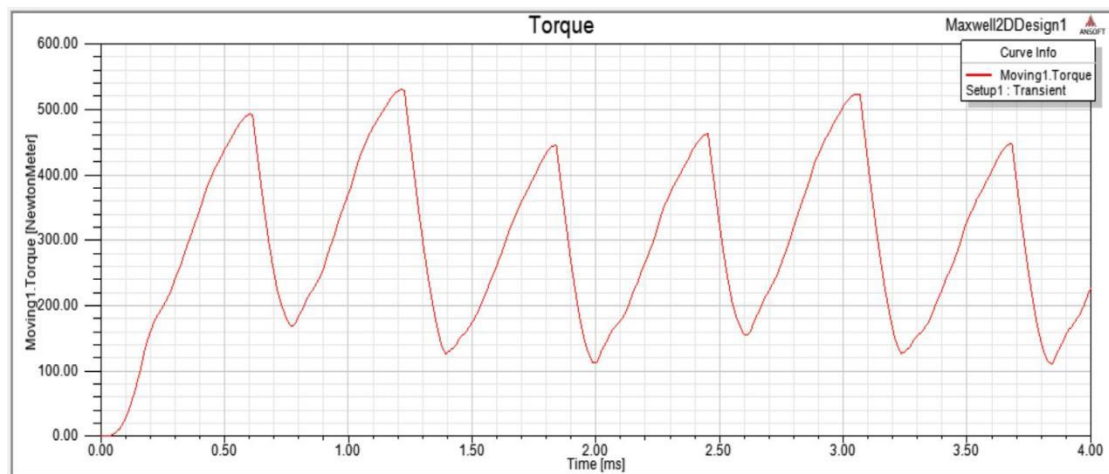


Figure 59 Évolution du couple électromagnétique instantané obtenu lors de la simulation transitoire

8.5 Courants dans la machine :

Ces courants représentent ceux qui circulent dans les enroulements des trois phases (A, B, C). On observe que les courants sont de forme non sinusoïdale, prenant l'apparence d'impulsions nettes et successives. Ce comportement traduit un mode d'alimentation par courants pulsés (Pulsed Currents), généralement générés par un onduleur triphasé commandé électroniquement

Chaque phase est alimentée de manière séquentielle en fonction de la position du rotor, permettant ainsi une génération de couple efficace. Ce mode d'alimentation est typique du fonctionnement des machines à réluctance variable, où le contrôle précis du courant en fonction de la position rotorique permet d'optimiser les performances et de réduire les pertes. désymétriedans l'alimentation électrique

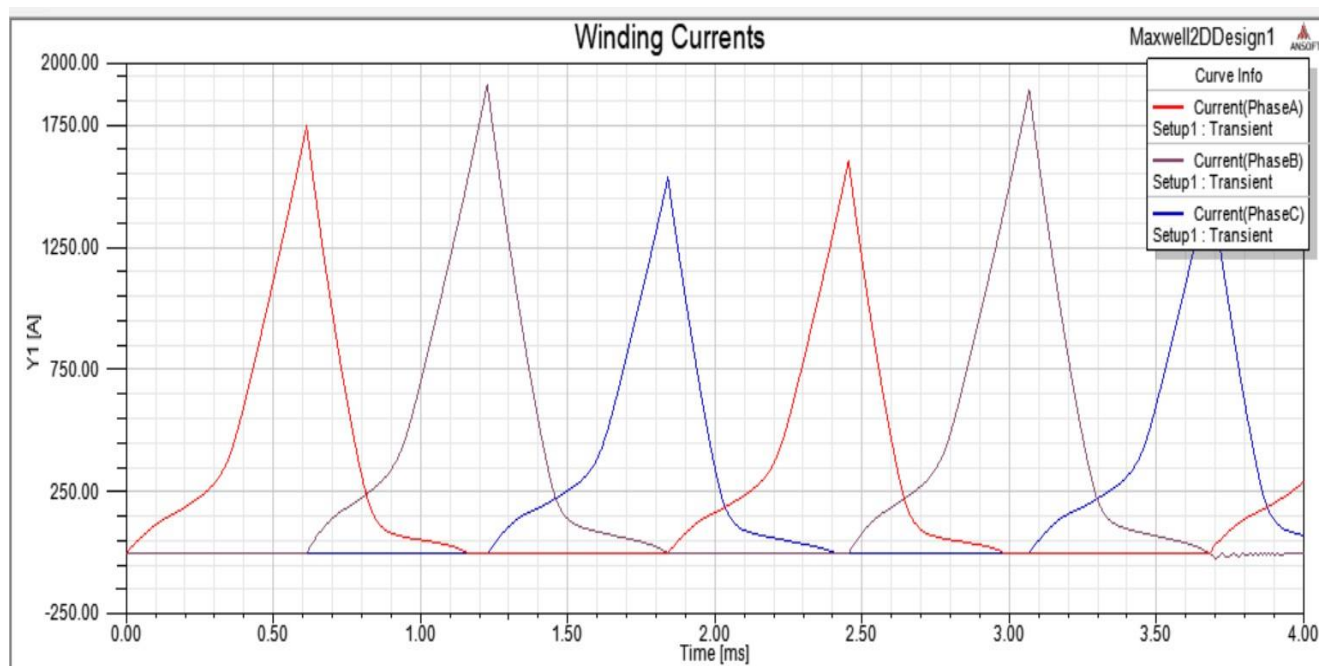


Figure 60 Répartition des courant s'alimentation du moteur

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les modèles mathématiques qui régissent les phénomènes impliqués dans la physique de la séparation magnétique. Nous avons examiné en détail le phénomène magnétique résultant de l'application d'un champ magnétique, ainsi que la réaction des particules à séparer, nous avons utilisé la méthode des éléments finis en 3D par l'exploitation du Maxwell Ansys pour résoudre le modèle d'un séparateur.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, un moteur MRV a été conçu et utilisé comme moteur de traction dans une application de véhicule électrique hybride dans Toyota Prius 2010. Les performances de ce moteur, telles que le profil couple-vitesse et le rendement, sont analysées. La géométrie du moteur et ses principaux paramètres sont introduits. Ce mémoire propose également un MRV 18/12 pour obtenir le même profil couple-vitesse que le moteur MSAP de traction de la Prius 2010. Le diamètre extérieur du stator et la longueur axiale sont utilisés comme contraintes géométriques pour le MRV 18/12. Le processus de conception et les plages des principaux paramètres géométriques du MRV sont également abordés dans ce mémoire.

Dans le deuxième chapitre nous avons pu mettre en évidence que les technologies de VEHs se séparent en trois catégories, dépendant du niveau d'assistance du moteur électrique. Nous avons présenté les chaînes de traction micro-hybride, mild-hybride et full-hybride. Nous avons montré aussi que le véhicule électrique hybride rechargeable « VEHR » (Plug-in Hybrid Electric Vehicle « PHEV » en anglais) est très semblable au full-hybride, avec les deux motorisations (électrique et thermique) de puissance équivalente.

Dans le troisième chapitre, la conception d'un MRV 18/12 de 60 kW est présentée. Le moteur est destiné à remplacer le moteur synchrone de traction à aimants permanents utilisé dans le groupe motopropulseur HEV de la Toyota Prius 2010, ce qui est vérifié dans ce chapitre par le biais des résultats des éléments finis par le logiciel ANSYS Maxwell. Le profil couple-vitesse du MRV correspond à celui de MSAP utilisé dans la Toyota Prius. Le MRV a un rendement compétitif sur toute la plage de fonctionnement par rapport au moteur MSAP de Prius Toyota.

A partir de cette étude modeste, nous avons acquis plusieurs informations intéressantes, concernant l'utilisation de la chaîne l'entraînement électrique de la **Toyota Prius** et la commande vectorielle de vitesse et de courant appliquée à la machine de traction.

Liste de Références

1. **Alexandre Ravey** " CONCEPTION ET GESTION DE L'ÉNERGIE DES ARCHITECTURES POUR VÉHICULES HYBRIDES ÉLECTRIQUES " Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012
2. Oak Ridge National Laboratory & Mitch Olszewski, Program Manager, " Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System" U.S. Department of Energy Freedom CAR and Vehicle Technologies, EE-2G, 1000 Independence Avenue, S. W. Washington, D.C. 20585-0121 May 2005.
3. 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.
4. Mounir MARZOUK, "Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in" Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), France, Octobre 2015.
5. A. Kaddouri, "Etude d'une Commande Non-Linéaire Adaptative d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval Québec, Nov 2000.
6. Ahmed Boucherit, "Conception d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multisources" Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard, Décembre 2011
7. Aiman Nouh "Contribution Au Développement D'un Simulateur Pour Les Véhicules Électriques
8. AOUZELLAG Haroun, "Stratégies de commande d'un véhicule hybride", mémoire de master : université A-Mira Bejaia, 2013.
9. Arif Ali, "Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque" diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Kheider, Biskra, Novembre 2013.

10. Asynchrone "Mémoire de Magister, Université de Batna 2006.
11. BOUBAKER Karim "Etude et modélisation de la chaîne d'entraînement électrique de la Toyota Prius", mémoire de master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2020
12. **BOUCHAREB Ilhem** "Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrones à Réductance Variable" Thèse de Magister, Université de Constantine, 2009
13. Boudouda. MALIK, «Commande de la machine à réductance variable en vue d'une application alterno démarreur intégré», Thèse Magister en Electrotechnique, Univ de Batna, 17 December 2006.
14. Chan, C. C. (2007). The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. Proceedings of the IEEE, 95(4), 704–718.
15. Chouaib LABIOD "Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à réductance variable" Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra, 2014
16. Cours "Toyota Hybrid Synergy Drive".
17. Cours, "Technologies des véhicules hybrides", STS M.V, 2ème année.
18. CYR. Charles „Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques“, Thèse de doctorat de *l'Ecole Nationale Supérieure d'arts et métiers Paris*, France, 2007.
19. Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2009). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. CRC Press.
20. J. F. Gieras, “Advancements in Electric Machines”, Power Systems ISSN: 1612-1287, Springer, Rockford, Illinois, U.S.A., and March 2008
21. L. BAGHLI, E. GOUDA, S. MEZANI, A. REZZOUG, "Hybrid vehicle with a magnetic planetary gear "Vandoeuvre-lès-Nancy, France, January 2010.
22. Mounir MARZOUK, "Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in" Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), France, Octobre 2015.

23. OUILFANE Arezki et OUARAS Katia "Commande robuste basée sur la méthode de Kharitonov d'une machine à reluctance variable" Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017
24. Oulad Naoui Brahim El Khalil et Tounsi Hadj Bounoua, "**Conception et simulation d'une machine à réluctance variable triphasée utilisée dans un véhicule électrique hybride**", mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique ,2022
25. Piotr Wash, " Dynamics and Control of Electrical Drives", ISBN 978-3-642-20221-6, SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2011.
26. **Redha Sadoun.** " Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain dimensionnement et tests de cyclage", Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013
27. Review of Magnetic Separation Equipment and Techniques"" P 67-162 Book Springer Netherlands 978-1-4020-2107-7 https://doi.org/10.1007/1-4020-2107-0_2, 2004
28. Routiers" Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Mars 2008.
29. Saeid Haghbin, "Integrated Motor Drives and Battery Chargers for Electric or Plug-in Hybrid Electric Vehicles" Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment Chalmers, University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.
30. T. A. Burrell, S. L. Campbell, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system", Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, March 2011.
31. T. A. Burrell, S. L. Campbell, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system", Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, March 2011.
32. T. A. Burrell, S. L. Campbell, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system", Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, March 2011
33. T. Hanene, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine

34. Toyota Global Newsroom. (2009). Toyota Unveils Third-Generation Prius at North American International Auto Show. <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/>
35. Toyota Motor Corporation. (2009). Hybrid Synergy Drive Explained. Toyota Global.
36. U.S. Department of Energy – Alternative Fuels Data Center. (2022). Toyota Prius Hybrid Electric Vehicle. <https://afdc.energy.gov/vehicles/prius.html>
37. Wikipedia contributors. (2025). *Toyota Prius*. Wikipedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius
38. Wikipédia. (2024, février 19). Hybrid Synergy Drive. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Hybrid_Synergy_Drive
39. Yacine. AMARA, «Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation Application au véhicule hybride », Thèse Doctorat, Univ de PARIS, 21 Décembre 2001.
40. Zaouzaou Sabrina, Meziani Sabrina, "Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique", mémoire de master, université de Bejaia, 2017.
41. Reddy, J. N. (2006). *An Introduction to the Finite Element Method* (3rd ed.). McGraw-Hill
42. Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method: Volume 1: The Basis*. Butterworth-Heinemann