



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

**MÉMOIRE DE MASTER II**  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER II EN ÉLECTROMÉCANIQUE

Thème :

---

# Modélisation et commande d'un quad électrique

---

Réalisé par :

M.BENIKEN Anis

M. GUEZOUL Lazhar

Devant le jury composé de

Examineur : Mr MOKRANI.A

Examineur : Mr TARAFT.S

Encadré par :

M<sup>me</sup>.MOKRANI Zahra (Promoteur)

M.REKIOUA Toufik (Co-promoteur)

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

## Remerciements

Nos premiers mots de remerciement s'adressent d'abord à nos parents et nos amis qui ont toujours été là pour nous encourager tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde reconnaissance à **Mme MOKRANI Zahra**

Docteur en électrotechnique à l'université **Abderrahmane Mira de Bejaia**, notre encadreuse pour avoir accepté de diriger notre travail et aussi pour ses conseils et ses encouragements le long de cette période de préparation du mémoire.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Il y a tellement de gens à qui nous devons des remerciements pour leur support. Il nous est vraiment difficile de pouvoir citer intégralement tout le monde. Ainsi, nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont aidé tout au long de ces années universitaires.

## **Symboles :**

$v_s$  : Tension aux bornes d'un enroulement statorique (V).

$i_s$  : Le courant d'une phase rotorique (A).

$v_r$  : Tension aux bornes d'un enroulement statorique (V).

$i_r$  : Le courant d'une phase rotorique (A).

$l_s$  : L'inductance propre d'une phase statorique (H).

$l_r$  : L'inductance propre d'une phase rotorique (H).

$m_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H).

$m_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H).

$m_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique (H).

$[M_{ss}]$  : Matrice d'inductance mutuelle entre deux phases du stator (H).

$[M_{rr}]$  : Matrice d'inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H).

$[M_{sr}]$  : Matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor (H).

$[M_{rs}]$  : Transposée de la matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor (H).

$\varphi_s$  : Le flux statorique (Wb).

$\varphi_r$  : Le flux rotorique (Wb).

$\theta$  : L'angle électrique entre la phase rotorique ( $a_r$ ) et la phase statorique ( $a_s$ ).

$\omega_s$  : Pulsation statorique (rad/s).

$\omega_r$  : Pulsation rotorique (rad/s).

$\omega_{gl}$  : Pulsation du glissement (rad/s).

$g$  : Le glissement.

$\Omega$  : Vitesse mécanique (rad/s).

$R_s$  : Résistance des phases statoriques ( $\Omega$ ).

$R_r$  : Résistance des phases rotorique ( $\Omega$ ).

$M$  : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (H).

$L_s$  : L'inductance cyclique statorique de fuite (H).

$L_r$  : L'inductance cyclique rotorique de fuite (H).

$C_{em}$  : Couple électromagnétique ( $N.m$ ).

$C_r$  : Couple résistant ( $N.m$ ).

$J$  : Moment d'inertie ( $kg/m^2$ ).

$f$  : Coefficient de frottements visqueux.

$P$  : nombre de parie de pôles

$\mathcal{N}_r$  : Impédance ramenée au stator, de l'inductance de fuite au rotor.

$d, q$  : Indices des axes directs et en quadrature du référentiel lié au champ tournant.

$\alpha, \beta$  : Indices des axes liés au stator.

$\sigma$  : Coefficient de dispersion de Blondel

# Liste des figures

## Figures du chapitre I

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig I.1.</b> La roue de <i>Barlow</i> .....                                     | 4  |
| <b>Fig I.2.</b> Le premier véritable moteur électrique rotatif.....                | 4  |
| <b>Fig I.3.</b> Le premier véhicule électrique construit par Thomas Davenport..... | 6  |
| <b>Fig I.4.</b> La Nissan <i>Lea</i> .....   | 7  |
| <b>Fig I.5.</b> Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique.....        | 11 |
| <b>Fig.I.6.</b> Le premier véhicule tout-terrain L'ATC90.....                      | 12 |
| <b>Fig I.7.</b> Le <i>QuadRunner</i> LT125.....                                    | 12 |
| <b>Fig.I.8.</b> Électrification du quad à combustion interne.....                  | 14 |

## Figures du chapitre II

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig II.1.</b> Les deux parties constituant la machine électrique.....                     | 15 |
| <b>Fig II.2.</b> Composition du moteur à courant continu.....                                | 16 |
| <b>Fig II.3.</b> Coupe de la structure des machines à pôles lisses et à pôles saillants..... | 19 |
| <b>Fig II.4.</b> Exemples de différentes configurations des MSAP.....                        | 20 |
| <b>Fig II.5.</b> Structures de rotor à cage.....   | 20 |
| <b>Fig II.6.</b> Structures de rotor sans cage.....  | 21 |
| <b>Fig II.7.</b> Moteur asynchrone à cage.....   | 22 |
| <b>Fig II.8.</b> Le stator d'une machine asynchrone.....                                     | 23 |
| <b>Fig II.9.</b> Rotor Bobiné d'une machine asynchrone.....                                  | 23 |
| <b>Fig II.10.</b> Rotor à cage d'écureuil.....   | 24 |
| <b>Fig II.11.</b> Représentation des enroulements d'une machine à induction.....             | 25 |

## Figures du chapitre III

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig III.1.</b> Model de la machine asynchrone dans le repaire triphasé.....        | 29 |
| <b>Fig III.2.</b> Repère de la transformation de Park.....                            | 33 |
| <b>Fig III.3.</b> Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....        | 36 |
| <b>Fig III.4.</b> Schéma de principe de MLI sinus-triangle.....                       | 39 |
| <b>Fig III.5.</b> principe de la commande MLI naturelle.....                          | 39 |
| <b>Fig III.6.</b> Principe de la modulation MLI de type régulière échantillonnée..... | 40 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig.III.7.</b> MLI régulière symétrique.....                           | 41 |
| <b>Fig.III.8.</b> MLI régulière asymétrique.....                          | 41 |
| <b>Fig.III.9.</b> Représentation des forces agissant sur le véhicule..... | 43 |

### Figures du chapitre IV

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig.IV.1.</b> Modèle de la machine asynchrone sous Matlab Simulink.....                      | 46 |
| <b>Fig.IV.2.</b> Courbe caractéristique de la vitesse de rotation.....                          | 47 |
| <b>Fig.IV.3.</b> Courbe caractéristique des couples ( $C_{em}$ , $C_r$ ).....                   | 48 |
| <b>Fig.IV.4.</b> Courbe caractéristique du courant statorique dans une phase.....               | 48 |
| <b>Fig.IV.5.</b> Allures des tensions de la source d'alimentation.....                          | 49 |
| <b>Fig.IV.6.</b> Schéma du model de la machine asynchrone alimentée avec un onduleur.....       | 50 |
| <b>Fig.IV.7.</b> Courbe caractéristique de la vitesse de rotation avec onduleur.....            | 51 |
| <b>Fig.IV.8.</b> Allure du couple $C_{em}$ et du couple $C_r$ avec onduleur.....                | 52 |
| <b>Fig.IV.9.</b> Courbe caractéristique du courant statorique dans une phase avec onduleur..... | 52 |
| <b>Fig.IV.10.</b> Schéma du model de la chaine de traction du quad.....                         | 53 |
| <b>Fig.IV.11.</b> Allure de la vitesse de rotation $w_r$ de l'ensemble.....                     | 54 |
| <b>Fig.IV.12.</b> Allure du couple $C_{em}$ et du couple $C_r$ de l'ensemble.....               | 54 |
| <b>Fig.IV.13.</b> Allure du couple $C_r$ de l'ensemble.....                                     | 55 |
| <b>Fig.IV.14.</b> Courbe caractéristique du courant statorique de l'ensemble.....               | 55 |

# Table des matières

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale ..... | 1 |
|-----------------------------|---|

## CHAPITRE I

|   |    |
|---|----|
| I.1. Introduction.....  | 3  |
| I.2. Historique .....   | 3  |
| I.2.1. Historique des machines électriques .....                                | 3  |
| I.2.2. Historique des véhicules électriques .....                               | 5  |
| I.3. Les avantages des véhicules électriques.....                               | 8  |
| I.3.1. Ecologie et voiture électrique .....                                     | 8  |
| I.3.2. Performance moteur.....  | 8  |
| I.3.3. Le rendement moteur .....  | 9  |
| I.3.4. L'entretien .....  | 9  |
| I.3.5. Plaisir de conduire .....  | 9  |
| I.3.6. Impacts sur L'environnement .....  | 9  |
| I.3.7. Attrait économique.....  | 10 |
| I.4. Représentation d'un véhicule électrique.....                               | 10 |
| I.5. Les véhicules tout-terrain.....  | 11 |
| I.5.1. Historique des véhicule tout terrain .....                               | 11 |
| I.5.2. Utilisation des véhicules tout-terrain.....                              | 12 |
| I.5.3. Electrification du quad conventionnel à moteur à combustion interne..... | 13 |
| I.6. Conclusion .....   | 14 |

## CHAPITRE II

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction.....   | 15 |
| II.2. Structure des machines électriques tournantes.....                        | 15 |
| II.3. Les machines à courant continu .....                                      | 16 |
| II.3.1. Fonctionnement et Composition d'une machine à courant continu .....     | 16 |
| II.3.2. Les différents types de machines à courant continu .....                | 17 |
| II.3.3. Les avantages et inconvénients du moteur à courant continu .....        | 17 |
| II.4. Les machines à courant alternatif .....                                   | 17 |
| II.4.1. Les machines synchrones .....   | 18 |
| II.4.1.1. Structure et principe de fonctionnement de la machine synchrone ..... | 18 |
| II.4.1.1.1. Le stator .....   | 19 |

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| II.4.1.1.2. Le rotor .....   | 19 |
| II.4.1.2. Les différents types de machine synchrones.....                            | 19 |
| II.4.1.2.1. Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) .....                | 20 |
| II.4.1.2.2. Les machines synchrones à reluctance variable .....                      | 20 |
| II.4.1.3. Avantages et inconvénients des machines synchrones .....                   | 21 |
| II.4.2. La machine asynchrone .....  | 21 |
| II.4.2.1. Constitution de la machine asynchrone .....                                | 22 |
| II.4.2.1.1. Le stator .....  | 22 |
| II.4.2.1.2. Rotor.....   | 23 |
| II.4.2.1.2.1. Rotor Bobiné .....   | 23 |
| II.4.2.1.2.2. Le rotor à cage.....   | 24 |
| II.4.2.2. Principe de fonctionnement.....  | 24 |
| II.4.2.3. Avantages et inconvénients des machines asynchrones à cage d'écureuil..... | 26 |
| II.5. Conclusion .....   | 26 |

## CHAPITRE III

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction .....   | 28 |
| III.2. Modélisation de la machine asynchrone .....  | 28 |
| III.2.1. Hypothèses simplificatrices.....   | 28 |
| III.2.2. Modèle de la machine dans le repère triphasé abc.....  | 29 |
| III.2.2.1. Les équations électriques.....   | 29 |
| III.2.2.2 Les équations magnétiques .....   | 30 |
| III.2.2.3. Equation mécanique .....   | 30 |
| III.2.3. Modèle de la machine dans le repère biphasé .....  | 31 |
| III.2.3.1. Transformation d'un repère triphasé-diphase .....  | 31 |
| III.2.3.2 La transformation de Park .....   | 32 |
| III.2.3.3. Choix du référentiel .....   | 33 |
| III.2.3.4. Model de la machine asynchrone dans le repère de Park dans un repère lié au champs tournant..... | 34 |
| III.3 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux .....                                   | 36 |
| III.3.1. Commandes des Onduleurs .....  | 38 |
| III.3.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....   | 38 |

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| III.3.2.1. Modulation naturelle.....  | 38 |
| III.3.2.2 Modulation MLI de type régulière échantillonnée "Regular sampled PWM" ..... | 40 |
| III.3.2.2.1. Modulation MLI de type régulière échantillonnée symétrique.....          | 40 |
| III.3.2.2.2. Modulation MLI de type régulière échantillonnée asymétrique.....         | 41 |
| III.3.4. Les avantages de la commande MLI.....  | 42 |
| III.4. Modélisation du véhicule électrique.....                                       | 42 |
| III.4.1. Les différentes forces agissantes sur le véhicule électrique.....            | 42 |
| III.5. Conclusion.....  | 44 |

## CHAPITRE IV

|   |    |
|---|----|
| IV.1. Introduction.....   | 46 |
| IV.2. Simulation de la machine asynchrone avec alimentation sans onduleur sur MATLAB-Simulink..           | 46 |
| IV.2.1 Résultats de la simulation de la machine asynchrone .....  | 47 |
| IV.2.2. Interprétation des résultats de de la simulation de la machine asynchrone .....                   | 49 |
| IV.3. Simulation de la machine asynchrone alimentée en tension avec onduleur sous MATLAB<br>Simulink..... | 50 |
| IV.3.1. Résultats de la simulation avec onduleur MLI .....  | 50 |
| IV.3.2. Interprétation des résultats de de la simulation avec l'onduleur MLI .....                        | 52 |
| IV.4. Simulation de l'ensemble convertisseur-machine-quad sous MATLAB Simulink.....                       | 53 |
| IV.4.1. Résultats de la simulation de l'ensemble convertisseur-machine-véhicule.....                      | 53 |
| IV.4.2. Interprétation des résultats.....   | 56 |
| IV.5. Conclusion.....   | 56 |
| Conclusion Générale .....   | 57 |

# **Introduction generale**

# Introduction générale

Au cours du dernier siècle, beaucoup de sociétés sont devenue dépendantes des automobiles dans la vie quotidienne. Que ce soit pour le transport de marchandise ou de personnes, ou entre lieux de travail et maison, les automobiles légères sont très utilisées. Leur nombre ne cesse d'augmenter et des milliards de litres d'essence et de diesel sont consommés, et cela participe avec un pourcentage important et conséquent dans l'émission de gaz à effet de serre et la pollution urbaine, représentant un risque majeur pour les années à venir. De nombreuses alternatives ont été considérées et étudiées afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur automobile, parmi ces alternatives l'électrification et hybridation des groupes motopulseurs.

L'électrification du groupe motopulseur permet d'augmenter son rendement global, car les systèmes électriques sont beaucoup plus efficaces que les moteurs à combustion interne. Une chaîne cinématique purement électrique n'est limitée que par les capacités de stockage d'énergie.

Les automobiles sont principalement utilisées pour les déplacements sur route. Mais un nouveau segment de petits véhicules, qui est le véhicule tout-terrain, a fait son apparition. Le premier véhicule tout-terrain commercial était l'ATC90 introduit par la Honda Motor Company en 1970 [1]. Ce véhicule était au départ un simple véhicule à 3 roues avec un petit moteur à combustion interne, destiné à être utilisé à des fins récréatives. Le développement des véhicules à trois roues a évolué pour devenir les véhicules à quatre roues que nous connaissons aujourd'hui. Bien qu'ils soient toujours beaucoup plus utilisés pour les loisirs, les véhicules haute performance et agiles sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment l'agriculture, la foresterie, l'exploration des ressources naturelles, l'application de la loi et le maintien de la paix.

Tout comme la plupart des véhicules automobiles les véhicules tout-terrain ont des moteurs à combustion interne inefficaces qui génèrent des émissions de gaz à effet de serre, pollution et bruit.

Ce travail a pour but de réaliser un train d'entraînement électrique qui permettra l'électrification du quad pour obtenir un contrôle et une facilité d'utilisation similaire à un quad conventionnel.

La simulation est devenue un passage indispensable pour concevoir, caractériser, commander ou surveiller un système ou processus quelconque. C'est pour ça que nous allons

# Introduction générale

élaborer la modélisation et la simulation de l'ensemble convertisseur statique, machine électrique et quad sous MATLAB /Simulink.

Dans le premier chapitre nous allons voir le coté historique des véhicules électriques et celui du quad et leurs succès à travers le temps, et faire une introduction à leurs structures en général.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un état de l'art sur les différents types de machines électriques, où nous donnerons un aperçu sur les différents types de motorisation, avec leurs avantages et inconvénients pour voir pourquoi nous avons choisi le moteur asynchrone à cage d'écureuil parmi toutes les autres machines existantes.

Dans le troisième chapitre nous modéliserons toute la chaîne de traction, c'est-à-dire l'onduleur triphasé commandé par MLI, la machine asynchrone à cage d'écureuil et le véhicule qui est le quad électrique.

Au quatrième et dernier chapitre nous allons présenter une simulation de chaque partie participant à la chaîne de traction, séparément, puis celle de l'ensemble avec l'interprétation de chaque résultat obtenu.

Nous clôturerons notre travail par une conclusion générale, et quelques perspectives.

# **Chapitre I :**

## **Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout- terrain**

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

## I.1. Introduction :

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle la voiture à essence connaît un succès important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. C'est pourquoi jusqu'à nos jours la voiture à essence n'a cessé s'est développée. La voiture électrique ne fait donc pas encore partie de notre entourage mais elle devient de plus en plus sollicitée grâce à la constante hausse du pétrole et la médiatisation de la réduction du rejet de CO<sub>2</sub>. Après le grenelle de l'environnement et avant une crise pétrolière, de nombreuses entreprises et d'écologistes veulent développer la voiture électrique au niveau de l'autonomie des batteries et de l'utilisation maximale des énergies propres. Afin que celle-ci deviennent réellement plus propre et plus avantageuse que les voitures à essence [2]

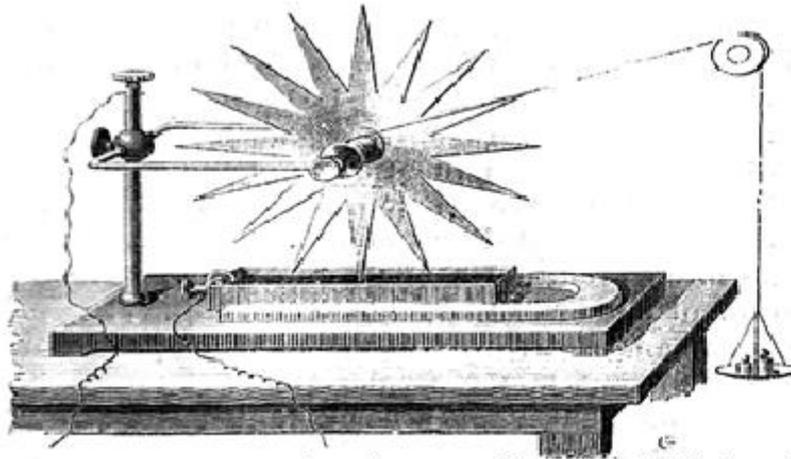
Dans ce chapitre nous allons voir l'histoire des machines, véhicules et quads électriques ainsi que les avantages qu'ils ont par rapport aux véhicules à combustion pour montrer l'intérêt de l'électrification des quads conventionnels.

## I.2. Historique :

### I.2.1. Historique des machines électriques :

- Tout commença en 1800 par *Alessandro Volta* qui inventa la première pile électrique. En 1820 l'expérience de *Hans Christian Oersted* permit de découvrir la génération des champs magnétique à partir d'un courant électrique qui posa les fondements de l'électromagnétisme et qui aussi est l'origine de l'essor de l'électricité moderne, puis en 1825 *William Sturgeon* inventa l'électro aimant et c'est l'ensemble de ces inventions qui ont permis de mettre les bases de la construction des machines électriques [3]
- Le tout premier appareil rotatif entraîné par l'électromagnétisme a été construit par l'anglais Peter Barlow en 1822 (La roue de Barlow) [3].

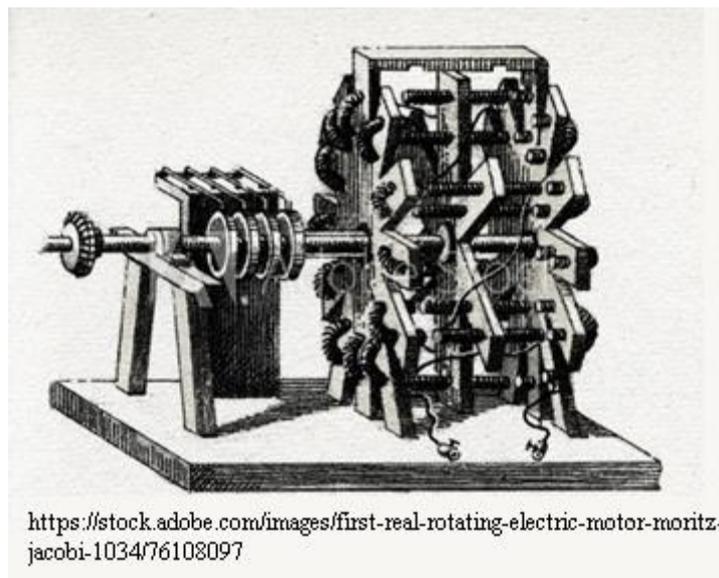
# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roue\\_de\\_Barlow.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roue_de_Barlow.png)

**Fig.I.1.** La roue de *Barlow*

- Ensuite vint en 1831 la découverte de l'induction électromagnétique par Faraday qui compléta les fondements de l'électromagnétisme et amena plus tard la construction des premières génératrices que plus tard en 1864 Maxwell en établit les bases théoriques grâce à une approche physique et mathématique [4]
- En 1834 le premier véritable moteur électrique rotatif fut créé par Moritz Jacobi et son deuxième moteur était suffisamment puissant pour conduire un bateau sur lequel se trouvaient 14 personnes [3]



<https://stock.adobe.com/images/first-real-rotating-electric-motor-moritz-jacobi-103476108097>

**Fig.I.2** Le premier véritable moteur électrique rotatif

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

- En 1833, l'Allemand *Heinrich Friedrich Emil Lenz* a publié un article sur la loi de réversibilité du générateur électrique et du moteur et En 1838 il fournit une description détaillée de ses expériences avec un générateur *Pixii* qu'il utilisait comme moteur [3]
- En 1835, les deux Néerlandais *Sibrandus Stratingh* et *Christopher Becker* ont construit un moteur électrique qui propulsait une petite voiture miniature. Il s'agit de la première application pratique connue d'un moteur électrique. En février 1837, le premier brevet pour un moteur électrique est accordé à l'américain américain *Thomas Davenport* [3].
- Cependant, les tout premiers développements réalisés par *Jacobi*, *Stratingh*, *Davenport* et d'autres n'ont pas abouti aux moteurs électriques que nous connaissons aujourd'hui [3].
- La période entre 1885 et 1889 a connu l'invention du système d'alimentation électrique triphasé qui est la base de la transmission électrique moderne et des moteurs électriques avancés (*Bradley*, *Dolivo-Dobrowolsky*, *Ferraris*, *Haselwander*, *Tesla*.etc) [3].
- Aujourd'hui le moteur asynchrone triphasé est principalement utilisé dans les applications hautement dynamiques (par exemple dans les robots) et dans les voitures électriques, il a été construit la première fois par *Friedrich August Haselwander* en 1887, quant au moteur triphasé à cage et qui a connu un grand succès, a été construit par *Michael Dolivo-Dobrowolsky* en 1889 qui est aujourd'hui, la plus fréquemment produite pour des puissances égales ou supérieures à 1KW [3].

## I.2.2. Historique des véhicules électriques [5] :

- Inspiré par la lecture des efforts de *Joseph Henry* qui était un professeur en mathématiques qui a construit le premier moteur électrique dans sa quête pour comprendre l'électromagnétisme en 1831, *Thomas Davenport* développe en 1834 le premier moteur électrique rotatif et construit un wagon électrique miniature tournant en cercle sur une table mais il n'est pas assez solide pour supporter le poids de sa propre batterie. Son invention n'a pas intéressé les investisseurs.

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)



**Fig.I.3** Le premier véhicule électrique construit par Thomas Davenport

- En 1851 Le Sénat américain finance un prototype de locomotive électrique, qui a effectué un essai de *Washington DC* à *Baltimore MD*, sur une distance d'environ 40 miles (64 km). Charles Grafton Page, un examinateur de brevets américain, le conçoit et utilise ses relations avec Washington pour obtenir un financement. Le moteur était comme une machine à vapeur électrique avec un solénoïde et une limace de fer plutôt qu'un cylindre et un piston. L'effort échoue lorsque les séparateurs d'argile dans les cellules de la batterie primaire se fissurent et les bobines du solénoïde surchauffent et se court-circuitent lorsque l'isolation échoue. La vapeur reste plus pratique pour une puissance à grande échelle à ce stade.
- 1886 : - N. S. Possons construit un tricycle électrique pour la *Brush Electric Co* de *Cleveland Ohio*. Il est disposé d'un phare électrique à incandescence Swan et de la batterie rechargeable de *Brush Company* qui alimente un moteur à brosse.
- 1890 : William Morrison construit le premier véhicule routier électrique à quatre roues en Amérique pour démontrer l'efficacité de sa batterie.
- 1893 : l'exposition universelle de la Colombie-Britannique marque l'ère de l'électricité pour la plupart des Américains. Plusieurs véhicules à moteur sont exposés à l'arrêt, notamment un taxi électrique conçu par *Walter Bersey* et quelques véhicules à essence allemands.

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

- 1894 : *Henry G. Morris* et *Pedro G. Salom* à Philadelphie étaient des concepteurs de tramways à batterie et ont vu le potentiel dans l'électrification des petits véhicules routiers. Ils conçoivent et mettent en service un lourd wagon électrique à quatre roues similaire à la voiture *Morrison*. Elle tournait à 15 miles/h (environ 24km/h).
- 1899-1905 *Ferdinand Porsche* conçoit des voitures électriques et hybrides pour le carrossier autrichien *Jacob Lohner & Co*. Les véhicules de 1900 utilisent des moteurs à moyeu.
- 1982 La première voiture hybride moderne est fabriquée au GE Research Lab. Elle est contrôlée par ordinateur et est l'ancêtre des voitures hybrides commerciales actuelles.
- 1989 Audi crée une hybride appelée "*Duo*" avec des batteries NiCad et un moteur à essence 5 cylindres. Le véhicule ne voit jamais la production grand public et en 1997 "*Duo III*" termine la série.
- 1995 : Toyota présente un concept de voiture hybride au Tokyo Motor Show
- 1997 : La première Prius est mise en vente sur le marché japonais.
- 2008 : Tesla Motors vend le Tesla Roadster avec une autonomie de plus de 320 km.
- 2010 la voiture tout électrique *Nissan Leaf* apparaît dans le marché et Mercedes Benz collabore avec la *Tesla Motor Company* pour créer la classe-A E-Cella.



<https://www.guideautoweb.com/articles/6122/nissan-leaf-2010-l-avenir-electrique>

**Fig.I.4** La Nissan *Lea*

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

## I.3. Les avantages des véhicules électriques [6][7][8] :

Le véhicule électrique présente de nombreux avantages. Voici quelques bonnes raisons de choisir un véhicule électrique :

### I.3.1. Ecologie et voiture électrique :

Sans émission de gaz, sans rejet de particules et silencieux, la voiture électrique est une réponse très efficace et opérationnelle pour abaisser l'empreinte environnementale des transports. Elle participe à la mobilité urbaine durable, tels que le train, le tramway, le bus et le vélo et répond principalement aux modes de déplacement des conducteurs qui parcourent moins de 70 km par jour, principalement dans le périmètre urbain : ce type de véhicule est donc approprié aux particuliers qui utilisent leur véhicule pour le trajet domicile – travail mais aussi à de nombreuses flottes d'entreprises.

Les progrès et la recherche actuelle permettront de proposer très rapidement des technologies de batteries permettant de repousser loin devant la limite des 200 kg de batterie nécessaires pour qu'une voiture électrique puisse parcourir environ 170 km en roulant à 70 km/h. Les batteries les plus modernes offrent déjà aujourd'hui une autonomie de 200 à 500 km à une vitesse de 110 km/h.

### I.3.2. Performance moteur :

Performant, il peut être aussi puissant qu'un moteur thermique et même plus efficace. L'avantage principal du moteur électrique se situe au niveau de son couple. Il s'agit de la force générée à un instant  $T$  et c'est en multipliant le couple par le nombre de tours par minute [le régime] que l'on obtient sa puissance. Dans le cas d'un moteur à explosion, le couple augmente progressivement avec le régime jusqu'à un niveau maximal. Alors que le moteur électrique produit un couple maximal quel que soit le régime : les accélérations sont plus fortes dès le démarrage du véhicule et les reprises sont bien meilleures, avec une puissance plus linéaire et disponible à tout moment, pas seulement à haut régime [comme pour le moteur à explosion].

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

## I.3.3. Le rendement moteur :

Le rendement est réellement meilleur que celui des moteurs thermiques car le moteur électrique utilise mieux l'énergie disponible. Bien sûr, la valeur du rendement dépend aussi en grande partie des conditions d'utilisation [comme pour le moteur thermique].

Valeurs des rendements comparés :

- 83 % environ pour une voiture électrique
- 20-30 % avec une motorisation thermique [70 à 80% de pertes].

## I.3.4. L'entretien :

La voiture électrique demande peu d'entretien. Le système moteur est très simplifié par rapport à un véhicule thermique (essence, diesel ou gaz). Il y a cent fois moins de pièces en rotation, il n'y a pas de boîte de vitesse et pas d'huile à changer.

Grâce au freinage régénératif (on récupère une partie de l'énergie cinétique pour en faire de l'électricité), les freins sont beaucoup moins sollicités et les plaquettes doivent être remplacées moins souvent qu'avec une voiture thermique.

## I.3.5. Plaisir de conduire :

L'un des premiers avantages d'une voiture électrique est sa qualité de conduite. En l'absence de bruit lors des déplacements, cette voiture ne produit aucune pollution sonore. De plus, son équipement permet de démarrer le véhicule rapidement même en hiver et de bénéficier d'un moteur qui ne cale pas, du fait de l'absence d'embrayage.

## I.3.6. Impacts sur L'environnement :

Au-delà du confort de conduite évoqué plus haut, la voiture électrique est avant tout une solution écologique pour faire face aux enjeux environnementaux actuels. Il ne produit aucune émission de gaz à effet de serre, de fumée ou de particules fines. C'est l'une des solutions les plus adaptées pour lutter contre la pollution urbaine.

# **Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)**

## **I.3.7. Attrait économique :**

De nombreux pays ont mis en place des incitations financières pour acheter des véhicules électriques et des équipements de fourniture de véhicules électriques (EVSE). Dans certains cas, le coût d'achat d'une voiture électrique devient inférieur à celui d'une voiture traditionnelle. Si on pensait au long terme, il est moins cher de recharger un véhicule électrique que de faire le plein. Par ailleurs, de nombreuses compagnies d'assurance souhaitent promouvoir les véhicules électriques en proposant des contrats de 20% à 30 % moins chers que les contrats conventionnels, en France par exemple et c'est probablement le cas ailleurs.

## **I.4.Représentation d'un véhicule électrique [9] :**

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie. La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC). Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique.

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

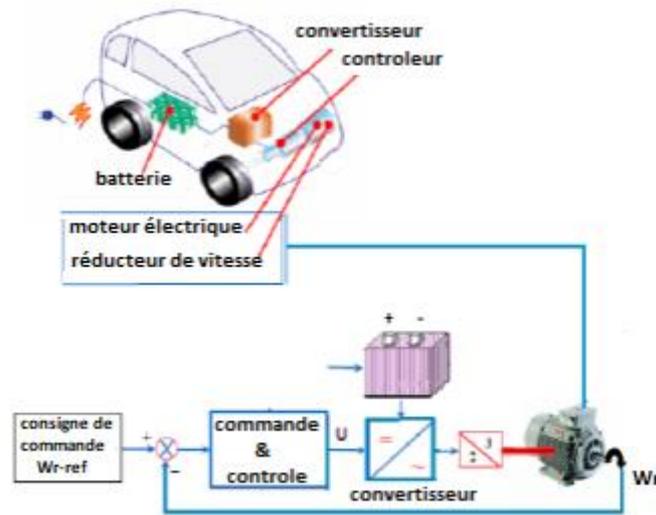


Fig.I.5. Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique [9]

## I.5. Les véhicules tout-terrain :

### I.5.1. Historique des véhicule tout terrain :

Les véhicules urbains sont initialement utilisés pour le transport des personnes et des biens mais un nouveau segment commence à émerger et les véhicules tout terrain (quadricycles) en font partie [10].

Le tout premier véhicule tout terrain connu, était un véhicule à trois roues. L'ATC90 a été présenté par Honda en 1970. Son usage était purement récréatif et ce véhicule était doté de gros pneus au lieu d'avoir une suspension.

Pendant ce temps, au secteur agricole, l'utilisation de l'ATC pour le travail montre un succès et une popularité qui poussa Honda et d'autres fabricants à développer de nouveaux modèles. En 1981 l'ATC250R est vendu par Honda et qui est considéré comme le premier trois-roues haute performance à transmission à cinq vitesses. Par la suite bon nombre d'autres modèles sont fabriqués avec des améliorations et de nouvelles utilisations [1].

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)



**Fig.I.6.** Le premier véhicule tout-terrain L'ATC90[10]

Le tout premier VTT à quatre roues (Quadricycle) nommé le *QuadRunner* LT125 a été créé par l'entreprise Suzuki et vendu en 1982. Trois ans plus tard l'entreprise sort le premier quad à haute performance, qui comportait un moteur à deux temps et un système de refroidissement par liquide ainsi qu'une transmission manuelle à cinq vitesses [1].



<https://utvactionmag.com/suzuki-atvs-that-changed-the-world/>

**Fig.I.7.** LeQuadRunner LT125

## I.5.2. Utilisation des véhicules tout-terrain :

Initialement à vocation utilitaire, le quad est de plus en plus employé comme véhicule tout-terrain de loisir et dans de grandes compétitions mais permet aussi de rendre des milliers de tâches beaucoup plus facile à effectuer et plus rapidement dans pleins de domaines comme le secteur de l'agriculture, l'exploration et ce grâce à ses hautes performances, son agilité et sa

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

polyvalence [11]. Comme pour la majorité des véhicules urbains, les quadricycles ont des moteurs à combustion interne inefficaces et qui génèrent donc des gaz effet de serre, bruits et pollution.

Les quadricycles ont une utilisation différente des autres véhicules car ils parcourent des distances plus courtes à une vitesse relativement plus faible et passent beaucoup de temps à ralentir et c'est pour ça qu'il faut les convertir en véhicules électriques pour qu'ils soient plus efficaces [12] et aussi pour supprimer toutes les formes de pollution qu'ils génèrent.

Il existe différents types de quads [13] :

- Le quad de sport et de compétition
- Le quad loisirs
- Le quad utilitaire
- Le quad pour enfants

## **I.5.3. Electrification du quad conventionnel à moteur à combustion interne [14] :**

Le véhicule tout-terrain conventionnel à essence, a un moteur à combustion interne qui est connecté à une boîte de vitesses à rapport fixe grâce d'une transmission à variation continue, la transmission à variation continue permet d'obtenir une caractéristique couple-vitesse plus efficace du moteur à combustion interne, tout en offrant à l'utilisateur la facilité de ne pas avoir à changer de vitesse pendant la conduite. Le carter d'engrenages à rapport fixe a la capacité de transmettre la puissance à l'essieu arrière uniquement ou à l'essieu avant et arrière simultanément. Lorsque l'option de traction intégrale est engagée. L'essieu arrière est intégré directement dans la transmission à rapport fixe.

Pour électrifier le VTT, le moteur à combustion interne et tous ses composants associés, y compris le radiateur, le système d'échappement et le réservoir de stockage de carburant, sont retirés. La transmission à variation continue est supprimée car les caractéristiques couple-vitesse des machines électriques ne nécessitent pas la plage dynamique des engrenages. Le carter de transmission n'est pas retiré. Les modifications du groupe motopropulseur ne sont effectuées qu'à partir du point de connexion avec le carter de transmission vers l'avant.

# Chapitre I : Introduction aux véhicules électrique et véhicules tout-terrain (quads)

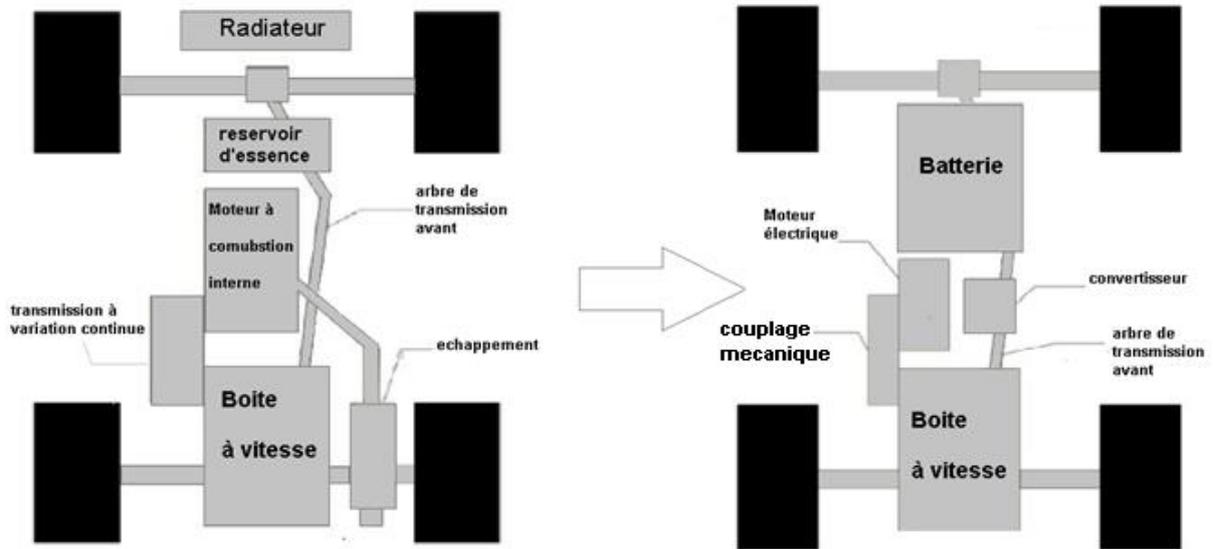


Fig.I.8. Électrification du quad à combustion interne [14]

## I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu exposer l'évolution des machines électriques en général à travers le temps et aussi brièvement et spécifiquement celle du quad ainsi que leurs succès.

Nous avons aussi pu voir la structure de ces deux types de véhicules, et les divers avantages qu'il y avait à en tirer de la conversion d'un véhicule tout terrain à moteur à combustion interne, en moteur électrique.

Dans le prochain chapitre nous allons donc voir les différents types de moteurs électriques existants, leurs avantages et inconvénients qui nous permettront de choisir le type de moteur le plus convenable possible.

**Chapitre II :**  
**Les machines électriques**  
**dédiées à la traction**

# Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

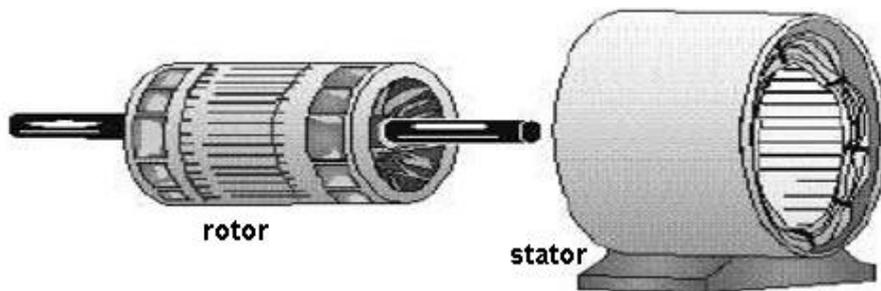
## II.1. Introduction

Les machines électriques sont des dispositifs réversibles permettant la conversion d'une énergie d'une forme à une autre. Elles sont dites génératrices si elles transforment une énergie mécanique en énergie électrique et dites moteurs si elles produisent une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique.

Ce chapitre a pour but d'établir un état d'art sur les machines électriques afin d'introduire les différents types existants en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients afin de justifier notre choix du type de machine pour l'élaboration de la chaîne de traction pour le quad.

## II. 2. Structure des machines électriques tournantes

Les machines électriques sont constituées d'une partie fixe qui est le stator et d'une partie tournante, le rotor, et ces deux parties sont séparées par l'entrefer.



**Fig.II.1.** Les deux parties constituant la machine électrique

L'entrefer peut être constant, on parle alors de machines à pôles lisses, ou variable dans le cas de machines à pôles saillants.

On distingue plusieurs catégories de machines électriques selon [15] :

- Leur alimentation statorique : continue ou alternative ;
- Leur rotor : bobiné excité, bobiné en court-circuit, à aimant permanent, à réluctance variable, à cage...etc.
- Leur entrefer : pôles lisses ou saillants.

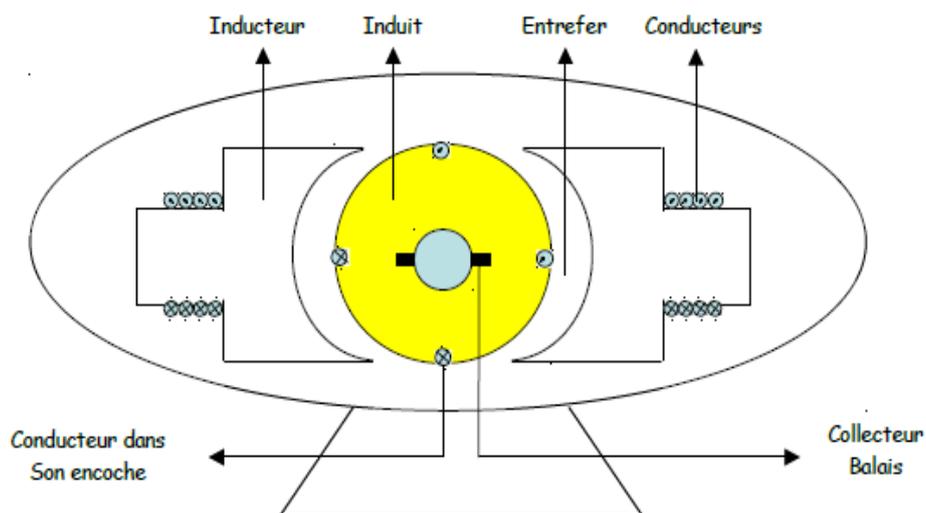
# Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

## II.3. Les machines à courant continu :

### II.3.1. Fonctionnement et Composition d'une machine à courant continu :

Les machines à courant continu sont des convertisseurs d'énergie totalement réversible, elles peuvent fonctionner soit en moteur ou en génératrice. Les composants d'une machine à courant continu sont [16] :

- Le stator : (inducteur) qui est formé soit d'aimants permanents en ferrite, soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer qui sépare la partie fixe de la partie mobile, ce flux et ce champ sont orientés du pôle nord vers le pôle sud.
- Le rotor (induit) : qui est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans les encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.
- Le collecteur et balais : le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur.



**Fig.II.2.** Composition du moteur à courant continu [16].

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

### II.3.2. Les différents types de machines à courant continu :

Suivant l'application, les bobinages de l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente [17] et on obtient 5 sous-catégories de machines à courants continue [15] :

- Machines à excitation indépendante ou séparée ;
- Machine à excitation shunt ou parallèle ;
- Machine à excitation série ;
- Machine à excitation composée ;
- Machine à aimant permanent ou l'inducteur est un aimant permanent.

### II.2.3. Les avantages et inconvénients du moteur à courant continu :

Le principal avantage de la machine à courant continu est son faible cout et la facilité à les commander. En revanche le rapport de puissance/volume est inférieur à celui des machines à courant alternatif [15], et il y a les ruptures de contacts au collecteur qui peuvent provoquer des arcs électriques à chaque commutation qui, en plus de la pression, limitent la durée de vie des balais. Aussi, si le moteur tourne à une vitesse trop élevée cela endommage le système de fixation des bobinages dur rotor [18].

### II.4. Les machines à courant alternatif :

Contrairement aux machines à courant continu qui tournent par la force générée entre deux champs magnétiques fixes, les moteurs à courant alternatifs exploitent la force générée entre deux champs magnétiques tournants dans le stator et le rotor et dans ces machines, le champ magnétique tournant dans le stator est créé par des courants triphasés qui passent dans ses enroulements [19]. Il existe trois types d'interaction entre le champ tournant et le rotor [15] :

- Interaction champ tournant – aimant : comme dans les machines synchrones à aimant permanents.

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

- Interaction champ tournant- courant : machine asynchrone et synchrone à rotor bobiné.
- Interaction champ tournant - matériau ferromagnétique : machines à réluctance variable.

Il existe deux types principaux de machines à courant alternatif : les machines synchrones et machines asynchrones.

### II.4.1. Les machines synchrones :

La machine synchrone est une machine à courant alternatif qui peut soit marcher en tant que moteur ou en génératrice et qui vérifie la relation suivante :

$$N_s = \frac{f}{P} \quad (II.1)$$

Où:  $N_s$  est la vitesse de synchronisme en tours/seconde;  $f$  la fréquence du réseau d'alimentation;  $P$  : nombre de pair de pôles de la machine

Lorsque cette machine fonctionne en moteur, elle ne peut tourner qu'à la vitesse de synchronisme  $N_s$  car le nombre de paire de pôles et la fréquence du réseau d'alimentation sont constants [20].

Ne pouvant pas démarrer en boucle ouverte contrairement à la machine asynchrone, elle a durant longtemps été utilisée dans les applications à forte puissance à vitesse fixe. Cependant avec le progrès de l'électronique et de la commande il est devenu possible de l'utiliser dans des applications à vitesse variable. De plus avec la découverte d'aimants permanents très efficaces, les machines synchrones sont potentiellement présentées en tant que moteurs dans les applications de forte puissance et haute précision [15].

#### II.4.1.1. Structure et principe de fonctionnement de la machine synchrone :

Comme toute machine, la machine synchrone est composée d'une partie mobile qui est le rotor et une partie fixe qui est le stator et qui sont séparés par l'entrefer. La seule différence avec les autres machines se situe au niveau de la conception du rotor.

Après le démarrage, le moteur tourne à la vitesse de synchronisme qui est la même que celle du champ tournant. Lorsque la machine tourne à vide, l'axe du champ tournant et celui du

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

rotor sont confondus, mais lorsqu'elle est en charge ils sont légèrement décalés et la vitesse est constante peu importe la charge [21].

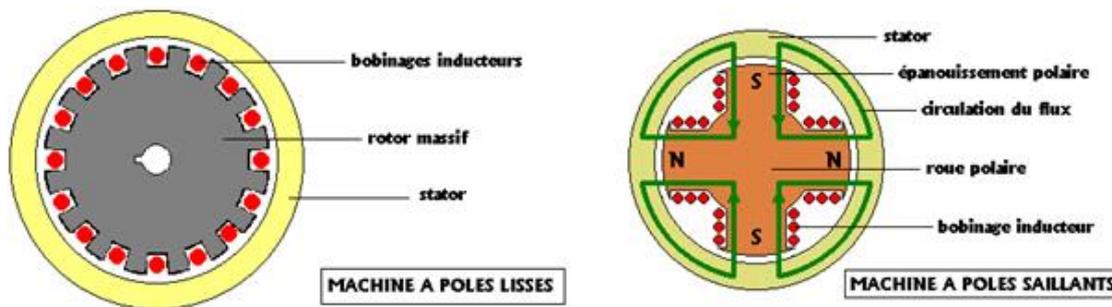
### II.4.1.1.1. Le stator :

C'est la partie fixe de la machine et le siège du courant d'induit par variation du flux rotorique il est constitué de ces parties importantes que sont :

- Le châssis : qui est le corps extérieur de la machine en fonte qui protège les parties intérieures
- Le cœur du stator : il est fabriqué en acier au silicium. Il est composé de plusieurs estampages isolés les uns des autres et sa fonction est d'assurer un chemin facile pour les lignes de champs et de servir de support et protection pour les enroulements.
- Les enroulements du stator : des ventes sont réalisées sur la périphérie intérieure du noyau dans lesquels est logé l'enroulement monophasé ou triphasé [20].

### II.4.1.1.2. Le rotor :

C'est la partie tournante de la machine qui tourne, il peut être un aimant permanent lorsqu'il s'agit de petites machines ou un enroulement sous forme d'un cylindre ferromagnétique abritant un bobinage qui une fois alimenté avec un courant génère p paire de pôles [22]. Il peut être à pôles lisses (entrefer constant) ou à pôles saillants (entrefer variable)



**Fig.II.3.** Coupe de la structure des machines à pôles lisses et à pôles saillants

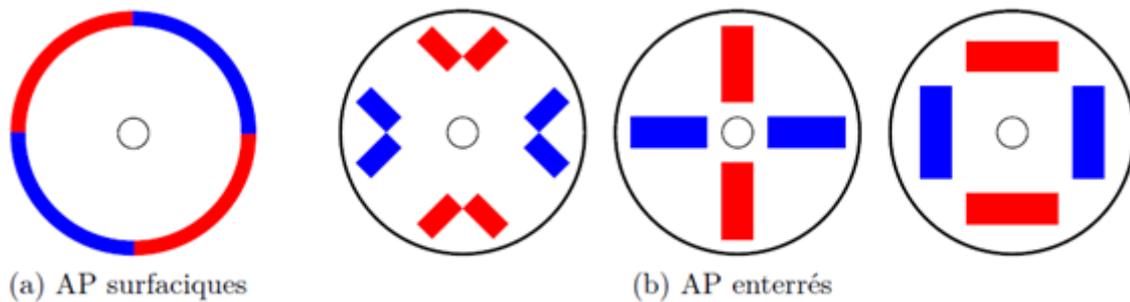
### II.4.1.2. Les différents types de machine synchrones :

Il existe plusieurs configurations pour les machines synchrones mais les deux principales et les plus fréquentes sont :

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

### II.4.1.2.1. Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) :

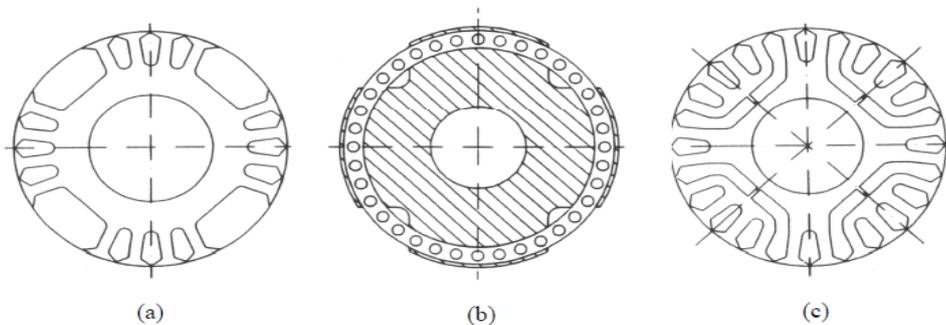
Au cours des dernières années les MSAP sont devenu une référence dans le monde industriel, que ce soit du point de vue économique que techniques en raison de leurs très bonnes performances dans les deux plans [23]. De plus leur maintenance et leur commande sont faciles. Mais leur cout de fabrication dépend surtout de la qualité des aimants [24].



**Fig.II.4.** Exemples de différentes configurations des MSAP [15]

### II.4.1.2.2. Les machines synchrones à reluctance variable :

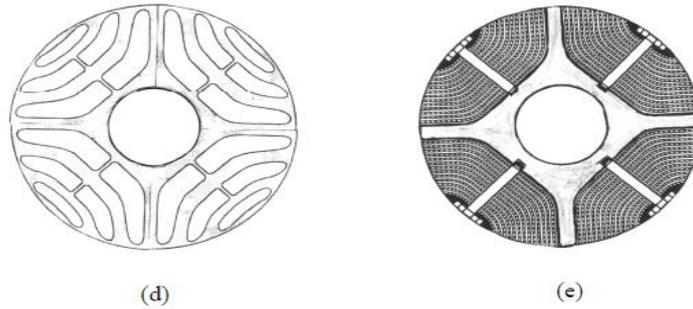
Le rotor est à structure saillante et dans sa forme classique est munie une cage d'écuréuil qui assure le démarrage direct et une stabilité du fonctionnement au synchronisme.



**Fig.II.5.** Structures de rotor à cage [25]

Mais on peut se passer de la cage en associant cette machine à un convertisseur et un capteur de position [26].

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction



**Fig.II.6.** Structures de rotor sans cage [26]

### II.4.1.3. Avantages et inconvénients des machines synchrones :

Le principal avantage de la machine synchrone est sa vitesse de rotation qui reste constante peu importe la charge mécanique selon les limites de fonctionnement et qui est la même que celle du champ tournant ce qui permet d'avoir un meilleur rendement [27] [28].

Quant aux inconvénients, on peut les résumer au fait que le démarrage ne puisse pas s'effectuer directement et nécessite une aide extérieure (un moteur auxiliaire) afin d'atteindre la vitesse de synchronisme, ainsi que le risque d'instabilité dans le cas où le couple résistant dépasse la valeur du couple maximum et sont aussi connus pour leurs coûts élevés des aimants [27].

### II.4.2. La machine asynchrone :

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont le rotor tourne à une vitesse légèrement différente de la vitesse du champ magnétique à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique. La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique [29].

Cette machine est la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, en raison de ces nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût [30], sans besoin de maintenance périodique, capable de démarrer en boucle ouverte et facile à commander pour des applications à vitesse variable ne nécessitant pas une haute précision dynamique [31].

Ces nombreux avantages font que notre choix est tombé sur la machine asynchrone pour trainer notre véhicule électrique de type quad.

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

### II.4.2.1. Constitution de la machine asynchrone :

La machine à induction comprend un stator et un rotor. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. L'une des composantes, appelée le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation sur lequel sont placés les enroulements qui seront accessibles de l'extérieur [32].

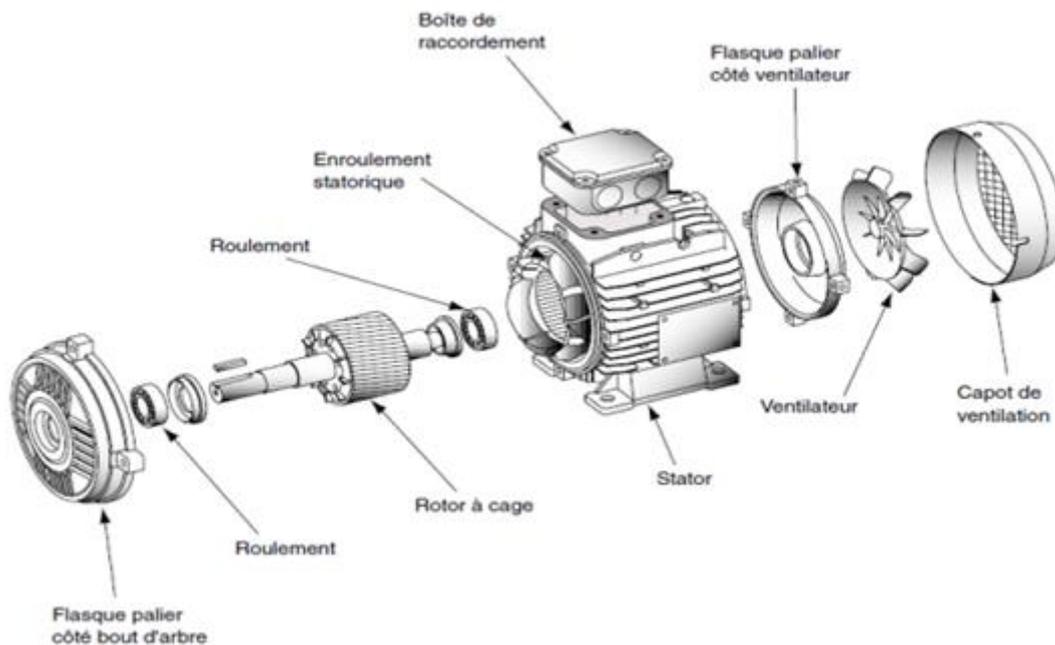
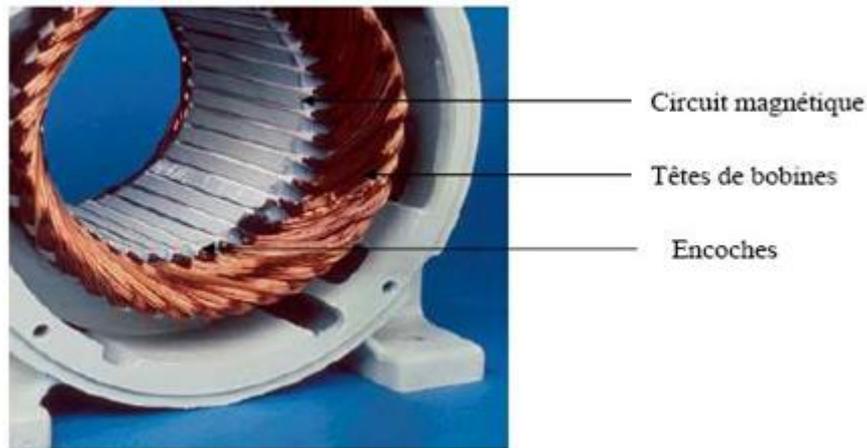


Fig.II.7. Moteur asynchrone à cage [29]

#### II.4.2.1.1. Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique, Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude, Le bobinage statorique est constitué de deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Quant aux têtes de bobines elles permettent la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif est d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [32].

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction



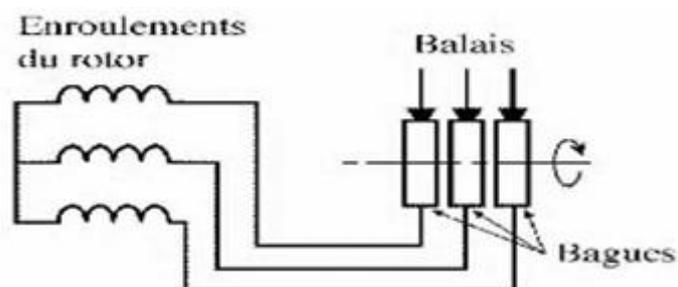
**Fig.II.8.** Le stator d'une machine asynchrone

### II.4.2.1.2. Rotor :

C'est l'élément mobile du moteur. Se compose d'un cylindre de tôles empilées et habituellement du même matériau que le stator. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un moyeu. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. [33]

#### II.4.2.1.2.1. Rotor Bobiné :

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais fixes. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur [32].

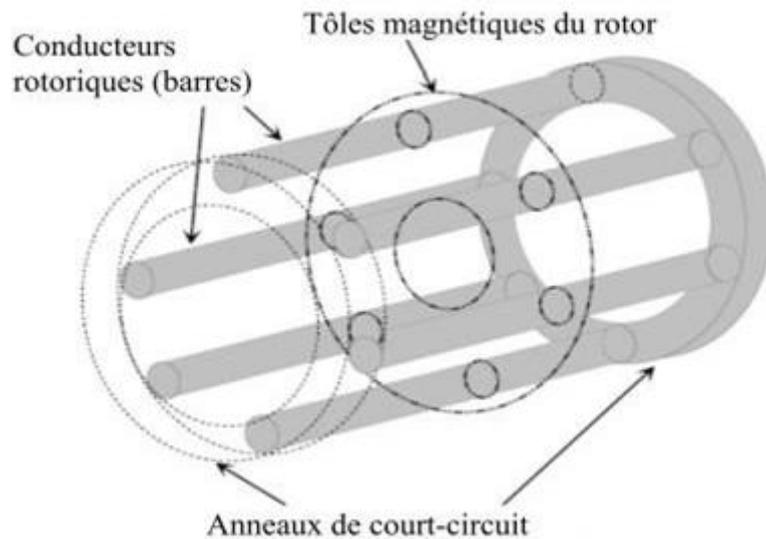


**Fig.II.9.** Rotor Bobiné d'une machine asynchrone

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

### II.4.2.1.2.2. Le rotor à cage :

Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service. Les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor, et sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné [30].



**Fig.II.10.** Rotor à cage d'écureuil [29]

### II.4.2.2. Principe de fonctionnement :

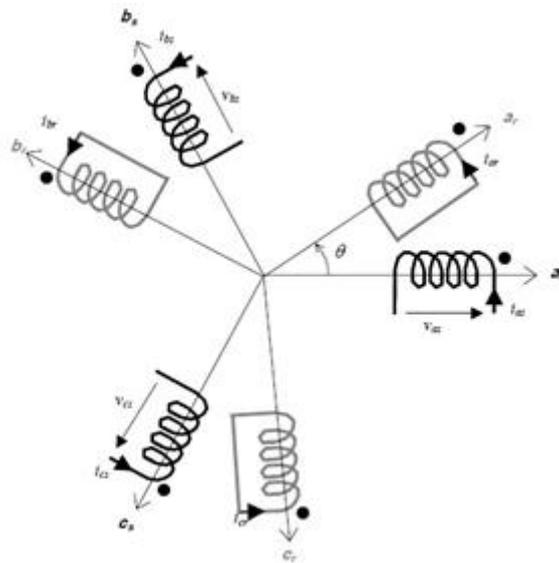
Le principe de fonctionnement de la machine est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique. En effet, le stator alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées crée un champ magnétique tournant [29].

Les enroulements statoriques identiques, alimentés par un système triphasé équilibré de tensions de pulsation  $\omega_s$ , créent un champ magnétique tournant à la vitesse synchrone :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad (II.2)$$

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

Le champ tournant produit par le stator induit des courants dans les enroulements rotoriques. Ces courants, soumis à l'action du champ magnétique statorique, produisent un couple et qui va entrainer le rotor en rotation. Suivant la loi de Lenz, le rotor se met à tourner avec le sens de rotation du champ tournant. Néanmoins, si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme,



**Fig.II.11.** Représentation des enroulements d'une machine à induction [31]

Les enroulements rotoriques ne seront plus exposés à un flux variable, et aucun courant n'y sera induit. Le couple produit est nul dans ce cas-là, ce qui fait que la vitesse du rotor  $\Omega_e$  ralentit. Lorsque  $\Omega_e$  devient inférieure à la vitesse de synchronisme, le rotor ressent un champ magnétique variable, et un couple est produit de nouveau pour accélérer le rotor. La différence relative entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de synchronisme est appelée le glissement, qui est noté  $g$  :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_e}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (II.3)$$

La pulsation des courants rotoriques  $\omega_r$  est égale à la pulsation du champ tournant vue dans le repère du rotor [31] :

$$\omega_r = \omega_s - \omega_e = g\omega \quad (II.4)$$

## Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction

### II.4.2.3. Avantages et inconvénients des machines asynchrones à cage d'écureuil :

La machine asynchrone à cage d'écureuil est très utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, à cause de ces nombreux avantages à partir de sa conception. Elle est moins chère et moins volumineuse que la machine synchrone, et est très robuste. De plus, une bonne standardisation existe entre les différents fabricants.

Cependant, la simplicité de conception de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante. La machine asynchrone à cage d'écureuil ne contient pas des brosses, des bagues collectrices et des commutateurs. Pour cette raison, la machine est peu coûteuse.

Un autre avantage non négligeable d'une machine asynchrone à cage d'écureuil est qu'elle dispose d'un câblage simple vers le réseau. Pour le mettre en service, il suffira d'appliquer une tension triphasée au stator et la machine démarrera immédiatement [34].

L'un des inconvénients du rotor à cage d'écureuil est le faible couple de démarrage. Donc en fabriquant la cage du rotor d'un matériau avec une résistance spécifique plus élevée (par exemple, du laiton au lieu du cuivre), la résistance du rotor va augmenter. À la suite de cette augmentation, le couple de démarrage du moteur électrique augmentera et les courants de démarrage diminueront.

Toutes ces raisons expliquent leur popularité en milieu industriel, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, quads électriques), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur, mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice [31].

### II.5. Conclusion :

Le travail effectué dans ce chapitre a permis de réaliser un état d'art sur les machines électriques tournantes.

On a d'abord introduit la structure générale de chaque type de machine. Puis ses composants et les sous catégories de celles-ci, et pour finir les avantages et inconvénients de chaque machine.

## **Chapitre II : Les machines électriques dédiées à la traction**

Nous avons opté au final pour le moteur asynchrone à cage d'écureuil et ce pour ces nombreux avantages qui en font le meilleur candidat.

Maintenant que nous avons décidé de quel moteur choisir, dans le chapitre suivant nous allons entamer la modélisation des différentes parties de la chaîne de traction pour notre véhicule qui est le quad.

**Chapitre III :**

**Modélisation et commande  
de la chaîne de traction**

# Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

## III.1. Introduction :

La machine asynchrone est, de loin, la machine la plus utilisée dans les différentes applications industrielles et ce pour la simplicité de sa construction, son faible coût, sa robustesse ainsi que la facilité de son utilisation.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la modélisation de celle-ci ainsi qu'à la chaîne de traction, à partir des différentes équations de la machine (modèle mathématique) et de celles de l'onduleur pour réaliser la simulation du modèle qui nous permettra d'observer les différentes caractéristiques et l'évolution des différentes grandeurs afin de pouvoir contrôler la vitesse du moteur asynchrone soumis à une charge.

## III.2. Modélisation de la machine asynchrone :

La machine asynchrone triphasée est constituée d'un stator fixe et un rotor tournant autour de l'axe de symétrie de la machine.

Sur la face interne du stator, des encoches sont régulièrement réparties et logent trois enroulements identiques à  $p$  paires de pôles ; leurs axes sont séparés par un angle électrique de  $2\pi/3$ .

Les phases du stator sont soit alimenté par une source triphasée sinusoïdale à fréquence et amplitude constantes, soit par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et amplitude réglable. La structure électrique du rotor peut être réalisée soit par un système d'enroulements triphasé ou par une cage conductrice qu'on admettra comme étant équivalente à la première [35].

### III.2.1. Hypothèses simplificatrices :

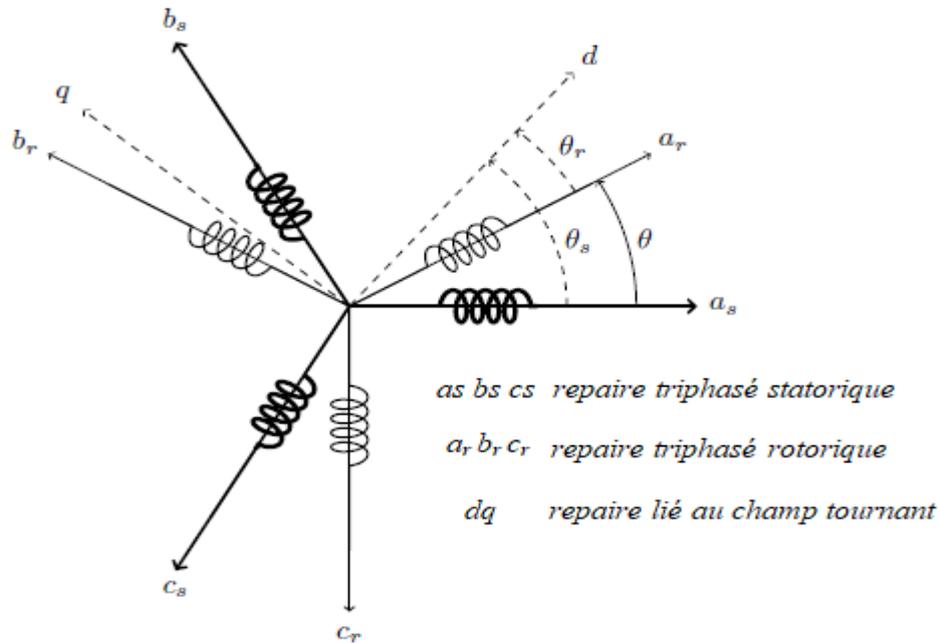
Afin de simplifier et ne pas complexifier ce système et faciliter son étude, on va poser ces hypothèses simplificatrices [35] [36] :

- On suppose que le circuit magnétique est non saturé et à perméabilité constante ;
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault et pertes fer sont négligées ;
- On néglige la variation des résistances des enroulements selon la température ;
- L'entrefer est lisse ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- On peut noter parmi les conséquences de ces hypothèses :

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La constance des résistances statoriques et rotoriques.

### III.2.2. Modèle de la machine dans le repère triphasé abc [35] :



**Fig.III.1.** Model de la machine asynchrone dans le repaire triphasé [15]

En se basant sur les hypothèses simplificatrices qu'on a posé précédemment on peut écrire :

#### III.2.2.1. Les équations électriques :

Les équations de la tension statorique et rotorique comme suit [35] :

Au stator :

$$\begin{cases} v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\varphi_{as}(t)}{dt} \\ v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\varphi_{bs}(t)}{dt} \\ v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\varphi_{cs}(t)}{dt} \end{cases} \quad (III.1)$$

Au rotor :

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaine de traction

$$\begin{cases} v_{ar}(t) = R_s i_{ar}(t) + \frac{d\varphi_{ar}(t)}{dt} \\ v_{br}(t) = R_s i_{br}(t) + \frac{d\varphi_{br}(t)}{dt} \\ v_{cr}(t) = R_s i_{cr}(t) + \frac{d\varphi_{cr}(t)}{dt} \end{cases} \quad (III.2)$$

### III.2.2.2 Les équations magnétiques :

Les équations du flux statorique et rotorique peuvent être exprimé comme suit [37] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \dots \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ \dots \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \dots \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Où nous avons plus en détail :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & \vdots & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & \vdots & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & \vdots & m_3 & m_2 & m_3 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 & m_2 & m_3 & \vdots & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & \vdots & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & \vdots & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} m_1 = m_{sr} \cos \theta \\ m_2 = m_{sr} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ m_3 = m_{sr} \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

### III.2.2.3. Equation mécanique :

En appliquant le principe fondamental de la dynamique on peut écrire [35] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_v \Omega \quad (III.5)$$

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

Où :  $C_{em}$  est le couple électromagnétique ;  $C_r$  est le couple résistant de la charge ;  $J$  est l'inertie de la machine ;  $f_v$  le coefficient de frottement visqueux

### III.2.3. Modèle de la machine dans le repère biphasé [35] [38] [39] :

#### III.2.3.1. Transformation d'un repère triphasé-diphasé :

Afin d'effectuer la modélisation de la machine asynchrone, on doit effectuer une transformation du repère triphasé  $abc$ , en repère biphasé  $\alpha\beta$  et inversement. Il y a principalement deux transformations : *Clark* et *Concordia*

La transformation de *Clark* conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple. D'autre part la transformation de *Concordia* conserve la puissance mais pas les amplitudes. On peut exprimer ces transformations comme suit :

- Pour le passage d'un système triphasé  $abc$  vers un système diphasé  $\alpha\beta$  :

Transformation de *Concordia* :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{23} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ avec: } T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (III. 6)$$

Transformation de *Clark* :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ avec: } C_{23} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (III. 7)$$

- Pour le passage d'un système diphasé  $\alpha\beta$  vers un système triphasé  $abc$  :

Transformation de *Concordia* :

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ avec } : T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Transformation de *Clark* :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ avec } : C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

### III.2.3.2 La transformation de Park :

C'est la transformation sur laquelle sera basée la modélisation de la machine asynchrone et qui se résume à la transformation d'un système triphasé à un système diphasé et inversement, par le passage du repère *abc* vers *αβ* qui est fixe par rapport à celui-ci, puis vers le repère *dq* qui est mobile par rapport à *αβ* formant un angle appelé l'angle de *Park*.

La matrice de Park est exprimée comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

Et son inverse :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

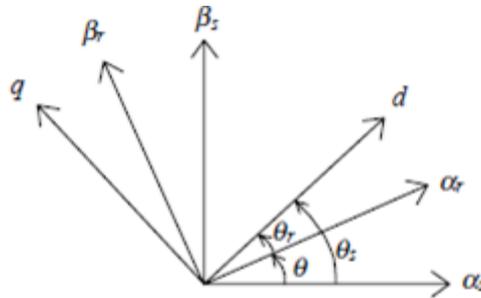
Dans le repère de Park on a trois angles :

- $\theta_s$  : L'angle formé entre le repère *dq* et la phase *a* du stator

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

- $\theta_r$ : L'angle formé entre le repère dq et la phase a du rotor
- $\theta$  : L'angle de Park

On peut lier les ongles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :  $\theta_s = \theta_r + \theta$



**Fig.III.2.** Repère de la transformation de Park [39]

On peut aussi noter que les vitesses angulaires sont exprimées comme suit :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}; \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}; \omega = \frac{d\theta}{dt} \text{ avec } \omega = p\Omega$$

Où :  $\omega_s$  est la pulsation électrique du circuit statorique [rad/s ;  $\omega_r$  est la pulsation électrique du circuit statorique [rad/s ;  $\omega$  est la vitesse angulaire du rotor [rad/s ;  $p$  le nombre de paires de pôles.

Qu'elles soient statoriques ou rotoriques le changement de variables se feront comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

### III.2.3.3. Choix du référentiel [40] [41] [42] :

Le repère  $dq$  comme on a pu le voir jusqu'à présent est un repère non défini et donc libre. Mais on peut le fixer en le liant soit au rotor, ou au stator ou bien au champs tournant nous avons donc trois choix :

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

- **Référentiel lié au stator ou repère stationnaire** ( $\alpha, \beta$ ) : qui est immobile par rapport au stator où :  $\theta_s = 0$ . Ici les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique  $\omega_s$ .
- **Référentiel lié au rotor** ( $x, y$ ) : Immobile par rapport au rotor où  $\theta_r = 0$ . Ici les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotorique  $\omega_r$ . Il est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones. Ce référentiel est utilisé pour étudier les variations importantes de la vitesse de rotation, associée ou non aux variations de la fréquence d'alimentation
- **Référentiel lié au champ tournant** : Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobile par rapport au champ électromagnétique créé par le stator. Ce référentiel permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent, ce qui permet de faciliter la régulation. Il est aussi généralement utilisé dans la commande de couple et de vitesse.

### III.2.3.4. Model de la machine asynchrone dans le repère de Park dans un repère lié au champs tournant [35] [38] [39] [40] :

Les différentes équations de la machine asynchrone dans le repaire biphasé après application de la transformée de Park dans un repère lié au champ tournant, sont exprimées comme suit :

Pour les équations électriques on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (III.13)$$

Et les équations magnétiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{array} \right. \quad (III.14)$$

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

$$\text{Avec : } L_s = l_s - m_s ; L_r = l_r - m_r ; M = \frac{3}{2} m_{sr}$$

Avec (III.14) dans (III.13) et pour  $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$  le modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_s (L_s i_{qs} + M i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s (L_s i_{ds} + M i_{dr}) \\ 0 = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \\ 0 = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_{gl} (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \end{cases} \quad (III.15)$$

L'équation mécanique :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (III.16)$$

$$\text{Avec : } \Omega = \frac{\omega_r}{p} \text{ et } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (III.17)$$

Le couple électromagnétique à plusieurs expressions après diverse manipulation de l'équation fondamentale (III.17) :

$$C_{em} = \begin{cases} p(\varphi_{qr} I_{dr} - \varphi_{dr} I_{qr}) \\ pM(I_{qs} I_{dr} - I_{qs} I_{ds}) \\ p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \\ p \left( \frac{1-\sigma}{\sigma M} \right) (\varphi_{dr} \varphi_{qs} - \varphi_{qr} \varphi_{ds}) \\ \text{avec : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (III.18)$$

# Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

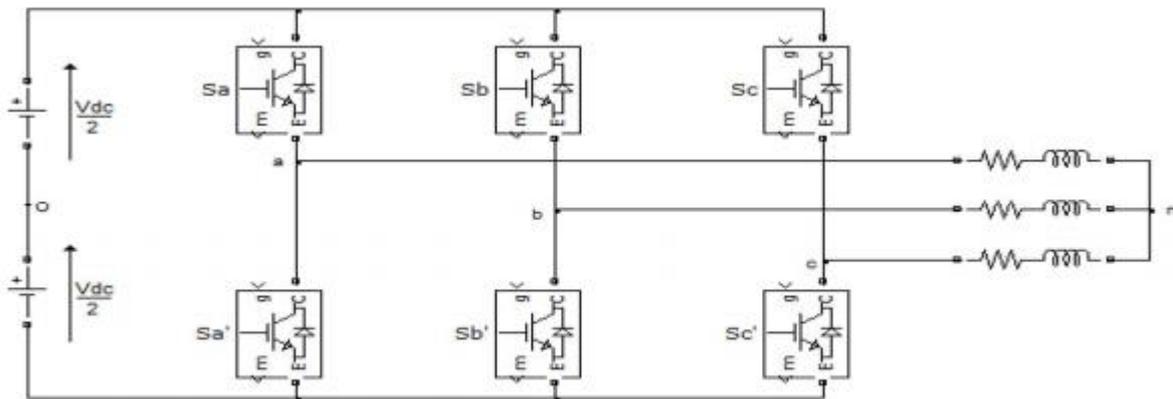
## III.3 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux :

Pour alimenter la machine asynchrone à cage, on utilise généralement un onduleur de tension qui devient de plus en plus importants dans le domaine de l'électronique de puissance. L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie [43].

Un onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras, avec deux interrupteurs pour chaque bras, chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération. On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
  - Onduleurs de tension.
  - Onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.).
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.) [44] [45].

La figure suivante présente un schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux :



**Fig.III.3.** Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être définis par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ) :

- $S_i = 1$  le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$  le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

Dans ces conditions on peut écrire les tensions " $\mathcal{V}_{io}$ " en fonction des signaux de commande " $S_i$ " et en tenant compte du point fictif "o" :

$$\mathcal{V}_i^0 = V_{dc} \left( S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (III.19)$$

Soit 'n' le point neutre du côté alternatif (MAS), alors les trois tensions composées :  $\mathcal{V}_{ab}$ ,  $\mathcal{V}_{bc}$ , et  $\mathcal{V}_{ca}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (III.20)$$

La charge constituée par le moteur est équilibrée ( $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$ ), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (III.21)$$

En faisant apparaître le point "o", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{bo} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{co} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{ao} \end{cases} \quad (III.22)$$

En remplaçant (III.22) dans (III.21) on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{pmatrix} \quad (III.23)$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et o :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (III.24)$$

L'utilisation de l'expression (III.19) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

### III.3.1. Commandes des Onduleurs :

La commande la plus classique de pilotage des onduleurs se fait par comparaison entre deux signaux. On appelle ces signaux modulante et porteuse. La modulante est le signal de référence normalisé par la source de tension continue et la porteuse est un signal triangulaire compris entre 0 et 1 dont la fréquence beaucoup plus élevée que la modulante. Si la modulante est plus grande que la porteuse, la commande de l'interrupteur prend la valeur 1 si non c'est 0 [46] [47].

### III.3.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour déterminer les instants réels de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui permet d'atteindre ce but [2].

La Modulation en Largeur d'Impulsions « MLI », (Pulse Width Modulation « PWM » en anglais ou Pulse Duration Modulation « PDM », c'est une technique de pilotage couramment utilisée pour synthétiser des signaux continus à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à états discrets [48].

Cette technique est très populaire dans l'industrie. Le principe de cette technique est la comparaison entre une tension de référence sinusoïdale à faible fréquence et une porteuse triangulaire à fréquence plus élevée. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [44].

#### III.3.2.1. Modulation naturelle :

Le signal d'entrée qui nommé **signal modulant** est comparé à un triangle pour obtenir un signal binaire de type MLI, la comparaison de ce signal modulant de fréquence  $f_m$  avec **une porteuse triangulaire** de fréquence  $f_p$  résultante des instants d'intersection ainsi que les largeurs des impulsions modulée .

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

Les conditions suivantes doivent être respectées :

- Fréquence du signal d'entrée bien plus faible que celle du triangle,
- Amplitude du signal d'entrée inférieure ou égale à celle du triangle (pas de saturation).

Enfin, le signal MLI, issu de la comparaison, pilote les interrupteurs de puissance. Si la valeur instantanée du signal est supérieure à celle du triangle [49].

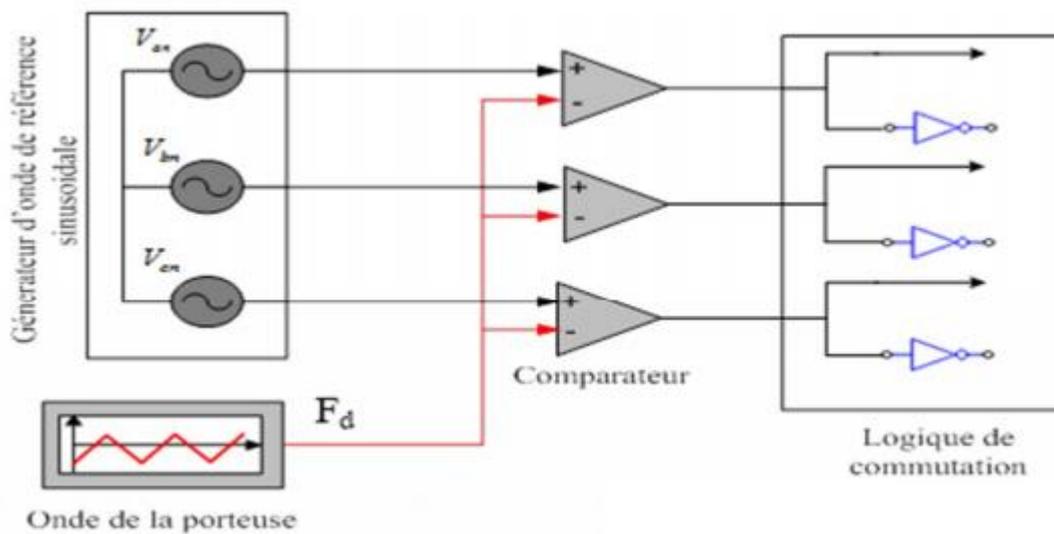


Fig.III.4. : Schéma de principe de MLI sinus-triangle.

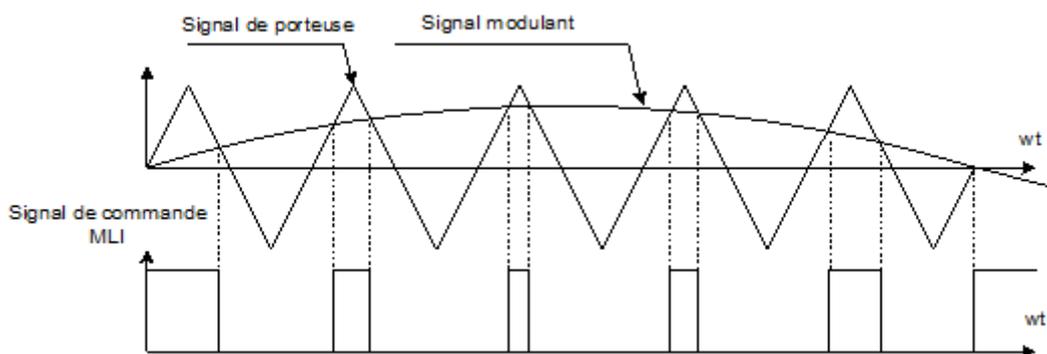
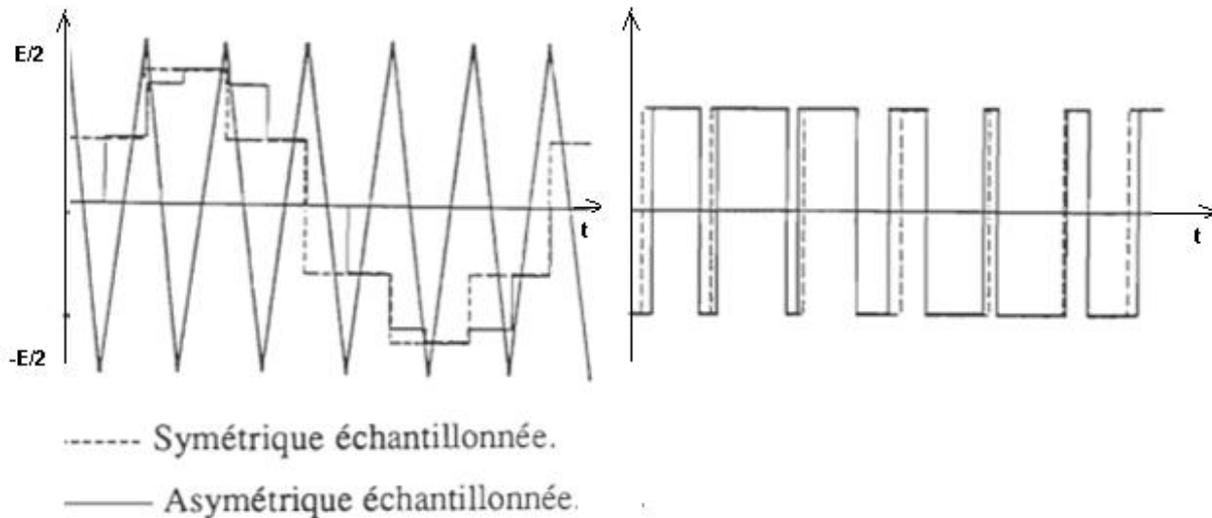


Fig.III.5. : principe de la commande MLI naturelle

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

### III.3.2.2 Modulation MLI de type régulière échantillonnée "Regular sampled PWM" :

Les principales caractéristiques de la technique MLI de type régulière sont présentées par la figure suivante :



**Fig.III.6.** Principe de la modulation MLI de type régulière échantillonnée.

Comme c'est montré, deux types de modulations régulières échantillonnées sont à distinguer, l'une 'symétrique' et l'autre 'asymétrique'. Dans le cas de la modulation asymétrique la période d'échantillonnage est égale à une demi-période de l'onde porteuse, par contre la modulation symétrique un seul échantillon par période de l'onde porteuse, est utilisé pour calculer la largeur de l'impulsion modulée [50].

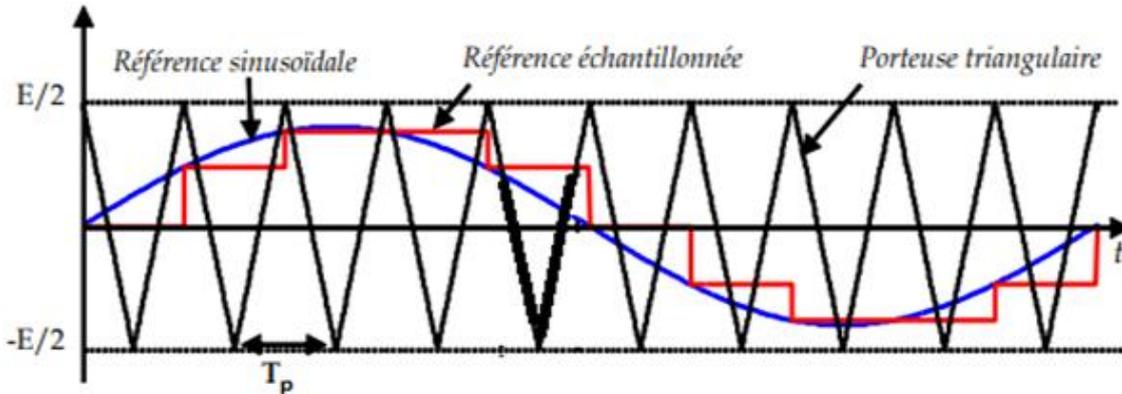
#### III.3.2.2.1. Modulation MLI de type régulière échantillonnée symétrique :

L'onde modulante est échantillonnée à chaque sommet positif de l'onde triangulaire et cette valeur reste constante durant toute la période d'échantillonnage, à l'aide d'un bloqueur d'ordre zéro. Cette procédure produit une onde en palier, qui est une approximation de la référence sinusoïdale ( $V_{iref}$ ). Cette dernière qui une fois comparé à l'onde porteuse, définit les points d'intersections utilisés pour déterminer les instants de commutations. Cette comparaison peut être décrite analytiquement.

Les largeurs d'impulsions de cette technique sont proportionnelles à l'amplitude de l'onde de modulation aux instants d'échantillonnage, et espacées par des intervalles réguliers,

# Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

uniforme, égales à la période  $T_P$ , Cette méthode est facilement réalisable en temps réel [46] [50].



**Fig.III.7.** MLI régulière symétrique

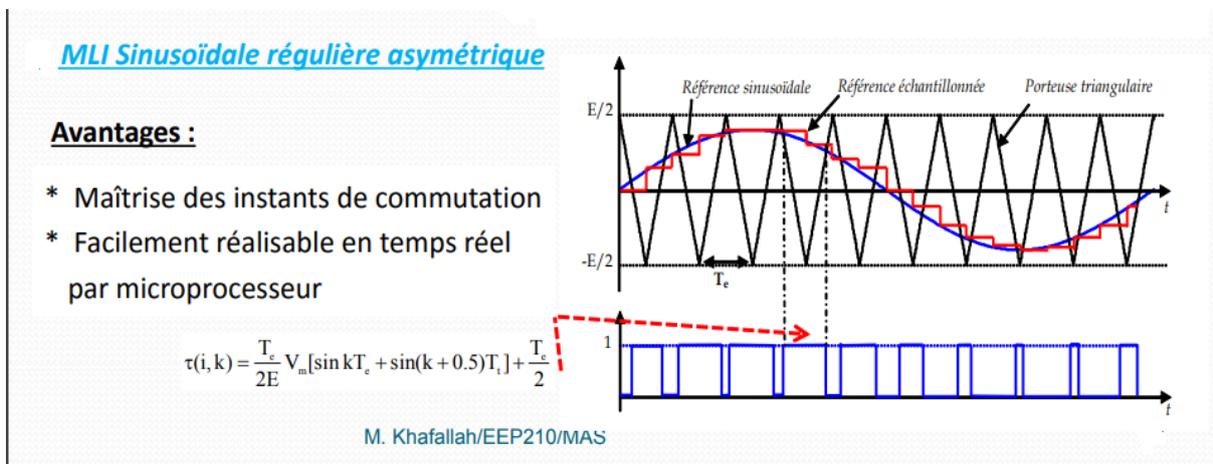
Cette équation présente la largeur d’impulsion de commande dans ce cas [50] :

$$T(k) = \frac{T_P}{E} V_m \sin(k T_P) + \frac{T_P}{2} \tag{III. 26}$$

### III.3.2.2.2. Modulation MLI de type régulière échantillonnée asymétrique :

Dans le cas de la MLI régulière asymétrique, la fréquence du blocage soit doublé par rapport à la MLI régulière symétrique à cause le signal de consigne qui été bloqué sur les crêtes positive et négatives du triangle, cette technique résulte une reproduction plus fine des signaux [49].

La figure (fig.III.8) suivante représente le principe de fonctionnement et les avantages de cette commande :



**Fig.III.8.** MLI régulière asymétrique

# Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

## III.3.4. Les avantages de la commande MLI

Loin d'être un élément accessoire dans la chaîne de variation de vitesse (variateur électrique associé à une machine électrique), l'étage MLI joue un rôle essentiel avec des conséquences sur toutes les performances du système : les performances d'entraînement, les pertes dans l'onduleur ou dans la machine, le bruit acoustique, le bruit électromagnétique.

L'avantage majeur de ces techniques de commande est d'imposer une fréquence de commutation parfaitement définie aux interrupteurs de l'onduleur [51].

La commande MLI est utilisée principalement pour pouvoir :

- Repousser les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées, ce qui facilite le filtrage (réalisation plus facile, moins onéreux).
- Permettre le réglage de l'amplitude du fondamental de la tension de sortie.
- Alimenter les machines à courant alternatif par des courants quasi sinusoïdaux.

## III.4. Modélisation du véhicule électrique :

Pour modéliser le véhicule électrique qui est le quad dans notre cas, on doit déterminer le bilan des efforts appliqués au véhicule. Les équations sont basées directement sur les théories de la mécanique et de l'aérodynamique. Nous allons modéliser les différentes forces que subit le quad électrique lorsqu'il se déplace le long d'une pente.

### III.4.1. Les différentes forces agissantes sur le véhicule électrique [14] [51] :

Les différentes forces agissant sur le véhicule électrique avec un masse total  $m$ , en mouvement au long d'une pente sont représentées sur la figure

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

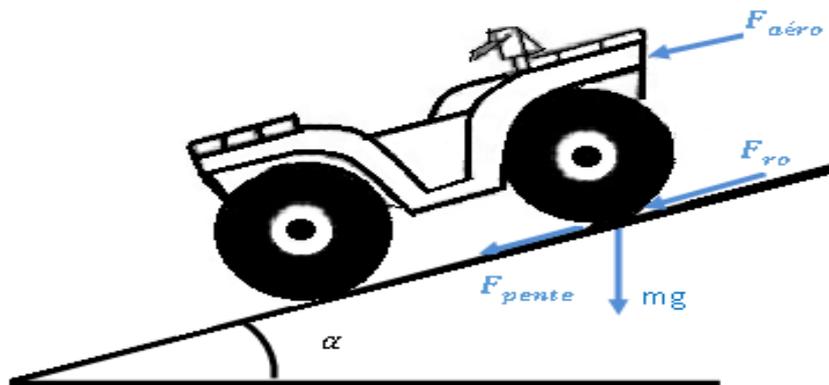


Fig.III.9. Représentation des forces agissant sur le véhicule

On peut résumer ces forces en trois forces principales :

- **Force de résistance au roulement** : Due principalement à de la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Le coefficient  $\mu$  dépend de la pression du pneu et la vitesse de déplacement du véhicule. Cette force est donnée par la relation :

$$F_{ro} = \mu m g \cos(\alpha) \quad (III.27)$$

Où :  $\mu$  est le coefficient de résistance au roulement ;  $m$  (kg) est la masse du véhicule ;  $g$  ( $m/s^2$ ) représente la gravité

- **Force résistante à la pénétration dans l'air** [14] : Lors du déplacement du véhicule dans l'air, une force aérodynamique contraire au sens du déplacement est engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carrosse du véhicule. Son expression est donnée par :

$$F_{aéro} = 0.0386 \cdot \rho_{air} C_d A (v + v_0)^2 \quad (III.28)$$

Avec :  $\rho_{air}$  ( $kg/m^3$ ) est la densité de l'air ;

$C_d$  Est le coefficient de trainée aérodynamique ;

$A$  : ( $m^2$ ) représente la surface frontale du véhicule ;

$v$  : ( $m/s$ ) est la vitesse du véhicule ;

$v_0$  : ( $m/s$ ) est la vitesse du vent de face.

## Chapitre III : modélisation et commande de la chaîne de traction

- **Force résistante due à la pente à gravir :** Cette force est proportionnelle à la masse  $m$  du véhicule pour gravir une pente avec un angle  $\alpha$

$$F_{pente} = m g \sin(\alpha) \quad (III.29)$$

On obtient la Force résistive totale par l'expression:

$$F_{rt} = F_{ro} + F_{aéro} + F_{pente} \quad (III.30)$$

Le moteur électrique doit assurer la force de traction du véhicule électrique  $F$  on aura l'équation du mouvement comme suit :

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_{rt} \quad (III.31)$$

L'expression du travail est définie comme suit :

$$\vec{W} = \sum_i^3 \vec{F}_i \cdot \vec{dx} \quad (III.32)$$

Une fois l'expression (III.32) dérivée par rapport au temps on obtient la puissance mécanique du véhicule électrique suivante :

$$P_v = \frac{d\vec{W}}{dt} = \vec{F}_{rt} \left( \frac{d\vec{x}}{dt} \right) \Leftrightarrow P = \vec{F}_{rt} \cdot \vec{v}$$

L'expression du couple mécanique est donnée par :

$$T = \frac{r_w}{i} F_{rt}$$

$r_w$  : est le rayon effectif de la roue

$i$  : représente le gain réducteur qui relie le moteur à l'axe.

### III.5. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'établir la modélisation de l'ensemble machine asynchrone, convertisseur statique et du véhicule électrique tout terrain.

## **Chapitre III : modélisation et commande de la chaine de traction**

Nous avons opté pour l'application de la commande par modulation de largeur d'impulsion, en alimentant la machine asynchrone par un onduleur MLI.

Dans le chapitre qui suit nous allons élaborer la simulation de la chaine de traction, grâce au logiciel Matlab-Simulink pour valider les modèles de chaque élément de la chaine du véhicule, et observer les caractéristiques de chaque élément et les discuter.

**Chapitre IV :**

**Simulation de la chaîne de  
traction du véhicule tout-  
terrain et interprétation des  
résultats**

# Chapitre IV : Simulation de la chaine de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

## IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons entamer la partie simulation de la chaine du quad, à partir des hypothèses simplificatrices et les différentes équations qui ont permis d'établir la modélisation de chaque élément de la chaine du véhicule (machine asynchrone, onduleur, quad).

Pour se faire nous allons utiliser le logiciel MATLAB SIMULINK qui va nous permettre de réaliser les différents schémas bloc de la chaine de traction, pour pouvoir visualiser les différentes allures, de la vitesse, des couples, de la tension et des courants à partir des paramètres de la machine asynchrone et ceux du quad.

## IV.2. Simulation de la machine asynchrone avec alimentation sans onduleur sur MATLAB-Simulink :

Les paramètres de la machine utilisée pour la simulation sont donnés dans l'annexe

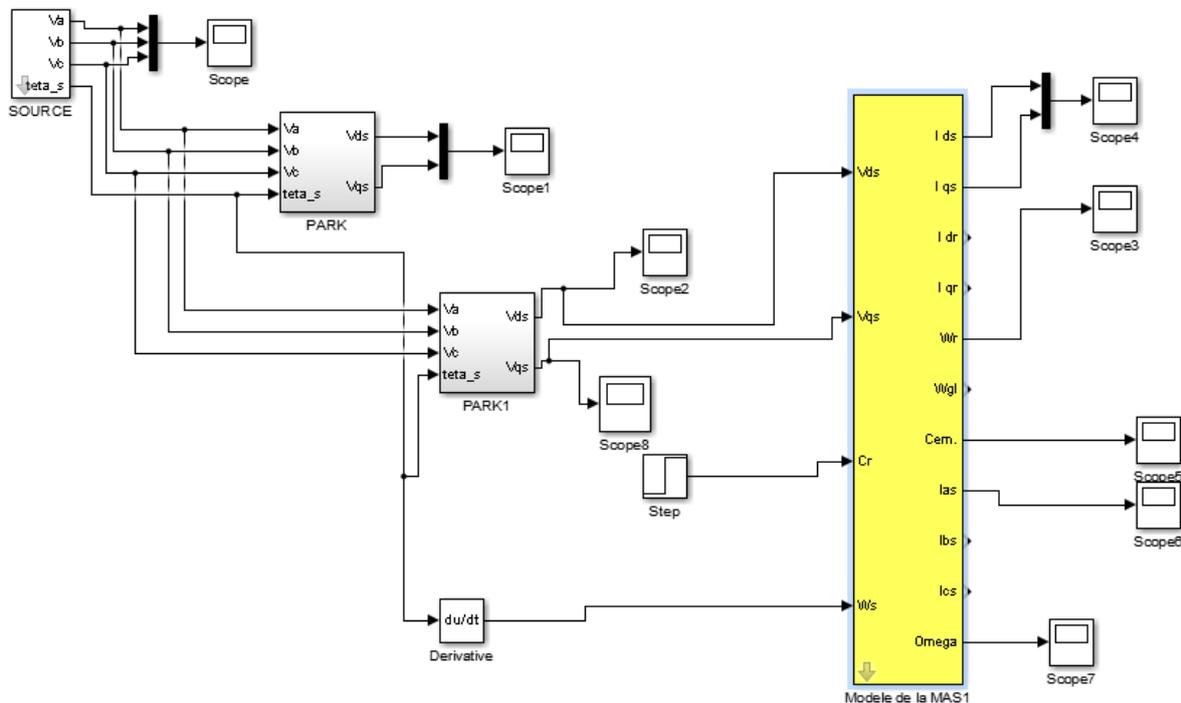
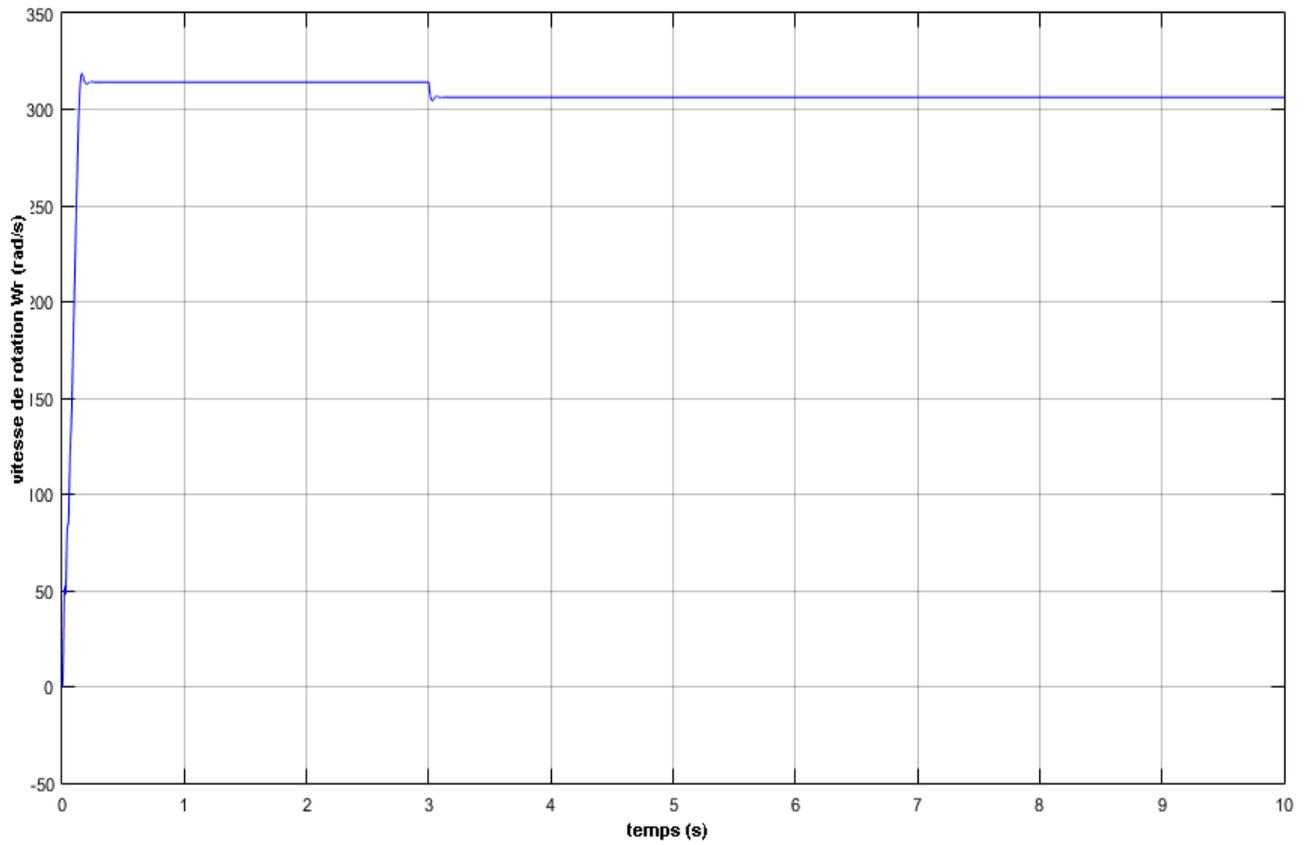


Fig.IV.1. Modèle de la machine asynchrone sous Matlab Simulink

# Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

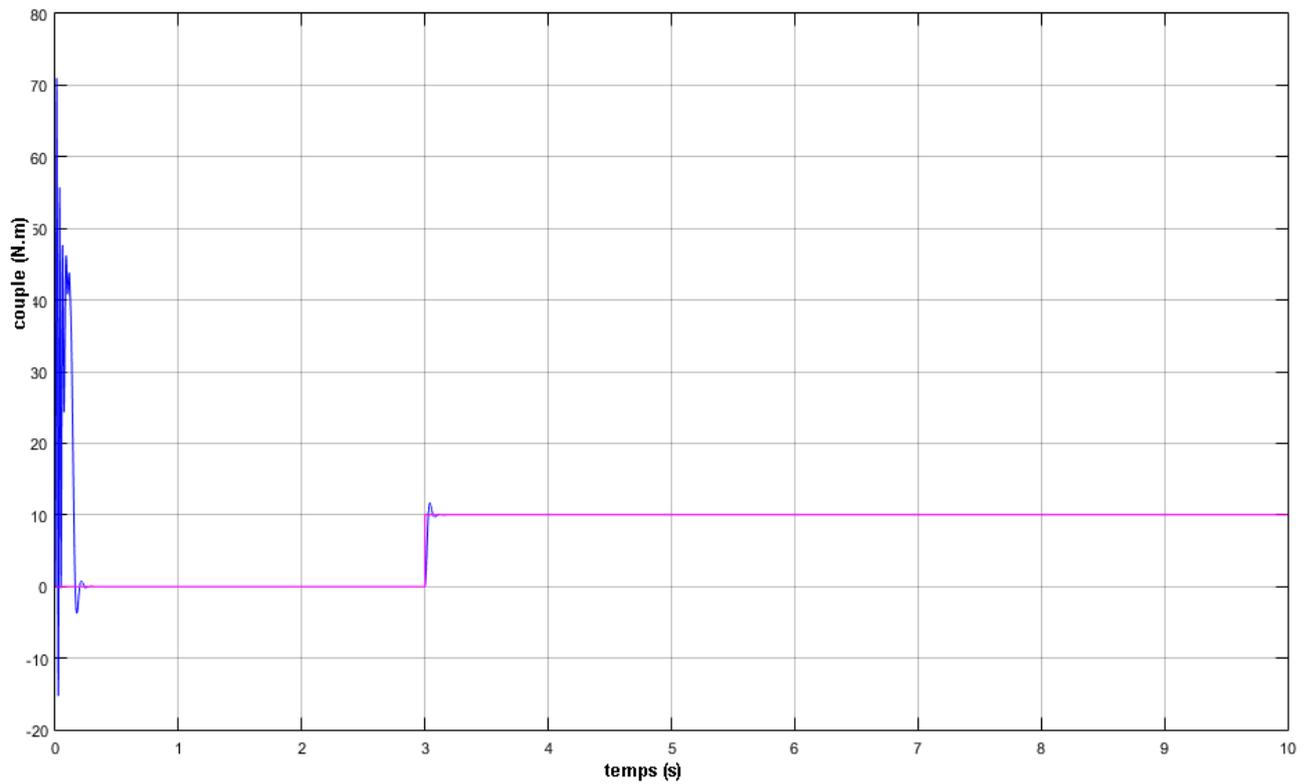
## IV.2.1 Résultats de la simulation de la machine asynchrone :

Pour une charge  $C_r = 10 \text{ N.m}$  appliquée à  $t = 3 \text{ s}$  on a pu obtenir les courbes suivantes :

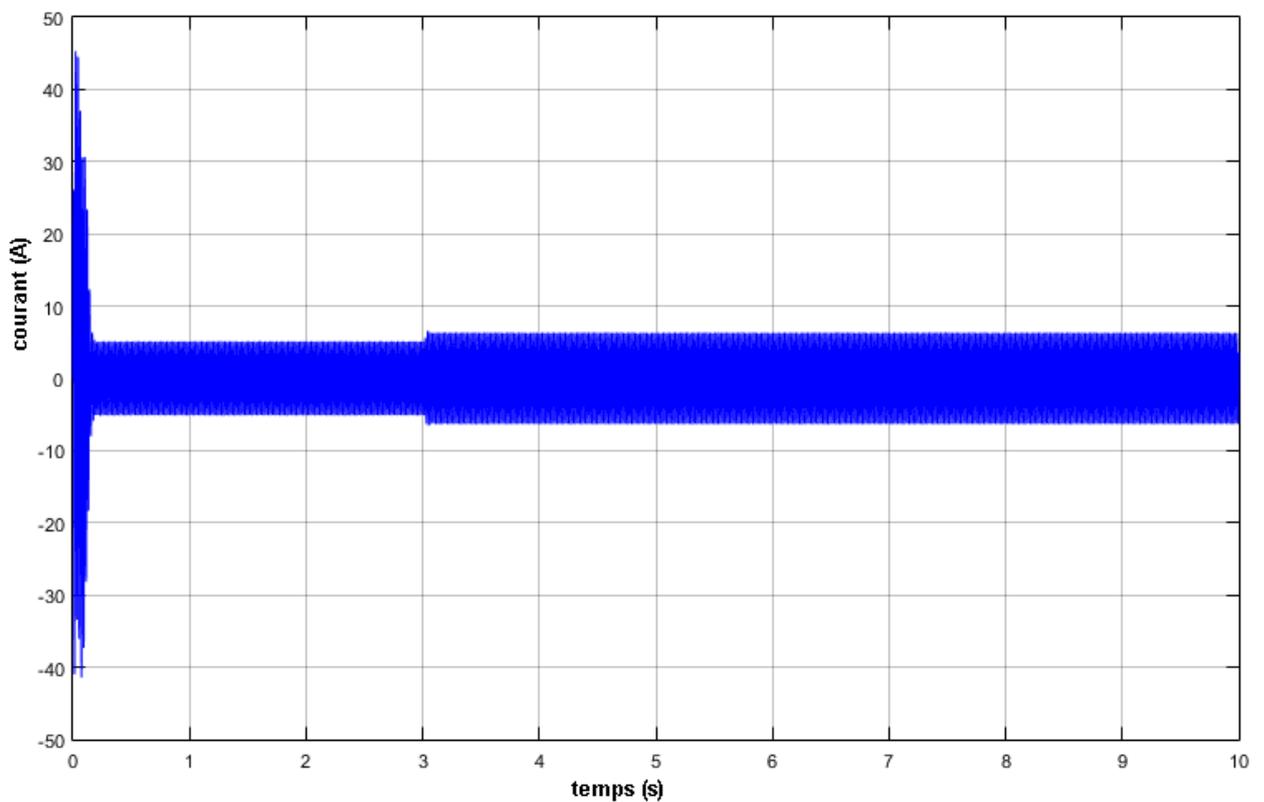


**Fig.IV.2.** Courbe caractéristique de la vitesse de rotation

## Chapitre IV : Simulation de la chaine de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats



**Fig.IV.3.** Courbe caractéristique des couples ( $C_{em}$ ,  $C_r$ )



**Fig.IV.4.** Courbe caractéristique du courant statorique dans une phase

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

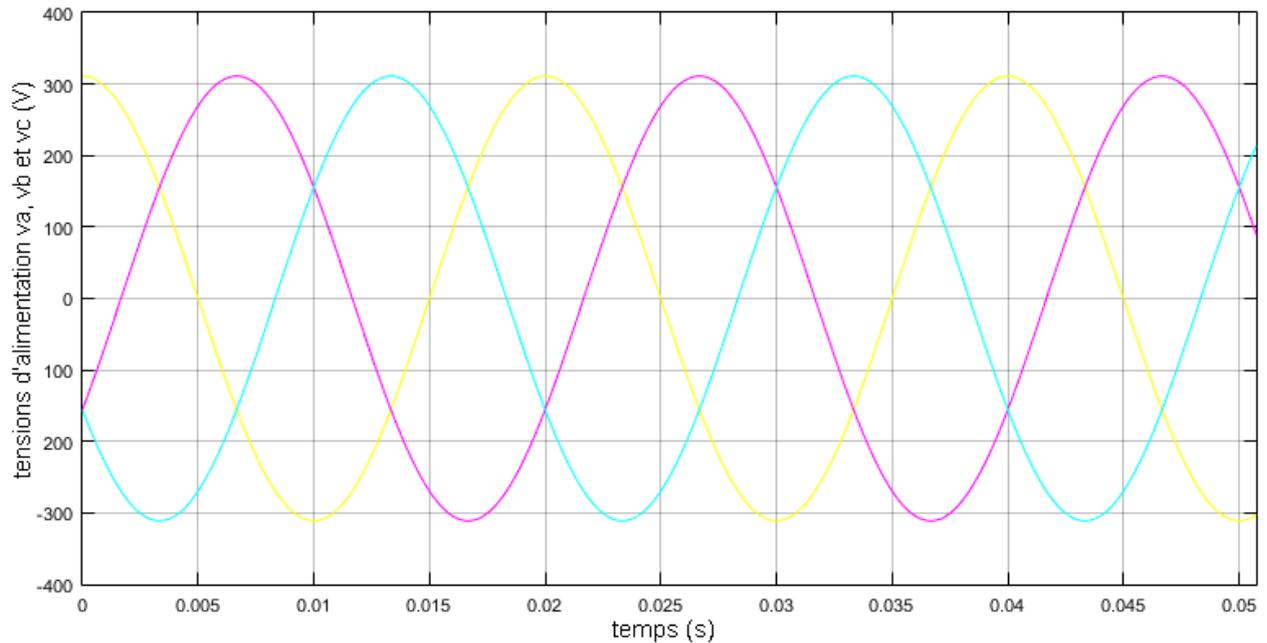


Fig.IV.5. Allures des tensions de la source d'alimentation

### IV.2.2. Interprétation des résultats de de la simulation de la machine asynchrone :

Avant  $t = 3s$  :

- Le courant statorique présente des oscillations importantes autour de zéro qui s'atténuent après de quelques alternances une fois le régime permanent atteint.
- La vitesse atteint une valeur proche du synchronisme après le régime transitoire, avec quelques oscillations au début du démarrage et un faible dépassement juste avant d'atteindre le régime permanent.
- Le couple électromagnétique présente des pulsations importantes au régime transitoire puis finit par s'annuler au moment où le régime permanent est atteint.

À  $t \geq 3s$  : à l'application du couple résistant  $C_r = 10 \text{ N.m}$  :

- Le couple électromagnétique augmente pour compenser le couple résistant et qui finit par se stabiliser à la même valeur que ce dernier.
- La vitesse rotorique diminue légèrement à cause du couple de charge.
- Le courant statorique quant à lui augmente selon la charge qu'on a appliqué à  $t = 3s$ .

## Chapitre IV : Simulation de la chaine de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

### IV.3. Simulation de la machine asynchrone alimentée en tension avec onduleur sous MATLAB Simulink :

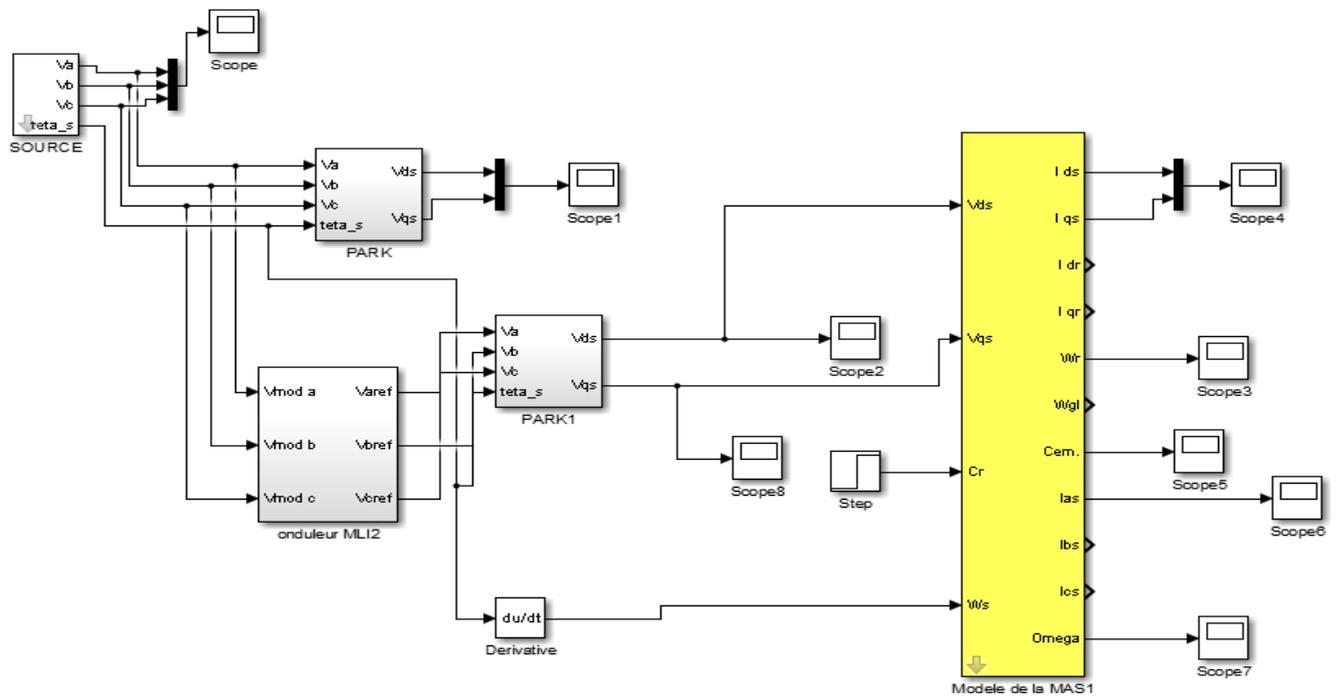
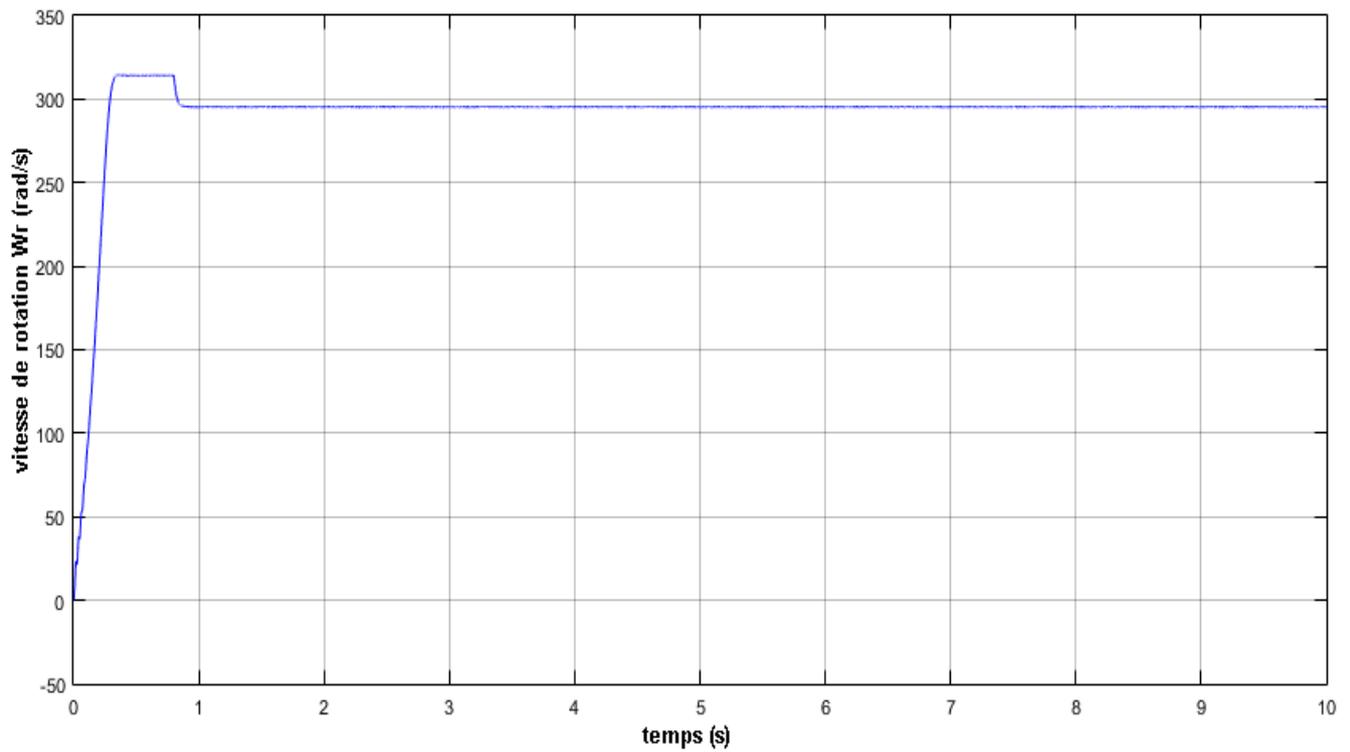


Fig.IV.6. Schéma du model de la machine asynchrone alimentée avec un onduleur

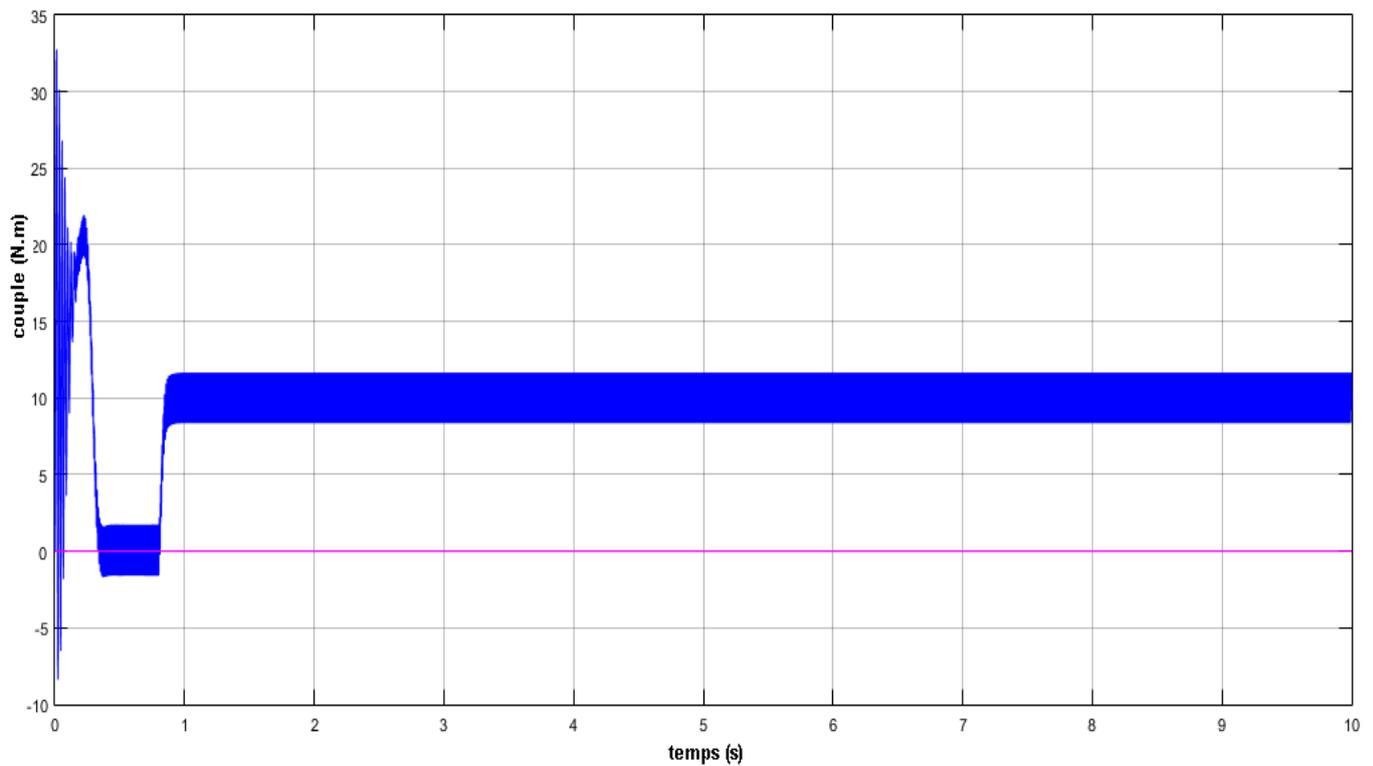
#### IV.3.1 Résultats de la simulation avec onduleur MLI :

Pour une fréquence de la porteuse de 1.25KHz et les mêmes paramètres de la machine asynchrone se trouvant dans l'annexe ainsi qu'en appliquant un couple résistant  $Cr=10N.m$  à  $t=0.8s$ , on obtient les résultats suivant :

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

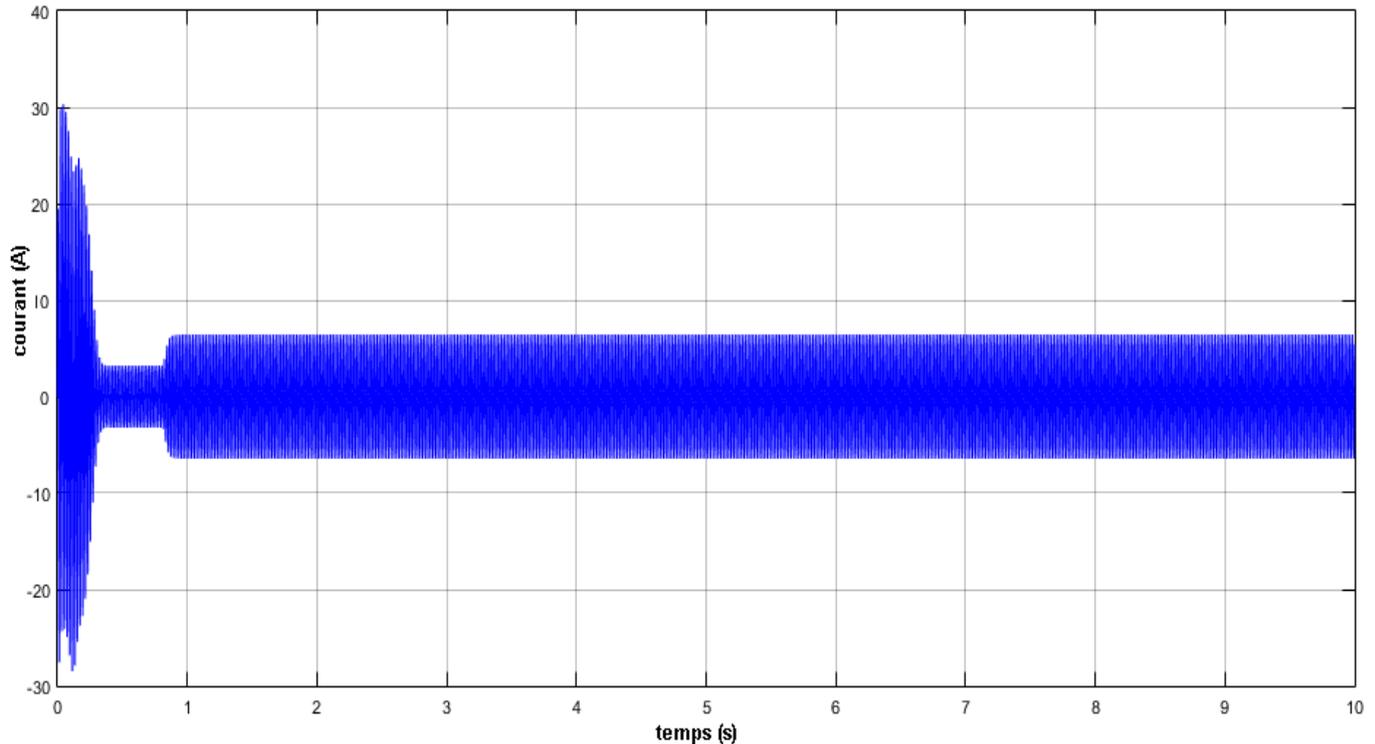


**Fig.IV.7.** Courbe caractéristique de la vitesse de rotation avec ondulateur



**Fig.IV.8.** Allure du couple  $C_{em}$  et du couple  $C_r$  avec ondulateur

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats



**Fig.IV.9.** Courbe caractéristique du courant statorique dans une phase après rajout de l'onduleur

### IV.2.2. Interprétation des résultats de de la simulation avec l'onduleur MLI :

**Avant  $t = 0.8s$  :**

- On remarque que le couple présente des oscillations pendant une durée de 2.5 s puis il tend vers zéro après le régime transitoire et maintient les ondulations.
- La vitesse se stabilise au régime permanent après 0.3 seconde à sa valeur nominale mais présente de légères ondulations.
- Le courant au démarrage présente une grande valeur au démarrage puis quand il tend vers zéro le régime permanent est atteint

**À  $t \geq 3s$  :** à l'application du couple résistant  $C_r = 10 \text{ N.m}$  :

- Le couple électromagnétique augmente pour compenser le couple résistant et finit par tendre vers la valeur du couple de charge appliqué.
- La vitesse rotorique diminue puis se stabilise à une valeur inférieure en maintenant toujours de légères ondulations.
- Le courant statorique augmente selon la charge imposée à  $t = 0.8s$

# Chapitre IV : Simulation de la chaine de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

## IV.4. Simulation de l'ensemble convertisseur-machine-quad sous MATLAB Simulink :

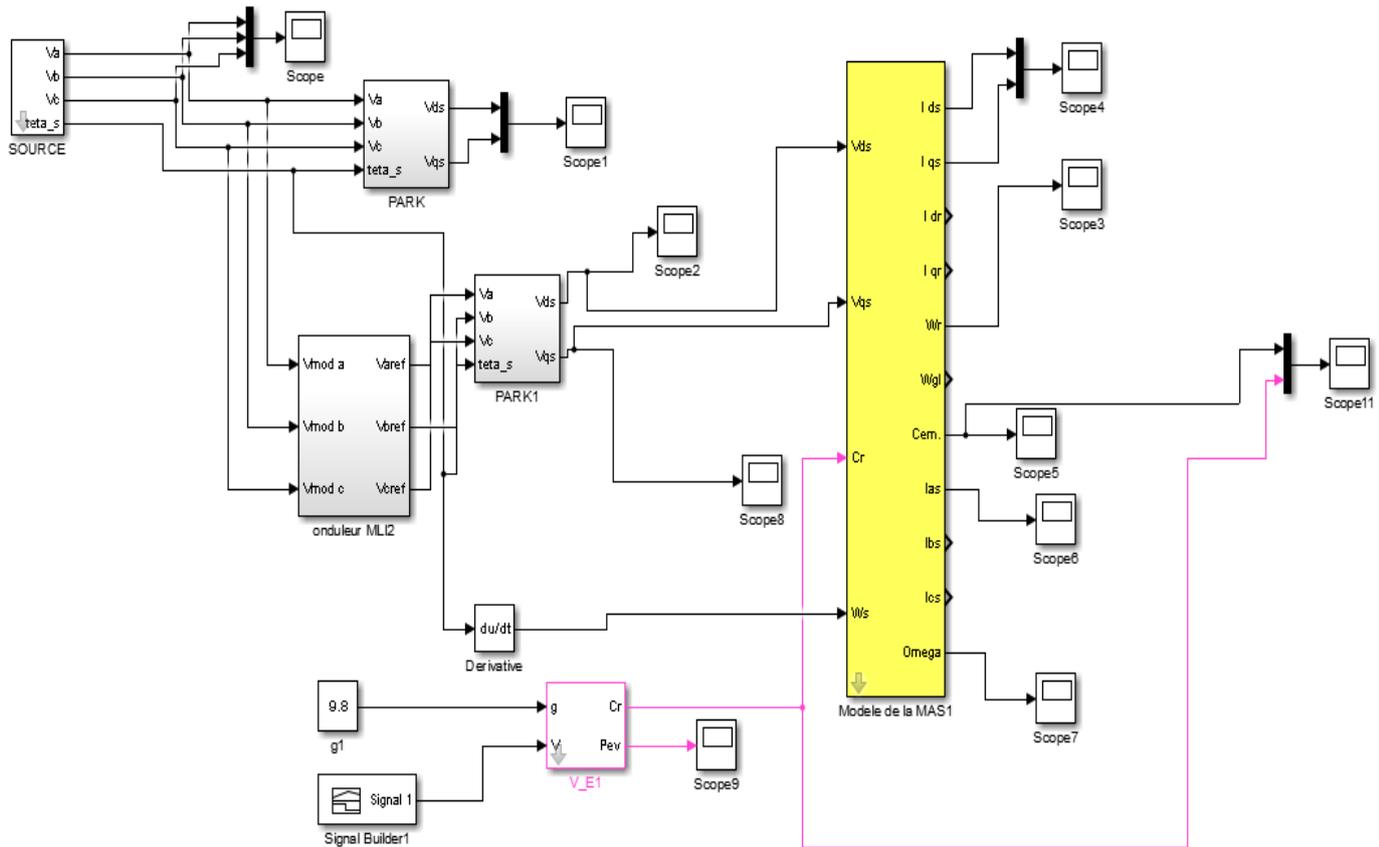
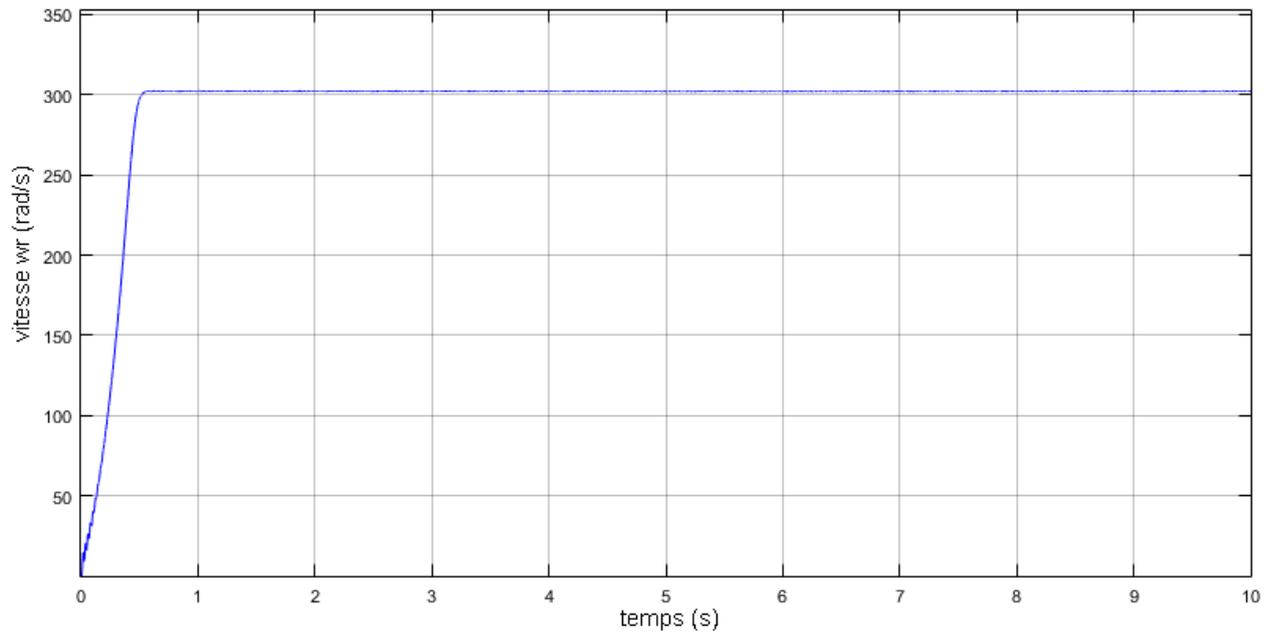


Fig.IV.10. Schéma du model de la chaine de traction du quad

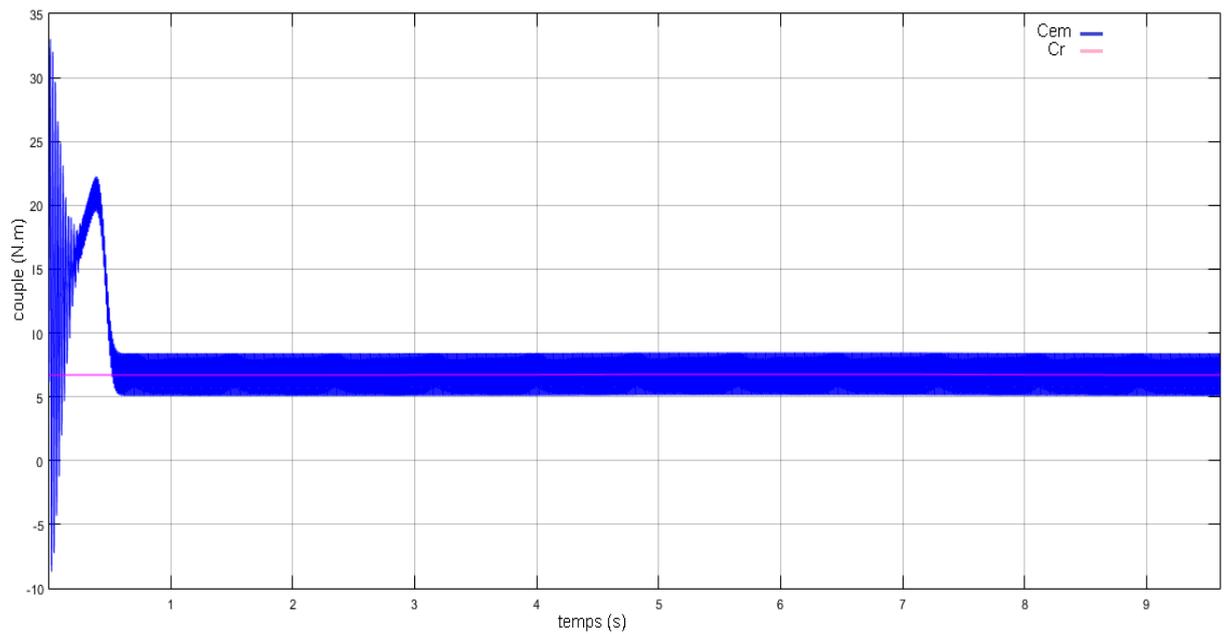
### IV.4.1. Résultats de la simulation de l'ensemble convertisseur-machine-véhicule :

A partir des paramètres de la machine asynchrone à cage d'écuriel et les paramètres du véhicule qui sont donnés dans l'annexe. Et pour une fréquence de 1.25KHz pour la porteuse. Et en appliquant le couple de charge qui est le couple mécanique du quad, on a obtenu les résultats suivants :

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

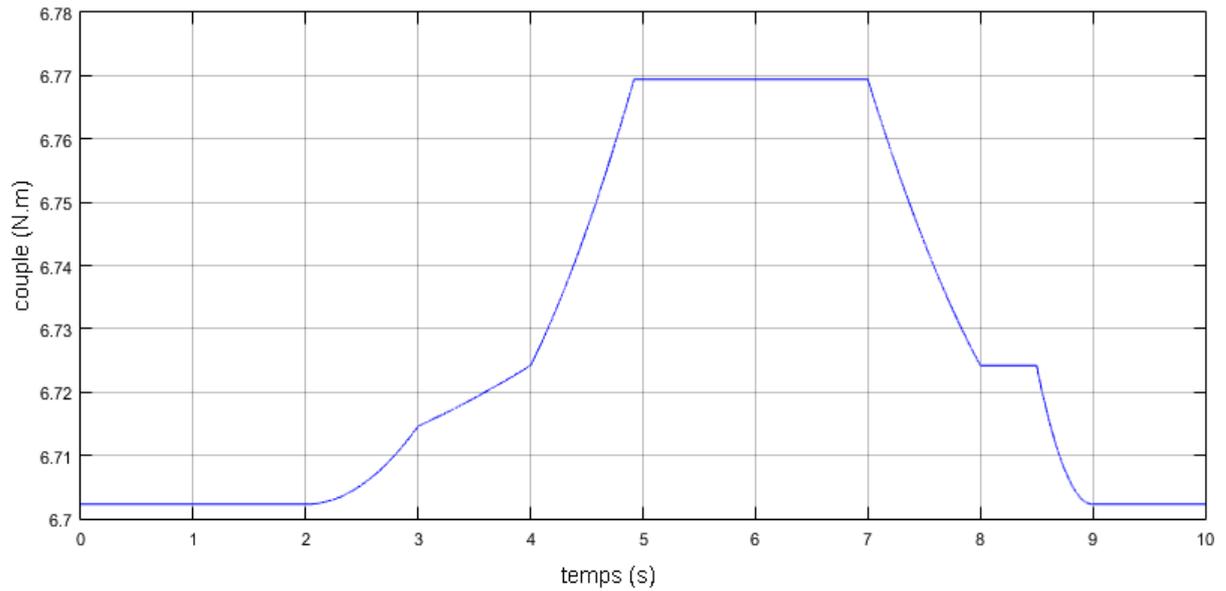


**Fig.IV.11.** Allure de la vitesse de rotation  $w_r$  de l'ensemble

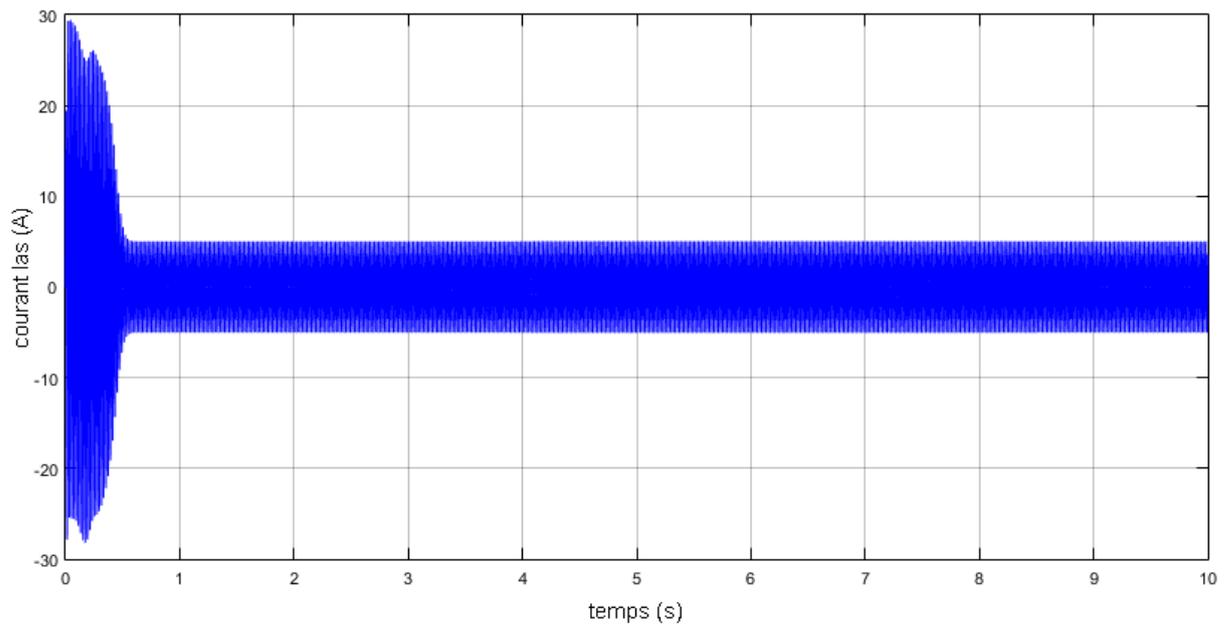


**Fig.IV.12.** Allure du couple  $C_{em}$  et du couple  $C_r$  de l'ensemble

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats



**Fig.IV.13.** Allure du couple  $C_r$  de l'ensemble



**Fig.IV.14.** Courbe caractéristique du courant statorique de l'ensemble

## Chapitre IV : Simulation de la chaîne de traction du véhicule tout terrain et interprétation des résultats

### IV.4.2. Interprétation des résultats :

- L'allure du couple électromagnétique suit l'allure du couple de charge du quad avec des ondulations due à l'onduleur MLI.
- La vitesse atteint le régime permanent après 0.5s et se stabilise à la valeur de 302rad/s, mais qui en réalité varie selon les valeurs du couple de charge elle diminue lorsque celui-ci augmente et inversement.
- Le courant varie selon le couple de charge avec une plage très petite due à la plage de variation du couple, qui dans notre cas est si petite, qu'on ne remarque pas la variation du courant.

### IV.5. Conclusion :

Après avoir exposé les schémas utilisés pour réaliser les différentes modélisations des éléments constituant la chaîne de traction du véhicule tout-terrain, et observé les résultats obtenus, nous avons pu arriver à plusieurs conclusions.

D'abord les résultats obtenus par la simulation de la machine asynchrone à cage d'écurueil ont montré la validité du modèle de *Park* de la machine.

Ensuite nous avons rajouté un onduleur de tension commandé par MLI pour mettre en évidence les impacts de ce convertisseur.

Enfin nous avons ajouté le quad pour compléter la chaîne de traction, et la simulation de celle-ci a permis de voir, grâce aux résultats, que le couple de charge issu du quad est bien supporté par la machine asynchrone utilisée.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Dans le travail que nous avons effectué, nous avons appliqué les connaissances acquises durant nos études universitaires, en présentant une étude d'un système de traction électrique permettant l'électrification du quad, afin d'encourager l'électrification des groupes motopropulseur, d'un côté pour bénéficier des hautes performances qu'ils ont à offrir, et de l'autre pour faire face aux problèmes environnementaux qui nous menacent dans un futur proche.

Dans le premier chapitre, nous avons d'abord brièvement vu l'évolution des machines, des véhicules électriques, ainsi que le quad à travers le temps. Puis les structures générales de ces deux derniers.

Dans le deuxième chapitre, nous avons réalisé un état d'art sur les machines électriques tournantes, puis choisis la machine asynchrone à cage d'écureuil pour tous les avantages qu'elle avait à offrir.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié l'ensemble machine asynchrone, convertisseur statique et quad, en optant pour une alimentation de la machine asynchrone par onduleur commandé en MLI, et réalisé la modélisation de cet ensemble.

Le quatrième et dernier chapitre a permis de simuler l'ensemble des éléments de la chaîne de traction électrique en exploitant le logiciel Matlab-Simulink et d'obtenir des résultats qui ont grâce à la modélisation que nous avons effectuée dans le chapitre précédent, et l'observation des différentes allures a permis d'encore mieux comprendre le fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de traction.

Pour finir, dans le but d'améliorer les performances du quad électrique, nous recommandons de considérer les perspectives suivantes :

- Minimiser et réduire les ondulations des variables dues à la fréquence des interrupteurs de l'onduleur MLI en exploitant des techniques de commande plus avancées tel que la commande directe du couple.
- Intégrer une boucle de régulation afin de supprimer les chutes de vitesse à l'application d'une charge.
- Réaliser un banc expérimental permettant de valider cette chaîne de traction.

# **Annexe**

## Annexes

### Les paramètres de la Machine asynchrone triphasée [52]

| Paramètres                         | Symboles  | Valeurs                   |
|------------------------------------|-----------|---------------------------|
| Puissance                          | $P_u$     | 3kW                       |
| Nombre de paire de pole            | $P$       | 2                         |
| Résistance Statorique              | $R_s$     | 1.76Ω                     |
| Résistance Rotorique               | $R_r$     | 1.95Ω                     |
| Inductance Mutuelle                | $M$       | 0.183H                    |
| Inductance Statorique et Rotorique | $L_s=L_r$ | 0.194H                    |
| Moment Inertie                     | $J$       | 0.02 kg.m <sup>2</sup>    |
| Frottement                         | $f$       | 0.0001 N.m.s <sup>2</sup> |

### Les paramètres du Véhicule Electrique [14]

| Caractéristique                                | Spécification       |
|--|---------------------|
| $\mu$ - coefficient de résistance au roulement | 0.045               |
| $C_d$ - coefficient de trainée aérodynamique   | 0.72                |
| $A$ - surface frontale du véhicule             | 1.75 m <sup>2</sup> |
| $m$ - masse du véhicule                        | 400kg               |
| $r_w$ - le rayon effectif de la roue           | 0.3175              |
| $i$ - Le gain réducteur                        | 20                  |

# **Bibliographie**

## Bibliographie

[1] <https://www.motosport.com/blog/fun-facts-atv-history>

[2] Boucha ABDELLAH, Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué, Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. 19 octobre 2015.

[3] Dr.-Ing. Martin Doppelbauer. The invention of the electric motor 1800-1854. 25 Septembre ,2014.

<http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20vont%20bevezhez/History%20-%20The%20invention%20of%20the%20electric%20motor%201800-1854.html>

[4] Jean-Daniel Chatelain, J.-D. C. (1989). Généralités sur les machines électriques. In *Machines électriques* (Lausanne : Presses polytechniques romandes, ©1989 éd., Vol. 10, p. (4-6). Lausanne, Suisse : Lausanne : Presses polytechniques romandes, ©1989.  
<https://doi.org/https://books.google.fr/books?id=y4AODQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>

[5] <https://edisontechcenter.org/ElectricCars.html#top>

Porsche, General Electric Company Hawkins Electrical Guide, Tesla Motor Company, Hybrid Vehicle.org, Schenectady Museum)

[6] <http://www.sigma-tec.fr/elec/avantages-vehicule-electrique.html>

[7] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients>

[8] <https://www.g2mobility.com/advantages-of-electric-vehicles/?lang=en>

[9] S. Meziani, A. Bourenane, Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.

[10] IFP Energies nouvelles, « Le marché des véhicules urbains dans le monde », 23 mars 2015

[11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Quad\\_\(véhicule\)#cite\\_note-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Quad_(véhicule)#cite_note-1)

[12] Adam R. Chevretil, A. C. (2008). *Modeling and Design of an Electric All-Terrain Vehicle*.

## Bibliographie

- [13] <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/activites-sportives-mini-motos-et-quads>
- [14] Adam R. Chevretil. (2008). *Modeling and Design of an Electric All-Terrain Vehicle*. Master of science. Faculty of Graduate Studies of the University of Manitoba.
- [15] Mohamad Koteich. Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique. Automatique / Robotique. Université Paris-Saclay, 2016. Français. NNT : 2016SACL043. tel-01320377v2:<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01320377v2>
- [16] 9-mcc.odt
- [17] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu> , 25 septembre, 2007
- [18] <http://www.moteur-industrie.com/moteurs-a-courant-continu.html>
- [19] Sang-Hoon Kim, S.-H. K. (2017). Fundamentals of electric motors. Dans *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors* (1st éd., p. 5-6). <https://www.elsevier.com/books/electric-motor-control/kim/978-0-12-812138-2>
- [20] Shade, S. K. (2017). *Electrical Machines*. Cambridge University Press (p.501-509).
- [21] Énergie<sup>+</sup>, Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be>
- [22] Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix, Jacques Vaillant et Daniel Verkindère. MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE. Édition Dunod, Paris, 2006
- [23] Ragot, P. Modélisation analytique multiphysique pour la conception optimale de moteurs synchrones à aimants permanents. Infoscience, 7 juillet, 2020 <https://infoscience.epfl.ch/record/125692/?ln=fr>
- [24] H. Benariba, *Contribution à la commande d'un véhicule électrique*, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.
- [25] D. A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Maximising the saliency ratio of The synchronous reluctance motor," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 140, pt. B, no. 4, pp. 249-259, 1993.

## Bibliographie

- [26] Thierry LUBIN, T. L. (2003, avril). Modélisation et commande de la machine synchrone à réluctance variable. Prise en compte de la saturation magnétique.  
<https://www.researchgate.net/publication/324494455>
- [27] Ilarion Pavel, « L'invention du moteur synchrone par Nikola Tesla », *Bibnum* [Online], Sciences de l'ingénieur, Online since 07 January 2013, connection on 09 July 2020.  
URL :<http://journals.openedition.org/bibnum/907>
- [28] <https://www.motac.fr/blog/2018/02/16/moteur-synchrone-et-asynchrone-quelles-differences#:~:text=Avantage%20et%20inconvc3%A9nients%20des%20moteurs%20synchrone%20et%20asynchrones&text=Sur%20les%20moteurs%20asynchrones%2C%20le,de%20la%20vitesse%20de%20rotation.16> février, 2018.
- [29] Djedjai Djedid. « Etude et modélisation du moteur asynchrone à double cage » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.2016.
- [30] Abla Bouguerne. « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones » Université Mentouri Constantine 2009.
- [31] Mohamad KOTEICH. Thèse de doctorat « Modélisation et Observabilité des Machines Électriques en vue de la commande sans capteur mécanique » Université Paris-Saclay.2016
- [32] Radouane BOUSSEKSOU. Thème « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic » Université Mentouri Constantine 2007.
- [33] TaibiMebarek. Thème « Dimensionnement et Simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.2016.
- [34] [fre.mentorbizlist.com](https://fre.mentorbizlist.com). Circuit de contrôle du moteur. Moteurs asynchrones triphasés avec rotor à cage d'écureuil.  
<https://fre.mentorbizlist.com/4073126-engine-control-circuit-three-phase-asynchronous-motors-with-a-squirrel-cage-rotor-post-button#menu-9>
- [35] Caron, J. P., & Hautier, J. P. (1995). Modélisation et commande de la machine asynchrone. Editions Technip.
- [36] FRANCK M. Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la Commande des machines asynchrones, Thèse EEA, Lyon, INSA de Lyon, 2005. 188 p.

## Bibliographie

- [37] I. HIMDI, “Observation et Commande de Moteurs Asynchrones”, Projet personnel, ENSICAEN, Caen, France, 2009.
- [38] GRELET G. CLERC. Actionneurs électriques, principes modèles commande, Editions Eyrolles, 1997, 491 p. ISBN 2-212-09352-
- [39] Baghli, L., «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques», Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, janvier 1999:  
[http://baghli.com/dl/these\\_baghli.pdf](http://baghli.com/dl/these_baghli.pdf)
- [40] L. BAGHLI, “Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone”, Cours personnel, IUFM de Lorraine-UHP, France, 2005.
- [41] B. K. Bose, “Modern Power Electronics and AC Drives”, Chapitre 8, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [42] Mohan N., « Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling using Simulink », MNPERE, 2001
- [43] BoussekraFaiza\_ Thème mémoire « La commande non linéaire à régime glissant de la MSAP » Université de BATNA 2011.
- [44] MARIF Ismai\_ Thème mémoire « La commande en vitesse d'un véhicule électrique » Université de Tlemcen 2019.
- [45] KORICHI Ahmed\_ Thème mémoire « Commande DTC-SVM Prédictive D'un Moteur Asynchrone A Cage Sans Capteur Mécanique » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2013.
- [46] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur#Onduleurs\\_Triphas%C3%A9s](https://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur#Onduleurs_Triphas%C3%A9s)
- [47] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Porteuse>
- [48] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_de\\_largeur\\_d%27impulsion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d%27impulsion)
- [49] Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes Année 2004 « Etude et conception d'un onduleur modulaire exploitant une structure multi-convertisseurs pour obtenir une haute dynamique »
- [50] Mémoire présenté à l'université du Québec à trois rivières par Souheil Slim « Synthèse d'une nouvelle structure d'onduleur monophasé à bras résonnant : procédure de conception optimale et évaluation des performances » avril 1991.

## Bibliographie

**[51]** Mokrani Zahra, Ben Boudaoud Mourad, « Alimentation d'une machine asynchrone par onduleur MLI en utilisant la carte Dspace 1104 », mémoire de master II en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia

## Résumé

L'électrification des véhicules à combustion interne, est l'une des solutions considérée pour faire face à la menace que représente la pollution qu'ils engendrent, et dont le véhicules tout terrain qui est le quad conventionnel ne fait pas exception.

Ce travail consiste à convertir le quad conventionnel en quad électrique grâce à l'étude, la modélisation et la réalisation une chaîne de traction électrique composée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil alimentée par un onduleur commandé en MLI et du model du véhicule tout terrain qui est le quad. Cela s'est fait grâce à l'environnement Matlab-Simulink qui a permis l'observation et l'interprétation des différents résultats caractérisant les éléments de la chaîne.

## Abstract

The electrification of internal combustion vehicles, is one of the solutions being considered to face the threat that the pollution they generate represents, and of which conventional all-terrain vehicles (quads) are no exception.

This work consists on converting the conventional all-terrain vehicle to an electric quad, by studying, modelling and making an electric traction chain based on an asynchronous machine, powered by a PWM inverter and the electric all-terrain vehicle's model. This was done by using the Matlab-Simulink environment, which allowed to do all the observations and interpretations of the different results characterizing the elements of the chain.