

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUAT



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT : Électrotechnique

OPTION : Électromécanique

## Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique*

Présenté par

**HOUICHITI AYMEN**

**ZAKHROUF ABDERRAHMEN**

Thème

---

# *Optimisation de la commande sans capteur d'un MSAP pour un véhicule électrique*

---

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. Boutoubat Mohamed

Pr

Examineur

Mr. Hadjadj Abdechafik

MCA

Président

Mr. Bendjedia Bachir

MCB

Encadreur

Année Universitaire 2022 / 2023

# Remerciements

Avant tout nous remercierons Dieu le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous remercierons vivement notre encadreur, **Mr Bendjedia Bachir**, d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé. Sa disponibilité, ses encouragements durant toutes les phases de l'étude et ses conseils nous ont beaucoup soutenus tout le long de ce travail, qu'il trouve ici notre plus grande reconnaissance.

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres et personnels de laboratoire de recherche.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos reconnaissances envers les membres du jury, dont la renommée et la qualité scientifique honore grandement ce travail :

Monsieur **Boutoubat Mohamed**, qui a bien accepté de présider le Jury de ce mémoire,

Monsieur **Hadjadj Abdechafik**, pour nous avoir fait l'honneur d'être examinateur de ce travail.

# *Dédicace*

*En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce  
Travail avec une grande fierté.*

*À mes parents qui ont été d'un dévouement  
Exemplaire et d'un réconfort inestimable.*

*À mes frères, et toute ma famille  
En reconnaissance de leurs encouragements.*

*A tous mes amis pour leur sympathie, leur humeur  
Et leur solidarité envers moi.*

*Veillez, tous, accepter mes hautes salutations  
Et Considérations.*

*Que Dieu puisse vous protéger.*

*Houichiti Aymen*

## *Dédicace*

Je dédie ce travail :

À ma chère mère et mon cher père,

À mes chers frères et sœur,

À toute ma famille,

À tous mes amis,

À toutes les enseignantes de département d'Électrotechnique

**ZAKHROUF Abderrahmen**

# Résumé

## ملخص

في هذا العمل، نحن مهتمون بتحسين أداء سلسلة سحب السيارة الكهربائية في حالة خلل في مستشعر السرعة، الجزء الأول مكرس لدراسة وكشف العيوب التي تستهدف سلسلة الجر، أما الجزء الثاني فقد كُرس لتطبيق التحكم في السرعة مع امتداد المرشح، من خلال ما يلي، قمنا بتطبيق تقنيتين للتحسين (GA، PSO) لتحسين أداء التحكم في السرعة باستخدام EKF. أخيراً، سمح لنا استخدام النموذج الديناميكي لمركبة حقيقية (سيارة زرقاء) مع دورة قيادة NEDC باختبار أداء السلسلة الجر. **الكلمات المفتاحية:** سلسلة الجر; مستشعر السرعة; المرشح كالمان; تقنية التحسين (PSO,GA) سيارة الكهربائية.

## Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse pour améliorer les performances de la chaîne de traction d'un véhicule électrique dans l'état de défaut de capteur de vitesse, la première partie a été consacrée à étude de la chaîne de traction et leurs défauts, la deuxième partie a été consacrée à l'application de commande de vitesse avec le filtre de kalman étendu, par la suite nous avons appliqué deux techniques d'optimisation (PSO, GA) pour améliorer la performance de contrôle de vitesse avec EKF. Finalement, l'utilisation du modèle dynamique d'un véhicule réel (Blue car) avec le cycle de conduite NEDC nous a permis de tester les performances de la chaîne de traction.

**Mots Clés :** Chaîne de traction ; Capteur de vitesse ; Filtre de Kalman étendu ; Techniques d'optimisation (PSO, GA), Véhicule électrique.

## Abstract

In this work, we are interested in improving the performance of the drive train of an electric vehicle in the state of speed sensor fault, the first part was devoted to the study and detection of faults that target the drive train, the second part was devoted to the application of speed control with the extended Kalman filter, then we applied two optimization techniques (PSO, GA) to improve the performance of speed control with EKF. Finally, the use of a dynamic model of a real vehicle (blue car) with the NEDC driving cycle enabled us to test the performance of the traction chain.

**Keywords:** Speed sensor; Extended Kalman filter; Optimization techniques (PSO, GA), Electric vehicle.

## Notations

VE : véhicule électrique

CDT : Chaîne de traction

CVE : Chaîne de traction du véhicule électrique

MCI : moteur à combustion interne

VH : véhicule hybride

CC : courant continue

CA : courant alternative

MCC : moteur à courant continue

MRV : moteur à reluctance variable

MA : moteur asynchrone

MSAP : moteur synchrone à aimant permanent

TAD : la tolérance aux défauts

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

FTC : Fault Tolerant control (Contrôle Tolérant aux Défaut)

$C_{em}$  : couple électromagnétique

$L_d$  : l'induction direct

$L_q$  : l'induction quadratureur

$\varphi_f$  : Flux de l'aimant magnétique

$I_d, I_q$  : les courant direct et quadratureur

$K_p$  : Gain du régulateur proportionnel

$K_i$  : Gain du régulateur intégrateur

CV : commande vectorielle

FKE : filtre de kalman étende

Q : matrice de bruits d'état

R : matrice de bruits de mesure

PI : Les régulateurs classiques

OEP : L'optimisation par Essaim de Particules

GA : Génétique Algorithme

IAE : Intégrale de la valeur absolue de l'erreur

ISE : Intégrale du carré de l'erreur

ITAE : Intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps

ITSE : Intégrale du carré de l'erreur pondérée par le temps

ISE : Intégrale du carré de l'erreur

NEDC: New European Driving Cycle

EUDC: Extra urban drive cycle

UDC: Urban drive cycle

FUDS: Federal Urban Driving Schedule

FTP : Federal Test Procedure

$V_{ref}$  : La Vitesse de référence

# Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les chaînes de traction et leurs défauts</b>	
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Définition et historique .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 Définition de véhicule électrique (VE).....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2 Historique du véhicule électrique (VE) .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 La Chain de traction (VE) .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1 Description de la chaîne de traction électrique .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.2 Véhicules entièrement électriques.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4 Architecture de la chaîne de traction du véhicule électrique .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1 Solution avec boîte de vitesse mécanique .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.2 Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.3 Solution multi-moteurs .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4.4 Structure de la chaîne de traction d'un véhicule électrique .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5 Choix d'architecture .....</b>	<b>11</b>
<b>I.6 Différents moteurs utilisés .....</b>	<b>11</b>
<b>I.7 Classification des moteurs électriques .....</b>	<b>12</b>
<b>I.8 Choix de motorisation .....</b>	<b>13</b>
<b>I.9 Source d'énergie .....</b>	<b>13</b>
<b>I.9.1 Définitions de la batterie.....</b>	<b>14</b>
<b>I.10 Différentes technologies des convertisseurs .....</b>	<b>14</b>
<b>I.10.1 Les onduleurs .....</b>	<b>15</b>
<b>I.11 Avantages et inconvénient des VE .....</b>	<b>16</b>
<b>I.11.1 Avantages du VE .....</b>	<b>16</b>
<b>I.11.2 Les inconvénients du VE.....</b>	<b>16</b>
<b>I.12 Détection de défauts sur la chaîne de traction d'un véhicule électrique .....</b>	<b>17</b>
<b>I.12.1 Classification des défauts .....</b>	<b>17</b>
<b>I.13 Concepts généraux d'un défaut.....</b>	<b>21</b>
<b>I.13.1 Contrôle actif à tolérance de pannes.....</b>	<b>21</b>
<b>I.14 Conclusion.....</b>	<b>23</b>

## Chapitre II : *Commande vectorielle sans capteur de vitesse du MSAP*

II.1	Introduction .....	23
II.2	Commande vectorielle du MSAP .....	23
II.2.1	Description du système global .....	24
II.2.2	Le modèle de la MSAP .....	25
II.2.3	Découplage .....	25
II.2.4	Calculs des régulateurs .....	26
II.3	Les observateurs .....	27
II.3.1	Principe de fonctionnement de l'observateur .....	27
II.3.2	Classification des observateurs .....	28
II.3.2.1	Observateurs pour les systèmes linéaires .....	28
II.3.2.2	Observateurs pour les systèmes non linéaires.....	28
II.4	Filtre de Kalman étendu (FKE) .....	29
II.4.1	La stratégie de réglage des matrices de covariance Q et R.....	30
II.5	Application du EKF à l'estimation de la vitesse de la MSAP .....	31
II.5.1	Le modèle de la MSAP .....	31
II.5.2	L'algorithme de EKF .....	32
II.6	Simulation de la commande avec et sans capteur de vitesse du MSAP .....	33
II.6.1	Résultats de simulation .....	33
II.6.2	Interprétation des Résultats .....	35
II.7	Conclusion.....	36

## Chapitre III : *Les algorithmes d'optimisation*

III.1	Introduction .....	37
III.2	Principe de l'optimisation .....	37
III.3	Classification des méthodes d'optimisations .....	38
III.3.1	Méthodes d'optimisation déterministes .....	38
III.3.2	Méthodes d'optimisation stochastiques .....	39
III.4	La méthode d'optimisation PSO .....	39
III.4.1	Introduction .....	39
III.4.2	Définition de la méthode .....	41
III.4.3	Formalisation mathématique .....	42
III.4.4	Configuration de la méthode .....	42
III.5	Algorithmes génétiques .....	46
III.5.1	Introduction .....	46

III.5.2	Principe de fonctionnement .....	46
III.5.2.1	Principales caractéristiques .....	47
III.5.3	Domaines d'applications .....	47
III.6	L'optimisation de système de la commande sans capteur de vitesse .....	49
III.6.1	Critères de performance .....	49
III.6.1.1	Intégrale de la valeur absolue de l'erreur (IAE) .....	49
III.6.1.2	Intégrale du carré de l'erreur (ISE).....	49
III.6.1.3	Intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps (ITAE) .....	49
III.6.1.4	Intégrale du carré de l'erreur pondérée par le temps (ITSE) .....	49
III.6.2	L'optimisation des gains des régulateurs de la commande.....	50
III.6.3	Optimisation de la conception de algorithmes EKF.....	51
III.6.3.1	Les variables de conception .....	51
III.6.3.2	La fonction d'objective.....	51
III.6.4	L'algorithme d'optimisation.....	52
III.7	Résultats de simulation .....	52
III.7.1	Interprétation des résultats .....	56
III.8	Étude comparative entre PSO et GA.....	56
III.8.1	Interprétation des résultats .....	57
III.9	Conclusion.....	58
 <b>Chapitre IV : Application à un vehicule électrique avec un cycle de conduit</b>		
IV.1	Introduction .....	59
IV.2	Cycle de conduite.....	59
IV.2.1	Modèle dynamique du véhicule.....	62
IV.3	Partie de la Simulation.....	65
IV.3.1	Simulation du modèle dynamique.....	65
IV.3.1.1	Schéma bloc.....	65
IV.3.1.2	Résultat de la simulation des consignes de couple, de vitesse et de puissance....	66
IV.3.2	Application du cycle de conduite à la CDT avec les techniques de commande vectorielle sans capteur (t=120s).....	67
IV.4	Interprétation.....	68
IV.5	Conclusion.....	70
Conclusion générale .....		71
Références bibliographiques.....		73

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Différentes émissions de gaz à effet de serre	<b>Page 3</b>
<b>Figure I.2</b>	Schéma simplifié d'un véhicule électrique	<b>Page 4</b>
<b>Figure I.3</b>	Schéma interne d'une voiture électrique	<b>Page 5</b>
<b>Figure I.4</b>	Une image montrant les étapes de développement des véhicules électriques VE	<b>Page 6</b>
<b>Figure I.5</b>	La différence entre les composants de chaîne de traction VE et véhicule thermique	<b>Page 7</b>
<b>Figure I.6</b>	Schéma de fonctionnement d'un système de traction électrique	<b>Page 8</b>
<b>Figure I.7</b>	Solution monomoteur : avec boîte de vitesse (à gauche), avec réducteur (à droite)	<b>Page 9</b>
<b>Figure I.8</b>	Solution multi-moteurs	<b>Page 10</b>
<b>Figure I.9</b>	Structure de la chaîne de traction dans un VE	<b>Page 11</b>
<b>Figure I.10</b>	Classification des moteurs électriques VE	<b>Page 12</b>
<b>Figure I.11</b>	Technologie de batterie de voiture électrique.	<b>Page 14</b>
<b>Figure I.12</b>	Onduleur à deux niveaux	<b>Page 15</b>
<b>Figure I. 13</b>	Tension de sortie entre phases pour un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	<b>Page 16</b>
<b>Figure I .14</b>	Différentes localisations de défaut d'un processus	<b>Page 17</b>
<b>Figure I .15</b>	Les différents types de défaut, de gauche à droite : continu, discontinu et graduel	<b>Page 17</b>
<b>Figure I .16</b>	Classification des défauts d'un véhicule électrique	<b>Page 18</b>
<b>Figure I .17</b>	Répartition des défauts moteurs	<b>Page 20</b>
<b>Figure I .18</b>	Défaut bit11 d'un codeur absolu d'une MSAP	<b>Page 21</b>
<b>Figure I .19</b>	Schéma de principe d'une loi de commande FTC active	<b>Page 22</b>

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Schéma du principe de découplage pour la MSAP par analogie avec la MCC	<b>Page 24</b>
<b>Figure II.2</b>	Schéma bloc de la commande vectorielle de la MSAP	<b>Page 25</b>
<b>Figure II.3</b>	Le couplage entre les axes d et q	<b>Page 26</b>
<b>Figure II.4</b>	Boucle de régulation de courant $I_d$	<b>Page 26</b>
<b>Figure II.5</b>	Boucle de régulation du courant $I_q$	<b>Page 27</b>
<b>Figure II.6</b>	Boucle de régulation du la vitesse $\Omega$	<b>Page 27</b>
<b>Figure II.7</b>	Schéma fonctionnel d'un observateur d'état	<b>Page 28</b>
<b>Figure II.8</b>	Boucle du filtre de Kalman étendu.	<b>Page 30</b>
<b>Figure II.9</b>	Application de EKF pour l'estimation de la vitesse de MSAP	<b>Page 31</b>
<b>Figure II.10</b>	Simulation de l'estimation de vitesse du MSAP avec EKF	<b>Page 33</b>
<b>Figure II.11</b>	Résultats de simulation de commande de vitesse du MSAP avec capteur et sans capteur (avec EKF à $t=0.5$ s).	<b>Page 35</b>

## LISTE DES FIGURES

---

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	Principe d'optimisation.	<b>Page 37</b>
<b>Figure III.2</b>	Classification des méthodes d'optimisation	<b>Page 38</b>
<b>Figure III.3</b>	Principe de la méthode PSO	<b>Page 40</b>
<b>Figure III.4</b>	Principe d'algorithme de PSO	<b>Page 41</b>
<b>Figure III.5</b>	Trois topologies du voisinage : (a) anneau (avec $n=2$ ), (b) rayon, (c) étoile	<b>Page 43</b>
<b>Figure III.6</b>	Déplacement d'une particule	<b>Page 45</b>
<b>Figure III.7</b>	Organigramme des algorithmes génétiques	<b>Page 48</b>
<b>Figure III.8</b>	Schéma bloc d'optimisation des gains des régulateur (PI) de commande	<b>Page 50</b>
<b>Figure III.9</b>	Schéma bloc d'optimisation de filtre de Kalman étendu	<b>Page 51</b>
<b>Figure III.10</b>	Résultats de simulation de la commande par EKF optimisé à $t=0.5s$ par deux technique (GA et PSO)	<b>Page 55</b>

### Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b>	Cycle de conduite FTP	<b>Page 60</b>
<b>Figure IV.2</b>	Cycle de conduite NEDC	<b>Page 61</b>
<b>Figure IV.3</b>	Véhicule électrique Blue car	<b>Page 62</b>
<b>Figure IV.4</b>	Forces appliquées sur un véhicule électrique en roulement	<b>Page 64</b>
<b>Figure IV.5</b>	Schéma bloc de simulation avec consignes de couple et vitesse réelles	<b>Page 65</b>
<b>Figure IV.6</b>	Résultat de la simulation des consignes de couple référence ( $C_r$ ).	<b>Page 66</b>
<b>Figure IV.7</b>	Résultat de la simulation des consignes de vitesse référence ( $V_{ref}$ ).	<b>Page 66</b>
<b>Figure IV.8</b>	Résultat de la simulation des consignes de puissance référence ( $P_{ref}$ ).	<b>Page 67</b>
<b>Figure IV.9</b>	Résultats de simulation du couple de charge, avec les techniques de Commande vectorielle.	<b>Page 67</b>
<b>Figure IV.10</b>	résultats de simulation de la vitesse du véhicule , avec la technique de commande vectorielle	<b>Page 68</b>
<b>Figure IV.11</b>	Résultats de simulation de la puissance estimée	<b>Page 68</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

### **Chapitre I**

<b>Tableau I.1</b>	Quelques applications des différentes technologies des moteurs.	<b>Page 13</b>
--------------------	---	----------------

### **Chapitre III**

<b>Tableau III.1</b>	Résultat d'optimisation des gaines avec la technique AG pour la même taille de population (5)	<b>Page 52</b>
<b>Tableau III.2</b>	Résultat d'optimisation de EKF avec la technique AG pour la même taille de population (5)	<b>Page 53</b>
<b>Tableau III.3</b>	Résultat d'optimisation des gaines avec la technique PSO pour la même taille de population (5) et 50 itérations	<b>Page 53</b>
<b>Tableau III.4</b>	Résultat d'optimisation de EKF avec la technique PSO pour la même taille de population (5) et 50 itérations	<b>Page 54</b>
<b>Tableau III.5</b>	Tableau de compression entre PSO et GA par rapport les paramètres de performance.	<b>Page 56</b>

### **Chapitre IV**

<b>Tableau IV.1</b>	Le temps, la distance et la vitesse maximale de quelque cycle de conduites normalisé	<b>Page 61</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Paramètres du véhicule électrique urbain de type Blue car	<b>Page 62</b>

# **Introduction générale**

### Introduction générale

La dégradation de la qualité de l'environnement a conduit ces dernières années la majorité des États à prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants. Cette pollution provient principalement d'émissions gazeuses et tout particulièrement des véhicules thermiques. Pour contribuer à une amélioration de la qualité de l'air, le véhicule électrique est une option technologique envisageable.

Les actionneurs électriques sont de plus en plus présents dans tous les secteurs domestiques et industriels ainsi que dans les secteurs technologiques de pointe, les machines synchrones à aimants permanents, sont de plus en plus utilisées dans les systèmes embarqués à cause de l'absence de pertes au rotor et compte tenu de leur compacité. De plus, avec une diminution des coûts des aimants permanents, les MSAP sont utilisés dans les actionneurs électromécaniques.

La commande vectorielle permet à la machine synchrone à aimants permanents d'avoir une similarité à la machine à courant continu qui concerne la linéarité et le découplage. Cependant, cette structure de commande nécessite que les paramètres de la machine soient précis, ceci exige une bonne identification des paramètres. En conséquence, le recours à des algorithmes de commande robuste, pour maintenir un niveau de découplage et de performance acceptable est nécessaire.

En général, un capteur mécanique de position/vitesse à haute résolution est une condition préalable à un excellent contrôle, ce qui ajoute au coût et à la complexité et nuit à la fiabilité des systèmes d'entraînement. Par conséquent, le système de commande sans capteurs de position mécaniques, ou connu sous le nom de contrôle de position/vitesse sans capteur de moteurs CA a été étudié et appliqué de plus en plus dans les deux industries et appareils ménagers.

Le filtre de Kalman étendu est un observateur d'état qui repose sur un certain nombre d'hypothèses, notamment sur les bruits. En effet, il suppose que les bruits qui affectent le modèle sont centrés et blancs et que ceux-ci sont décorrélés des états estimés. De plus, les bruits d'état doivent être décorrélés des bruits de mesure. Leur principe de base est la minimisation de la variance de l'erreur d'estimation.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Les problèmes d'optimisation présentent généralement un grand nombre de solutions non optimales. En pratique, l'objectif n'est pas d'obtenir à un optimum absolu, mais seulement à une bonne solution, et la garantie de l'inexistence d'une solution sensiblement meilleure. Pour atteindre cet objectif au bout d'un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes appelées "métaheuristiques".

Le présent travail consiste à améliorer les performances d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'un MSAP en cas de défaut de capteur de vitesse. Cela passe par l'optimisation des paramètres de commande (PI) et les gains de l'observateur à base du FKE en utilisant les méthodes métaheuristiques (PSO) et (AG). Pour présenter ce travail, on a organisé ce mémoire comme suit :

**Le chapitre I** Au début, présente un bref historique sur les véhicules électriques et les progrès actuel. Par la suite, nous exposons les différentes architectures de la motorisation et les technologies de convertisseurs statiques utilisés. En deuxième partie, on présente l'ensemble des éléments de chaîne de traction ainsi que les défauts qui peuvent affecter la chine de traction, et nous sommes basé sur le capteur de vitesse dans notre étude.

**Le chapitre II** commence par une présentation générale sur la commande vectorielle du MSAP. Par la suite, nous allons présenter en particulier le filtre de Kalman étendue. En conséquence, nous allons présenter les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle sans capteur mécanique.

**Dans le chapitre III** nous sommes intéressés à l'amélioration des performances de filtre de Kalman étendue EKF qui est utilisé comme observateur de vitesse. Par la suite, l'application des nouvelles techniques d'optimisation de type stochastiques (PSO, GA), sur le système de commande sans capteur de vitesse sera présentée est discutée.

**Dans le dernier chapitre**, nous présenterons l'application de commande de vitesse avec filtre de Kalman étendue optimal sur la chaîne de traction. Pour cela, un modèle dynamique du véhicule avec un cycle de conduite sont présentés. Cela nous permet d'avoir les consignes de vitesse et du couple de charge pour un véhicule réel. La technique de commande vectorielle avec l'observateur (filtre de Kalman) sont comparées en termes de performances dynamique et statiques pour l'application véhicule électrique.

# **Chapitre I :**

*Étude de la chaîne de traction et leurs défauts*

## I.1 Introduction

Les véhicules électriques (VE) sont des automobiles qui sont alimentées par un ou plusieurs moteurs électriques au lieu des moteurs à combustion interne traditionnels alimentés à l'essence ou au diesel. Ces véhicules utilisent l'électricité stockée dans des batteries rechargeables comme principale source d'énergie, offrant une alternative au transport à combustibles fossiles classiques. Les voitures électriques sont considérées comme respectueuses de l'environnement en raison de leurs émissions plus faibles, de leur dépendance réduite aux combustibles fossiles et du potentiel d'intégration des énergies renouvelables. Ils gagnent en popularité à mesure que la technologie progresse, que le rayon d'action augmente et que l'infrastructure de recharge se développe.

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 pour quoi jusqu'à nos jours la voiture à essence 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 Gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ ) on verra plusieurs émissions de Gaz à effet de serre d'après les différents véhicules comme montrée la figure (I.1) [1].

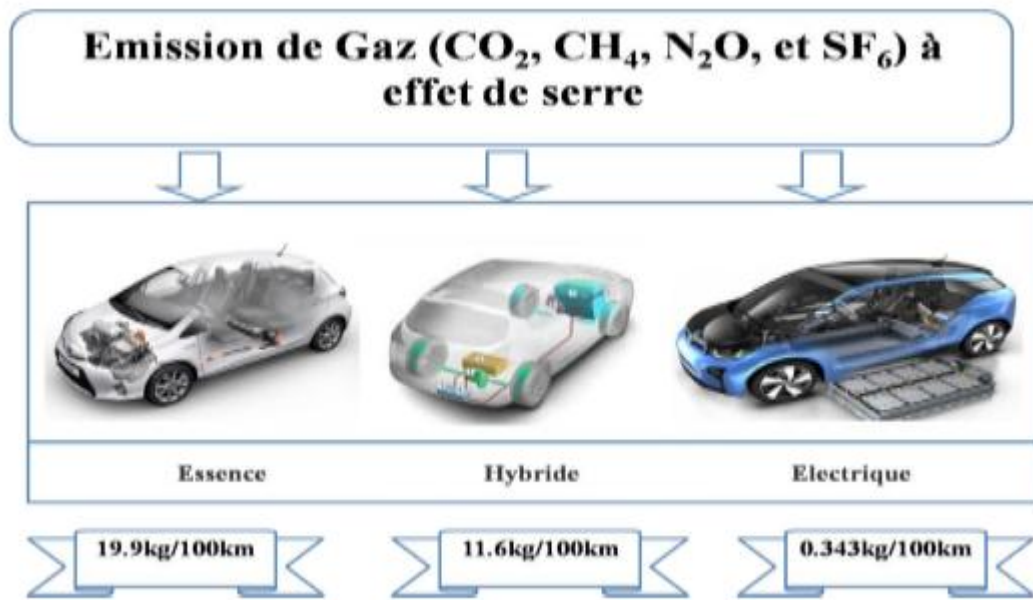


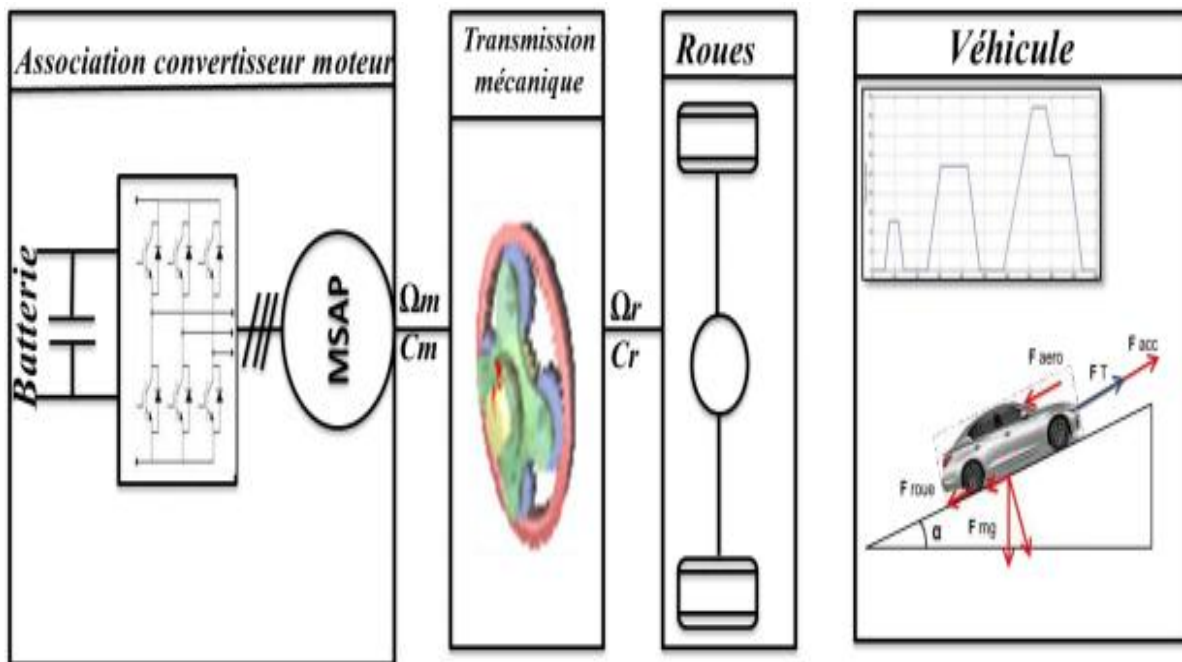
Figure I.1: Différentes émissions de gaz à effet de serre [1].

Dans ce chapitre nous présentons une introduction générale sur les véhicules électriques, les différents éléments constituent un véhicule électrique ainsi que les architectures/configurations des chaînes de traction. Au début, on présente un bref historique sur les véhicules électriques et les progrès actuel. Par la suite, nous exposons les différentes architectures de la motorisation et les technologies de convertisseurs statiques utilisés. Et nous l'avons fait diagnostic sur l'ensemble des éléments de chaîne de traction pour détecter les défauts ce qui peut affecter les performances de la chaîne de traction, et nous sommes basé sur le capteur de vitesse dans notre étude.

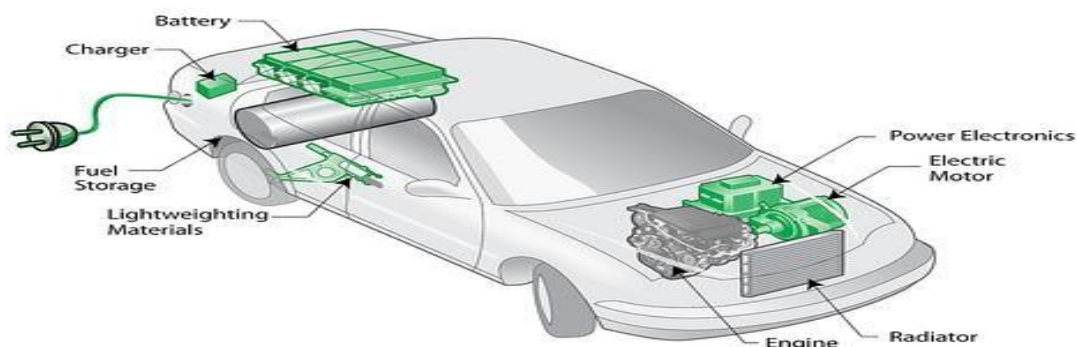
## I.2 Définition et historique

### I.2.1 Définition de véhicule électrique (VE)

Un véhicule électrique est une automobile à carburant alternatif qui utilise des moteurs électriques et des contrôleurs de moteur pour la propulsion, au lieu de méthodes de propulsion plus courantes telles que le moteur à combustion interne (MCI). Ils ont une batterie au lieu d'un réservoir d'essence et un moteur électrique au lieu d'un moteur à combustion interne. Le véhicule électrique comprend un ou plusieurs moteurs électriques selon le système de transmission de puissance à la roue comme indiqué dans les deux figures (I.1) et (I.3) [2].



**Figure I.2:** Schéma simplifié d'un véhicule électrique [1].



**Figure I.3:** Schéma interne d'une voiture électrique [2].

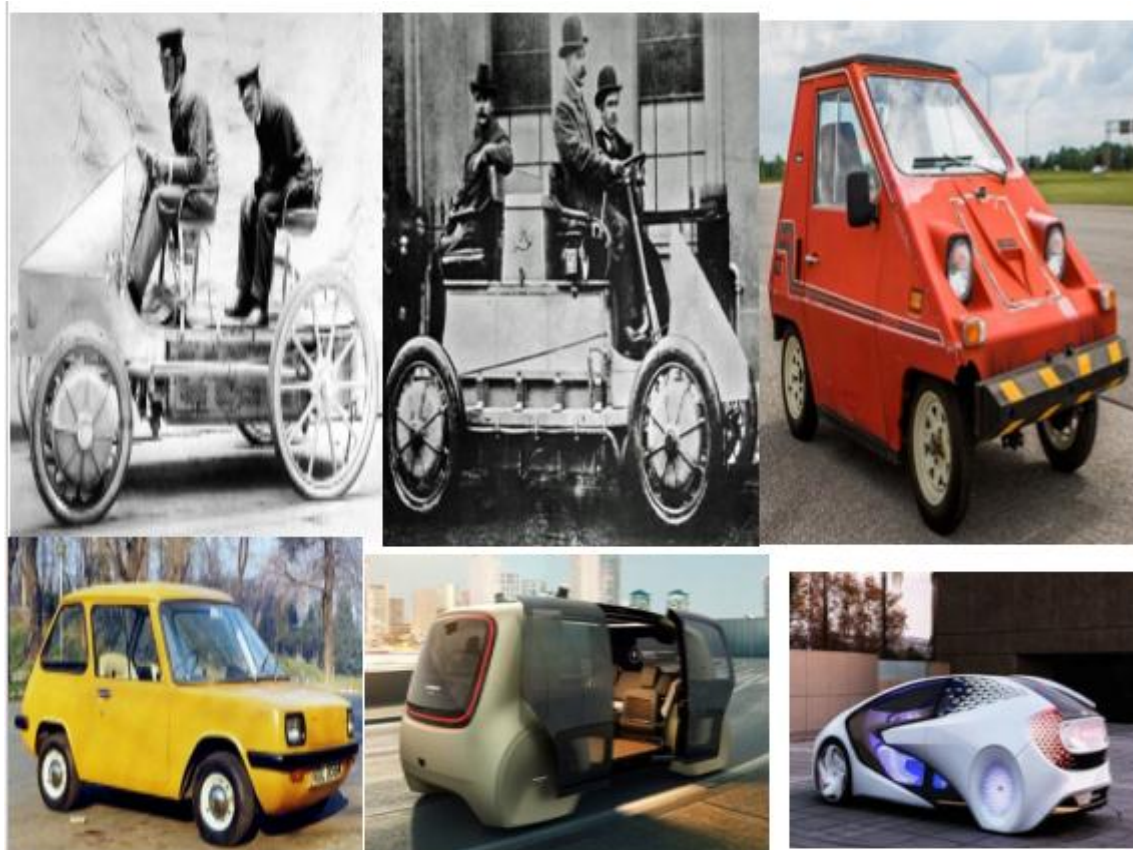
### I.2.2 Historique du véhicule électrique (VE)

Le premier véhicule électrique a été construit par le Français Gustave Trave en 1881. Il s'agissait d'un tricycle propulsé par un moteur à courant continu d'alimenté par des batteries plomb-acide. L'ensemble du véhicule et son conducteur pesaient environ 160 kg. Un véhicule similaire a été construit en 1883 par deux professeurs britanniques. Ces premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public car la technologie n'était pas assez mûre pour concurrencer les voitures à cheval. Une vitesse de 15 km/h et une autonomie de 16 km n'avaient rien d'excitant pour les clients potentiels. La course Paris-Rouen de 1864 a changé la donne : les 1135 km ont été parcourus en 48 h et 53 min à une vitesse moyenne de 23,3 km/h. Cette vitesse était de loin supérieure à celle des voitures à chevaux. Cette vitesse est de loin supérieure à celle des voitures à cheval. Le grand public commence à s'intéresser aux voitures sans chevaux ou aux automobiles, comme on les appelle désormais.

Les 20 années suivantes ont été une période pendant laquelle les VE ont été en concurrence avec leurs homologues à essence. C'était particulièrement vrai en Amérique, où il n'y avait pas beaucoup de routes pavées en dehors de quelques villes. L'autonomie limitée des VE ne posait pas de problème. En revanche, en Europe, l'augmentation rapide du nombre de routes goudronnées nécessitait une plus grande autonomie, ce qui favorisait les véhicules à essence. Le premier VE commercial a été le bateau électrique de Morris et Slalom. Ce véhicule était exploité comme taxi à New York par une société créée par ses inventeurs. Le bateau électrique s'est avéré plus rentable que les taxis à cheval malgré un prix d'achat plus élevé (environ 3 000 \$ contre 1 200 \$). Il pouvait être utilisé pendant trois quarts de travail de 4 heures, avec des périodes de recharge de 90 minutes entre chaque quart. Il était propulsé par

Deux moteurs qui permettaient une vitesse maximale de 32 km/h et une autonomie de 40 km, l'avancée technique la plus importante de cette époque est l'invention du freinage par récupération par le Français M. A. Darracq sur son coupé de 1897. Cette méthode permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage et de recharger les batteries, ce qui augmente considérablement l'autonomie. Il s'agit de l'une des contributions les plus importantes à la technologie des véhicules électriques et hybrides, car elle contribue à l'efficacité énergétique plus que toute autre chose dans la conduite urbaine.

En outre, parmi les VE les plus importants de cette époque, on trouve le premier véhicule à avoir atteint les 100 km. Il s'agit de "La Jamais Contente", construite par le Français Camille Jenatton. À noter que **Studebaker** et Oldsmobile ont démarré leur activité en construisant des VE [3], La figure (I.4) montre les étapes du développement de la voiture tout au long de l'histoire.



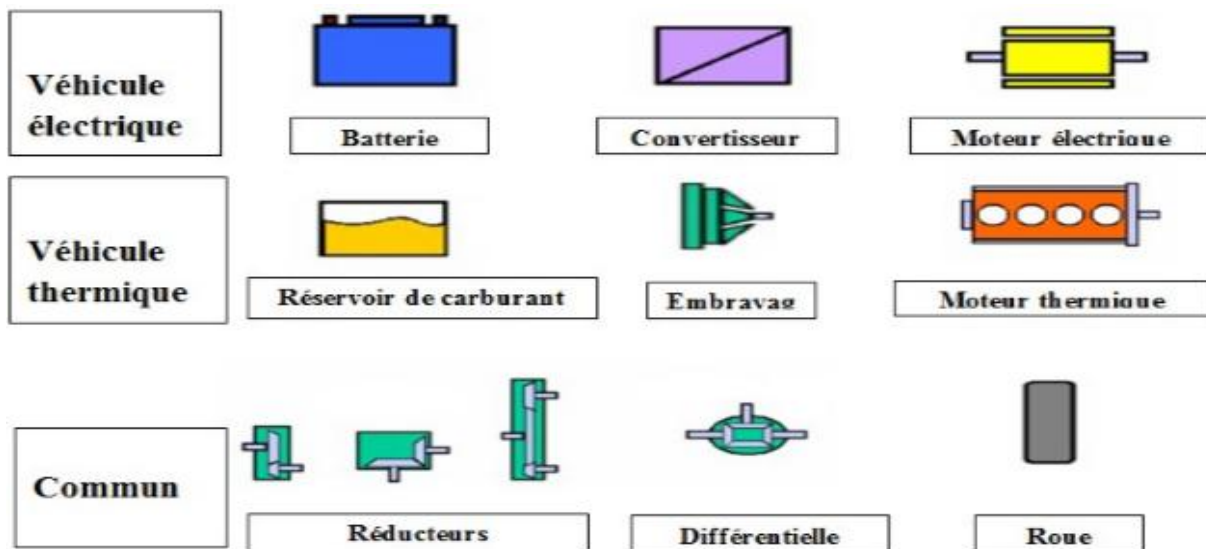
**Figure I.4:** Une image montrant les étapes de développement des véhicules électriques VE [3].

### I.3 La Chaîne de traction (VE)

L'architecture de la chaîne de traction de la voiture électrique est beaucoup plus simple : il n'y a pas besoin de boîte de vitesses ni de composants pour convertir

Le mouvement vertical des pistons en composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif (comme dans le cas d'un moteur à combustion [4].

Le mouvement rotatif (comme dans le cas d'un moteur à combustion interne) : l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture électrique.



**Figure I.5 :** La différence entre les composants de chaîne de traction VE et véhicule thermique [1].

La chaîne de traction classique d'une voiture électrique comprend la source d'énergie, le convertisseur, le convertisseur électrique, le moteur électrique et la transmission mécanique [4].

Plusieurs possibilités d'association d'éléments nécessaires à la transmission de puissance que sont le réducteur mécanique, la boîte de vitesses, et éventuellement le différentiel [4].

#### I.3.1 Description de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction d'un VE se compose principalement d'une source d'énergie, d'électronique de commande, de convertisseurs d'énergie, d'une ou de machines électriques et d'un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel). À partir de Ces éléments, nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations.

Les performances globales d'un VE dépendent amplement des différents éléments qui le constituent et qu'on peut les présenter en deux sous-systèmes regroupant une source d'énergie électrique embarquée et un groupe motopropulseur qui intègre le moteur électrique

et le convertisseur de puissance avec sa commande. L'ensemble doit posséder les caractéristiques de fonctionnement suivantes [1].

- Couple élevé à basse vitesse et suffisant à haute vitesse.
- Faible ondulation de couple (ne pas dépasser  $\pm 2\%$ ).
- Récupération de l'énergie au freinage.
- Faisabilité industrielle et faible coût

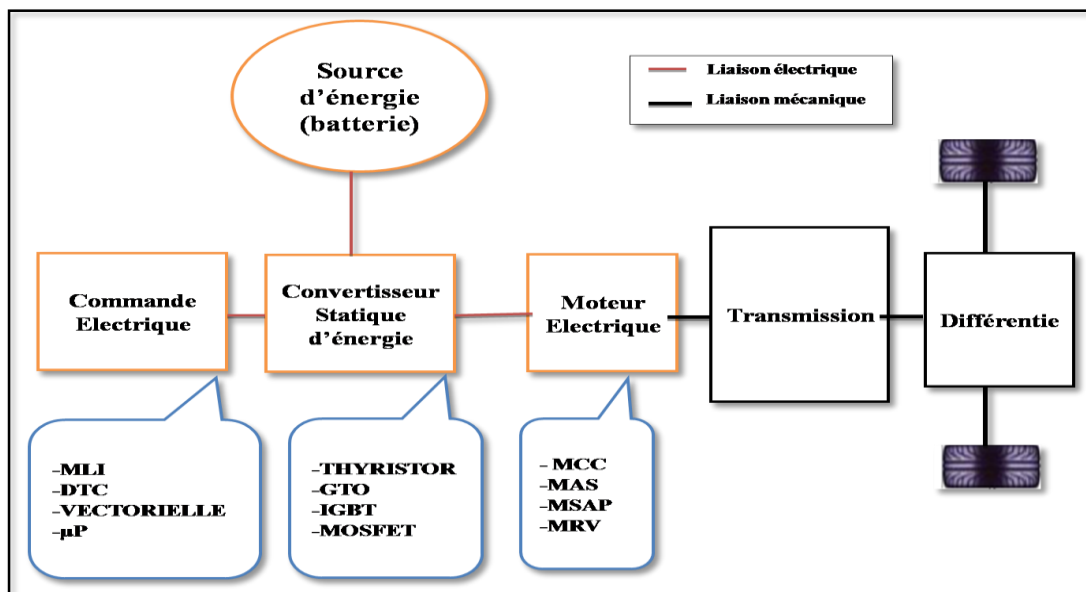


Figure I.6: Schéma de fonctionnement d'un système de traction électrique [1].

### I.3.2 Véhicules entièrement électriques

Le développement des véhicules électriques, comme mentionné précédemment, est fortement lié au développement de son approvisionnement en énergie : les batteries. Batteries dont l'énergie de masse est relativement faible. Il est relativement bas, ils sont également très lourds et très coûteux. En fonction de la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, il existe essentiellement deux types de véhicules électriques : les voitures électrifiées avec des batteries pouvant être rechargées par une prise d'alimentation et les véhicules électroniques alimentés par des piles à combustible [4].

- Véhicules électriques équipés de batteries plug-in.
- Les véhicules électriques à pile à combustible.
- Le véhicule hybride (VH).

## I.4 Architecture de la chaîne de traction du véhicule électrique

L'architecture de la chaîne de traction de la voiture électrique est beaucoup plus simple : il n'y a pas besoin de boîte de vitesse ou de composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif (cas d'un moteur thermique) : l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture électrique [4].

La chaîne de traction classique d'une voiture électrique comprend la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique [4].

Plusieurs possibilités d'association d'éléments nécessaires à la transmission de puissance qui sont le réducteur mécanique, la boîte de vitesse, et éventuellement le différentiel [4].

### I.4.1 Solution avec boîte de vitesse mécanique

L'avantage essentiel de cette solution est de permettre l'utilisation d'un moteur à plus faible couple, donc plus léger, pour une vitesse maximale donnée. Remarquons qu'entre deux changements de vitesse (petite plage), si le moteur possède une capacité de fonctionnement à puissance maximale constante, cela peut permettre également la suppression des fluctuations de puissance [4].

### I.4.2 Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe

Le couple maximal que doit délivrer un tel moteur associé à un réducteur de rapport fixe est supérieur à celui que devrait produire un moteur associé à une boîte de vitesses. Cette solution est illustrée sur la figure (1.7) [5].

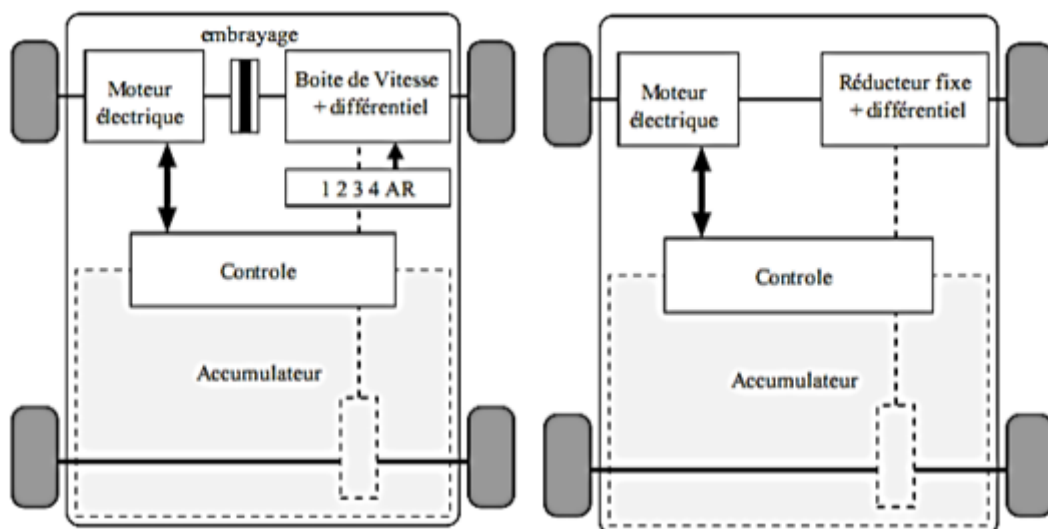


Figure I.7: Solution monomoteur : avec boîte de vitesse (à gauche), avec réducteur (à droite) [4].

### I.4.3 Solution multi-moteurs

Il peut à priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel et les doubles joints de cardans, nécessaires dans les deux solutions précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices [5].

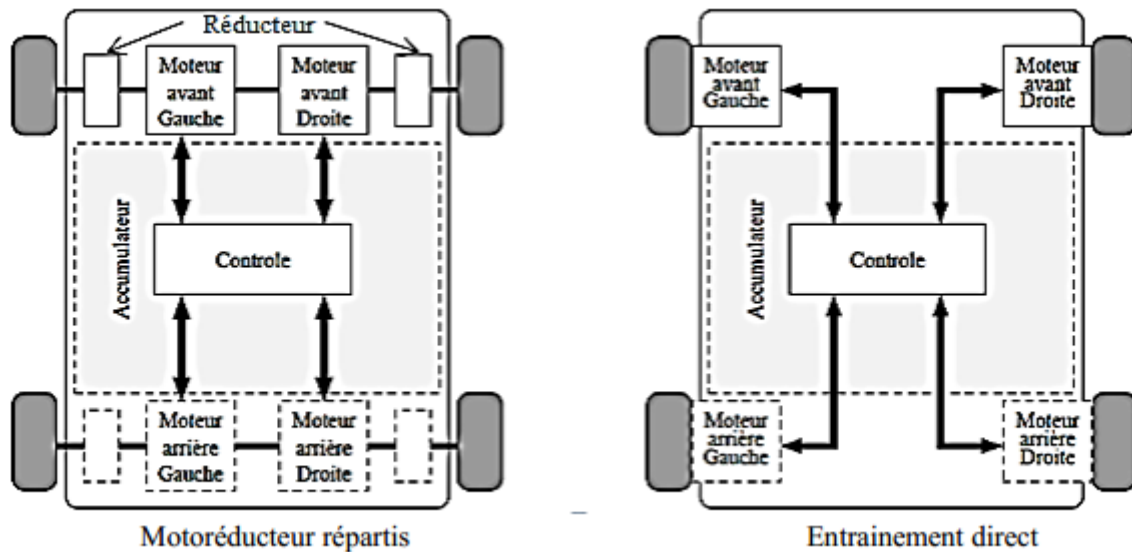


Figure I.8 : Solution multi-moteurs [5].

La chaîne de traction dans ce cas est simplifiée en utilisant un moteur (avec réducteur ou moteur roue) pour chaque roue motrice. Ainsi le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur. Pour ce cas, deux configurations sont possibles : avec réducteur ou à entraînement directe (**Figure (I.8)**).

### I.4.4 Structure de la chaîne de traction d'un véhicule électrique

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de traction, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche. Dans cette partie, on essaiera de présenter les organes de la traction électrique en justifiant le choix de chaque organe [6].

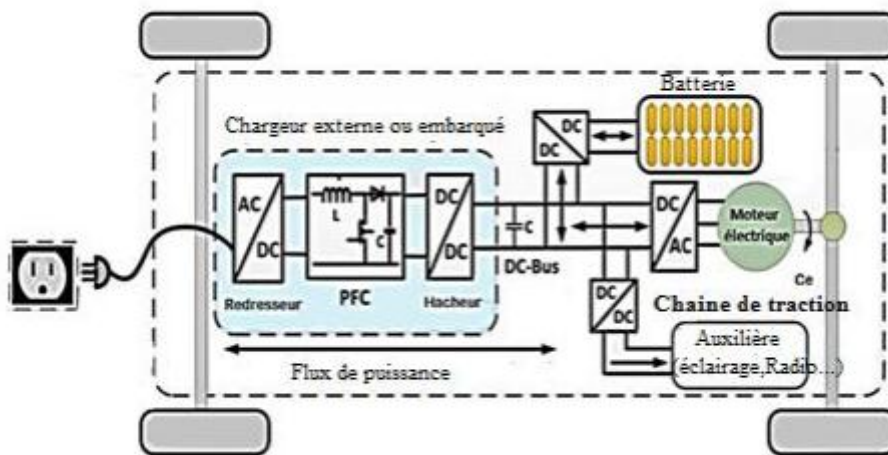


Figure I.9: Structure de la chaîne de traction dans un VE [6].

## I.5 Choix d'architecture

Sur la base des avantages et inconvénients mentionnés ci-dessus, la chaîne de traction choisie pour notre étude est de type monomoteur ; ce choix se justifie par le fait que le coût et la masse d'un seul moteur sont toujours inférieurs à ceux de plusieurs moteurs. Nous avons opté pour l'utilisation d'un réducteur dont le but est de réduire le couple dimensionnel du moteur et par conséquent sa masse et son coût. De plus, la commande d'un seul moteur évite le problème de glissement lors de la commande de plusieurs moteurs à la même vitesse. Enfin, l'argument le plus essentiel pour les constructeurs est le coût, puisqu'il est le plus bas de toutes les architectures [1].

## I.6 Différents moteurs utilisés

Très utilisée, depuis plus d'un siècle, la machine électrique est le principal composant de la voiture électrique. Elle est souple, silencieuse, non polluante et s'adapte à toutes les situations. Concrètement, la machine électrique de traction doit répondre aux critères suivants : [7].

- Il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens.
- Il doit avoir une grande paire de bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

Les caractéristiques de base d'une commande électrique pour les véhicules électriques sont les suivantes :

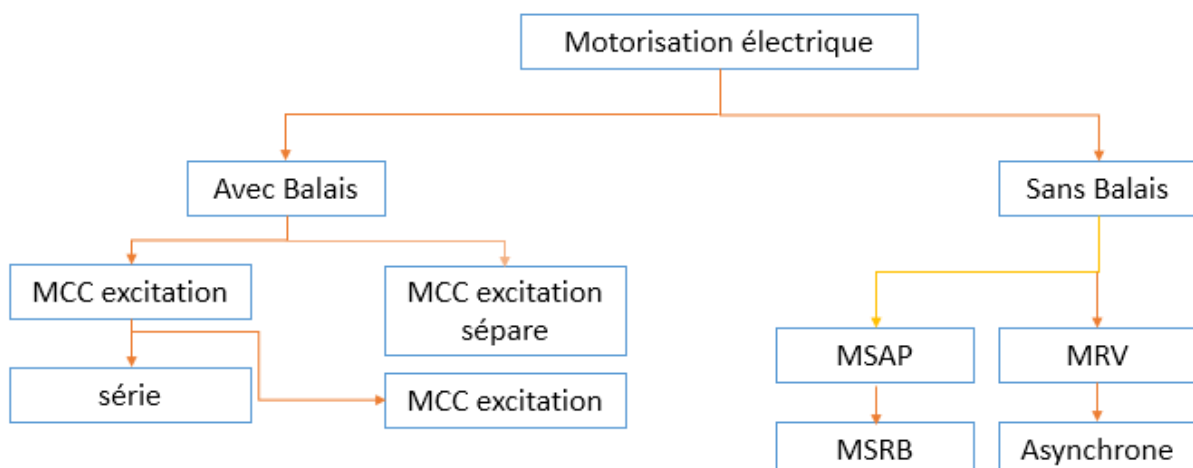
- Densité de couple et densité de puissance élevée.
- Très large gamme de vitesses, couvrant la marche à basse vitesse et la marche à pied.
- Rendement élevé sur de larges plages de couple et de vitesse.

- Grande capacité de fonctionnement à puissance constante.
- Capacité de couple élevée pour le lancement électrique et la montée de collines.
- Capacité de surcharge intermittente élevée pour les dépassements.
- Fiabilité et robustesse élevées pour l'environnement des véhicules.
- Faible bruit acoustique.
- Coût raisonnable.

### I.7 Classification des moteurs électriques

Il existe de nombreux types de moteurs électriques. Les types de moteurs les plus courants sont présentés ci-dessous dans **la figure (I.10)**.

Les moteurs électriques convertissent l'énergie électrique en mouvement mécanique et sont classés en deux catégories différentes : CC (courant continu) et CA (courant alternatif). Au sein de ces catégories, il existe de nombreux types de moteurs, chacun offrant des capacités uniques qui conviennent bien à des applications spécifiques.



**Figure I.10:** Classification des moteurs électriques VE.

Dans l'industrie, les moteurs les plus couramment utilisés sont les moteurs à induction triphasés à cage d'écurie. Les moteurs synchrones et les moteurs à courant continu sont également couramment utilisés pour les applications lourdes, les entraînements de précision, etc. Avec l'introduction des variateurs de fréquence pour le contrôle de la vitesse et du couple, les moteurs asynchrones triphasés sont de plus en plus acceptés dans les applications où les variateurs de vitesse à courant continu étaient utilisés auparavant.

**Tableau 0.1:** Présente quelques applications des différentes technologies des moteurs.

Modelés VEs	Type de motorisation	Vitesse max	Année
Chloride Lucas	Moteur à RV	70 km/h	1980
Concept or G-Van	MCC excitation sépare	80 km/h	1977
Skoda Perun HE	Moteur asynchrone	90 km/h	2014
Fiat Panda Elettra	MCC série	100 km/h	2003
GM EV1	Moteur asynchrone	102 km/h	2001
Renault Congo expressZE	Moteur synchrone à rotor bobiné	130 km/h	2009
Nissan leaf	MSAP	144 km/h	2020
Mazda Bongo	MCC parallèle	160 km/h	2009
Toyota Prius	MSAP	160 km/h	2007
Tesla Model S	Moteur asynchrone	240km/h	2014

Ainsi, en fonction du type de véhicule fabriqué, les constructeurs orientent leurs choix vers trois grands types de moteurs électriques :

- La machine à courant continu.
- La machine synchrone.
- La machine asynchrone.

## **I.8 Choix de motorisation**

Chacun des moteurs présentés à des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de cout et de difficulté de la commande qui s'affrontent. Nous avons opté pour le moteur synchrone à aimants permanent en raison de son rendement élevé et de sa puissance massique élevée.

## **I.9 Source d'énergie**

Par conséquent, utiliser l'électricité comme source d'énergie pour propulser les véhicules automobiles est un véritable défi. Concernant le stockage d'énergie électrique embarqué pour les VE, les batteries électrochimiques offrent actuellement les meilleures performances en termes d'énergie massique ou volumétrique. Le stockage de l'énergie électrique est une préoccupation majeure pour les véhicules électriques [8].

### I.9.1 Définitions de la batterie

Une batterie est un système qui stocke l'énergie électrique sous forme chimique. Elle fonctionne de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique pour alimenter en permanence le véhicule. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique [9]. La figure (I.11) représente l'une des batteries utilisées dans VE.

Pour les applications de transport électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries respectant les conditions suivantes [10] :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de Bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières
- Une durée de vie
- Élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement.
- Conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Conduisant à une diminution du coût pour l'utile.



Figure I.11 : Technologie de batterie de voiture électrique.

### I.10 Différentes technologies des convertisseurs

Les convertisseurs de puissance sont utilisés pour alimenter les moteurs électriques. Les limites de tension et de courant admissibles. Actuellement, il existe plusieurs configurations possibles pour les véhicules électriques. Dans ces applications, la structure est divisée en deux parties aux rôles différents, DC et AC. Un convertisseur DC/AC ou un convertisseur AC/DC doit être utilisé. Les principaux composants d'un convertisseur de puissance sont des semi-conducteurs [1].

### I.10.1 Les onduleurs

Dans un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant alternatif, un dispositif de conversion appelé onduleur doit être inséré entre la source d'énergie et le moteur de traction, qui convertit l'énergie électrique DC en courant alternatif, afin que le couple moteur puisse être réalisé en mode traction et contrôle du mode de freinage et régulation de la vitesse du véhicule. Les onduleurs peuvent être classés selon leur statut, triphasé ou monophasé [1].

On distingue 2 types :

- Les onduleurs autonomes : la fréquence des grandeurs de sortie dépend de la commande.
- Les onduleurs non autonomes ou assistés : ce qui est différent de l'onduleur assisté où la fréquence est imposée par la fréquence du réseau.

Il existe de nombreux convertisseurs de puissance basés sur diverses topologies adaptées aux chaînes de traction des véhicules. Deux topologies différentes d'onduleurs peuvent être distinguées dans la littérature : les onduleurs de type classique utilisant des structures de puissance connues, tels que les onduleurs de tension triphasés, et les onduleurs avec une électronique de puissance plus moderne, que nous appelons onduleurs multi-niveaux. Tout d'abord, les topologies classiques adaptées aux véhicules électriques sont introduites, leurs avantages et problèmes éventuels sont brièvement expliqués [1].

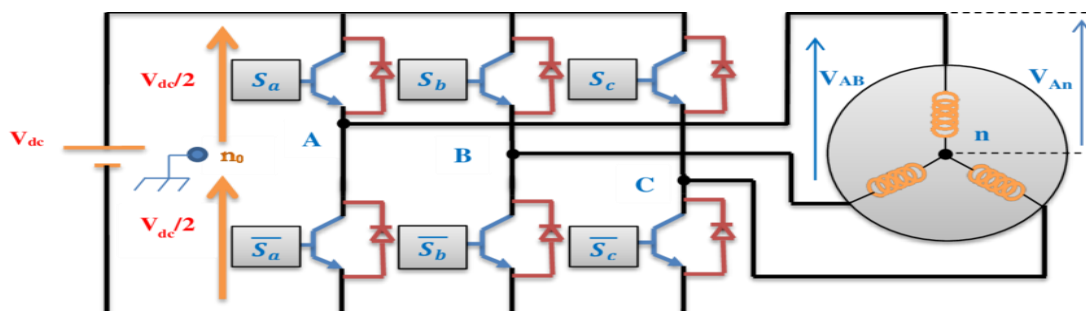
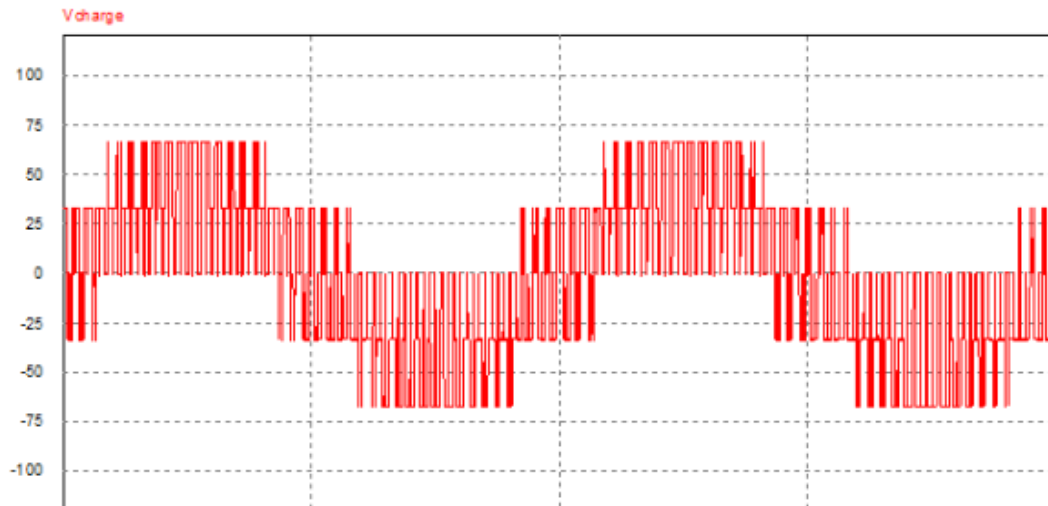


Figure I.12: Onduleur à deux niveaux.

Le principe de commande est basé sur la technologie de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Plusieurs techniques MLI existent dans la littérature, la plus connue étant sans doute la modulation de largeur d'impulsion. L'objectif est de comparer une modulatrice basse fréquence (le plus souvent une onde sinusoïdale) avec une porteuse haute fréquence (le plus souvent une onde triangulaire) représentant la fréquence de hachage d'un interrupteur de puissance. Il produit une forme d'onde hachée à la sortie de l'onduleur [1].



**Figure I.13** : Tension de sortie entre phases pour un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

## **I.11 Avantages et inconvénient des VE**

### **I.11.1 Avantages du VE**

Les véhicules électriques présentent plusieurs avantages qui permettent aux consommateurs de faire enfin la différence entre une voiture électrique et une voiture thermique [11].

- Les voitures électriques sont amusantes à conduire et ont une conduite douce. L'accélération est continue et progressive car le moteur ne cale jamais (pas d'embrayage).
- Ces véhicules sont plus faciles à entretenir et coûtent 30 à 40% de moins (Par exemple, les moteurs électriques n'ont pas besoin de vidanger l'eau). De plus, lorsqu'une panne survient, le nombre de pièces est réduit d'un facteur 3.
- Les moteurs électriques sont 3 fois plus économes en énergie que les moteurs thermiques.
- Démarré très rapidement, appuyez sur un bouton pour démarrer. Fonctionnement (ou problèmes de démarrage par temps froid d'hiver).
- Le principal avantage est qu'il n'est pas dépendant du pétrole.
- Les voitures électriques sont écologiques.

### **I.11.2 Les inconvénients du VE**

Véhicule électrique ayant plusieurs avantages, il présente également des inconvénients [12] :

- D'autant plus que les produits innovants sont souvent coûteux, les prix de ces produits sont élevés. La voiture doit être plus haute.

- Ainsi la durée de charge de la batterie reste élevée. De plus, lorsque Lors de son utilisation, le moteur ne génère aucune chaleur. Intérieur automobile Non chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), les émissions La batterie est accélérée.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur n'ont pas Très important.

## I.12 Détection de défauts sur la chaîne de traction d'un véhicule électrique

### I.12.1 Classification des défauts

Un défaut est défini comme un écart inadmissible par rapport à la valeur réelle nominal du système. Comme le montre la figure (I.13) les défauts affectent Actionneurs, capteurs ou composants [13].

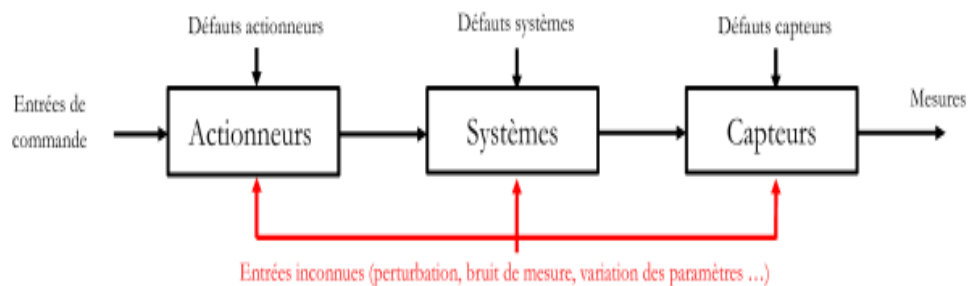


Figure I.14: Différentes localisations de défaut d'un processus [14].

Un défaut est également un état qui peut entraîner une panne ou un dysfonctionnement systèmes au fil du temps. Comme le montre la figure I.14, un système sain peut être affecté par les effets d'un large éventail de défaillances peuvent être : continu, discontinu ou graduel [14].

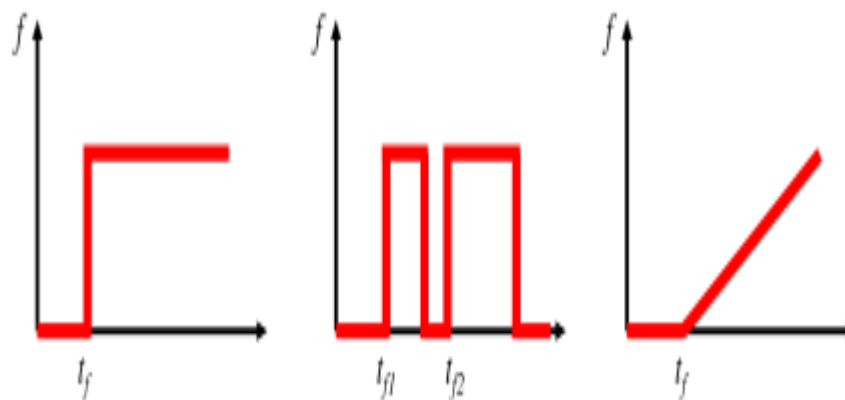


Figure I.15: Les différents types de défaut, de gauche à droite : continu, discontinu et graduel.

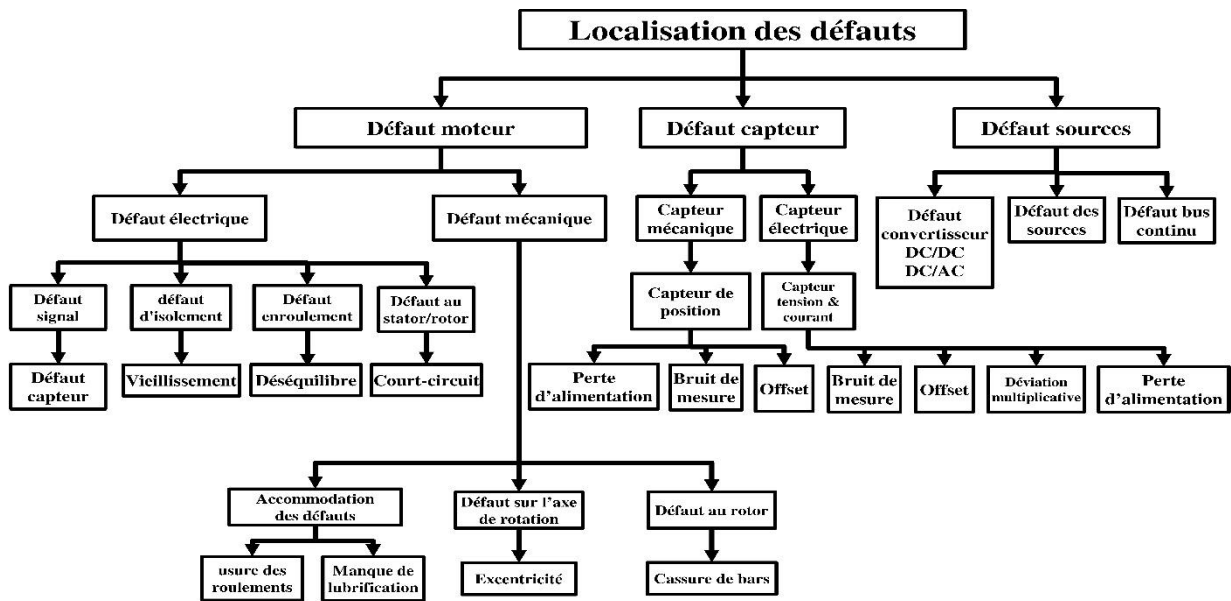


Figure I.16: Classification des défauts d'un véhicule électrique [14].

### I.12.1.1 Défauts dans les sources d'énergie

Les défaillances les plus courantes sont les fluctuations et les transitoires au niveau des sorties du bus continu. Les piles à combustible telles que les défaillances du circuit du compresseur d'hydrogène pouvant réduire le rendement de la pile à combustible.

Dans un défaut de court-circuit est étudié dans les batteries d'une Toyota Prius Hybride qui peut survenir pendant les phases d'accélération ou de décélération du véhicule, en se basant sur un test complet du véhicule afin d'identifier les dysfonctionnements des cellules parallèles de la batterie [15].

Le condensateur électrolytique du bus continu peut également être sujet à des défaillances qui compromettent le fonctionnement du convertisseur statique et dégradent considérablement la qualité de la tension continue. Présente l'analyse d'un court-circuit sur le bus continu suite à un dysfonctionnement du système d'alimentation électrique d'un véhicule hybride. L'étude base sur l'approche multi-modèle et observatrice utilisée pour la détection et le diagnostic. La synthèse utilise un modèle RC de la batterie développé par l'International 'Energy Agency', et l'identification des défauts se focalise sur la probabilité d'un dysfonctionnement dans la capacité ou la résistance du modèle [14].

### I.12.1.2 Défauts des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont constitués d'interrupteurs et de composants passifs. Les principaux défauts qui affectent les interrupteurs statiques sont des défauts de type 'court-circuit' ou 'circuit-ouvert' [14].

Le défaut de type court-circuit peut avoir deux causes : soit la mise en court-circuit physique de la puce de silicium par dépassement de température critique, soit la défaillance de la commande rapprochée. Le défaut de type circuit-ouvert se manifeste au sein de la cellule de commutation d'un bras par le fait qu'un interrupteur (supérieur ou inférieur) reste constamment ouvert. Ce type de défaut a pour principale cause une défaillance de la commande rapprochée (défaut thermique du driver ou perte d'alimentation par exemple) [16] [17].

Pour les moteurs en général, des solutions proposent la modification de la topologie du convertisseur en ajoutant des commutateurs bidirectionnels supplémentaires pour des dérivations de l'IGBT défaillant ou court-circuité, ou sinon, inclure une alimentation redondante qui peut être commutée ou désactivée en cas d'une perte de l'interrupteur [14].

### I.12.1.3 Défauts moteurs

Dans les machines à courant alternatif, on peut répertorier les défauts selon leur localisation, au stator ou au rotor. Les défauts mécaniques sont plus importants dans les machines de forte puissance ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements qui atteint 40%. En ce qui concerne le stator, 38% des principaux défauts sont d'origine électrique et affectent le bobinage qui est identique pour une machine asynchrone ou synchrone. Ce sont essentiellement [18] :

- Des défauts d'isolant ;
- Des courts circuits entre spires, entre phases ou entre une phase et la carcasse ;
- Un défaut dans le circuit magnétique ;

En ce qui concerne le rotor, 10% des défauts peuvent être de type magnétique ou mécanique [19] :

- Défaut dans le circuit magnétique ;
- Excentricité statique ou dynamique de l'arbre de rotation ;
- Cassure d'une ou de plusieurs barres pour un rotor à cage d'une MAS ;
- Usure des roulements.

Les 12% restant sont des défauts d'origines diverses et on peut les classer en deux catégories :

Les défauts liés à une mauvaise conception ou à un mauvais dimensionnement qui ont conduit à une dégradation prématurée ;

Une mauvaise exploitation (surcharge permanente, régimes transitoires violents ou environnement sévère) qui peuvent conduire à des défaillances ou également une dégradation prématurée.

L'impact d'un de ces défauts provoque des comportements irréversibles sur le moteur, par exemple, une cassure de barre du rotor d'une MAS réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations de la vitesse de rotation qui accélèrent la détérioration de la machine. Le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif du défaut [20] [21].

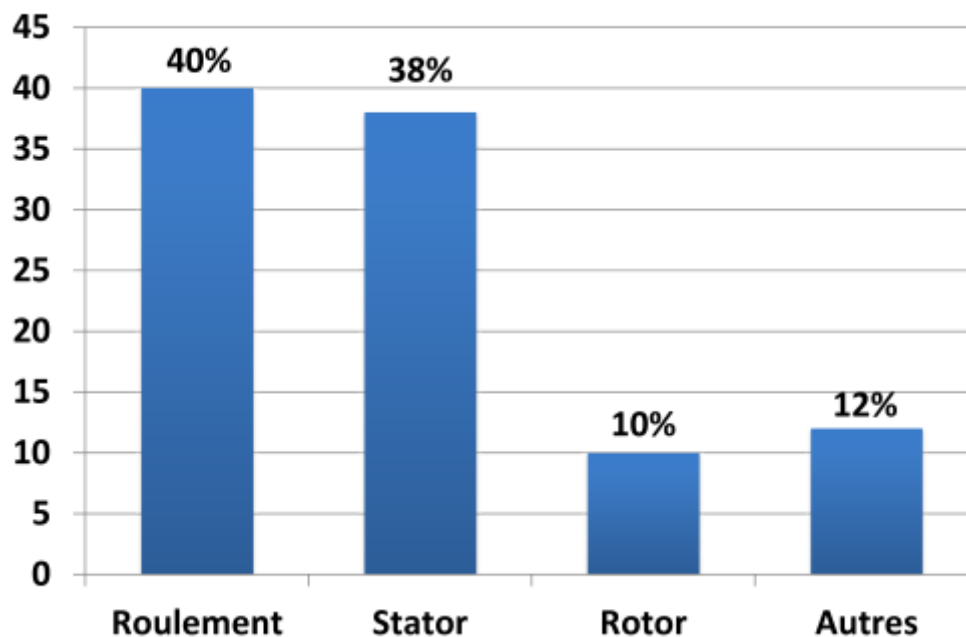
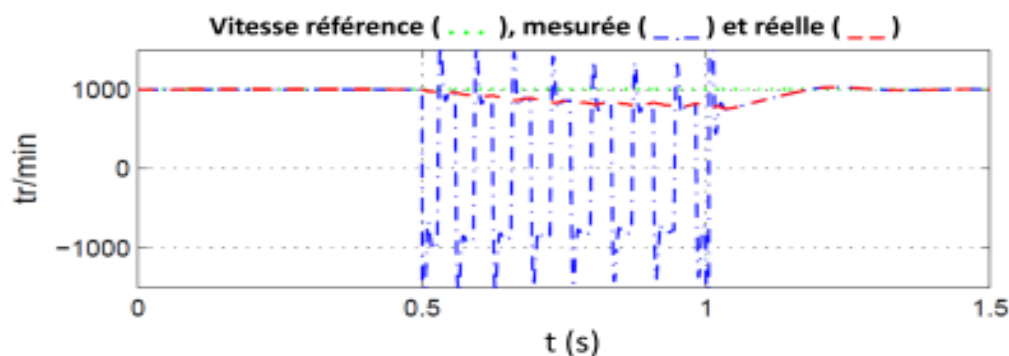


Figure I.17: Répartition des défauts moteurs [21].

#### I.12.1.4 Défauts de capteurs

Les capteurs sont des composants qui transforment une grandeur physique en un signal électrique traitable par les calculateurs. Ainsi, un capteur (en défaut) donne une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Pour les systèmes en boucle fermée, les mesures issues de ces capteurs sont utilisées pour la génération du signal de commande (figure (I.18)) [14].



**Figure I.18:** Défaut bit11 d'un codeur absolu d'une MSAP [14].

On trouve plusieurs cas de défaut du capteur de position dans la traction du véhicule électrique, on peut citer ou traiter un offset du capteur de position d'un prototype sous simulateur ; dans le même registre traite une perte totale du capteur pour la commande d'une machine asynchrone dans l'application véhicule électrique et hybride ; dans on trouve des études d'un défaut capteur de courant sur des exemples industriels. Cette thèse traite les défauts du capteur mécanique : bruit de mesure, baisse du gain et la perte aléatoire du signal du capteur. Le diagnostic et la détection des défauts sont indispensables pour la chaîne de traction mais pas su-santés, la structure FTC est nécessaire pour éviter des immobilisations dangereuses ou coûteuses du procédé [14].

### I.13 Concepts généraux d'un défaut

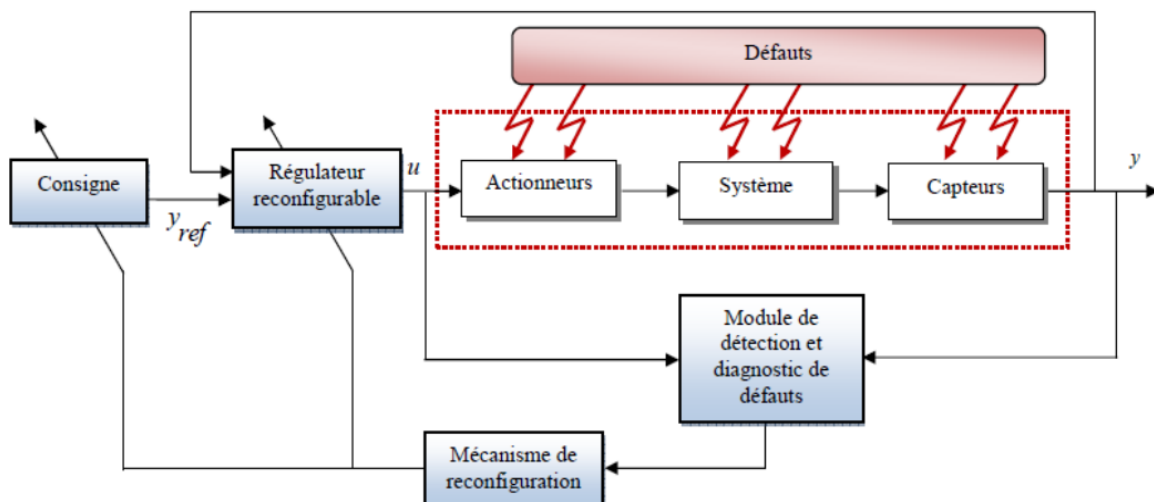
- **La tolérance aux défauts (TAD)** : a pour but de permettre à un système de remplir sa fonction en dépit des défauts. La tolérance aux défauts physiques concerne les perturbations dues à l'environnement, aux défauts de conception, d'interaction et aux malveillances [22].
- **Défauts** : Le terme faute ou défaut est généralement défini comme un écart non permis d'au moins une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal [23].
- **Perturbation** : Signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale [24].

#### I.13.1 Contrôle actif à tolérance de pannes

L'approche active de la commande FTC procède par une démarche explicite de diagnostic permettant de détecter et de localiser les défauts imprévus pouvant affecter le système. Une fois qu'un défaut est détecté, localisé et identifié, la stratégie de la FTC est activée en ligne via un mécanisme de reconfiguration. **La figure (I.19)** représente la structure des AFTC (*Active Fault Tolerant Control*) [25].

L'architecture de la commande AFTC est constituée par :

- Un régulateur reconfigurable,
- Un module de détection et localisation des défauts (*Fault Detection and Isolation*, FDI or *Fault Detections and Diagnoses*, FDD) avec une bonne sensibilité aux défaillances et une bonne robustesse par rapport aux incertitudes du modèle, aux variations des conditions d'utilisation et aux perturbations extérieures,
- Un mécanisme de reconfiguration qui permette de recouvrir les performances du système.



**Figure I.19:** Schéma de principe d'une loi de commande FTC active [25].

Le principe AFTC peut être divisé en trois étapes : génération résiduelle, détection de défaut et reconfiguration

### I.14 Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques composants de base des véhicules électriques, en nous concentrant sur les différences entre les véhicules électriques et les véhicules à moteur à combustion interne, en nous concentrant sur les défauts et les caractéristiques des véhicules électriques, et sur les méthodes pour résoudre certains problèmes. Dans les véhicules électriques. Dans chaque élément du contemporain.

Dans ce chapitre, nous avons identifié les lacunes des capteurs utilisés pour contrôler la vitesse des équipements et utilisé des filtres de Kalman comme systèmes vibratoires pour améliorer les performances de cette série de points-virgules mémo, compris une étude de contrôle vectoriel de référence sur MSAP.

## **Chapitre II :**

*Commande vectorielle sans capteur  
de vitesse du MSAP*

## **II.1 Introduction**

Dans les commandes des moteurs synchrones à aimants permanents, le capteur de vitesse est indésirable, L'incorporation de ces capteurs dans les systèmes peut augmenter leur complexité et leur encombrement. D'un autre côté, les mesures provenant de ces capteurs sont souvent bruitées et erronées surtout aux faibles vitesses [26].

Notre objectif principal est d'éliminer le capteur mécanique de vitesse ou de position, qui est souvent l'élément le plus faible du système. Pour atteindre cet objectif, nous cherchons à le remplacer par des capteurs électriques et des algorithmes de calcul capables de reconstituer avec précision la vitesse de la machine [27].

Un observateur ou un capteur logiciel est un système dynamique qui est basé sur la connaissance d'un modèle mathématique décrivant le comportement du système et utilise des entrées pour reconstruire des variables d'état [28].

Parmi les méthodes d'observation, nous avons des observateurs type stochastiques est l'observateur de filtre de Kalman étendu, Leurs observations se basent sur la présence du bruit dans le système, ce qui est souvent le cas [29].

Dans ce chapitre, nous commençons, tout d'abord par une présentation générale sur la commande vectorielle du MSAP, nous allons présenter quelques méthodes de synthèse d'observateurs de système linéaire et non linéaire, mais un intérêt particulier pour filtre de kalman étendue, Ensuite, nous allons présenter les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle sans capteur mécanique.

## **II.2 Commande vectorielle du MSAP**

Le principe de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [30].

L'équation (II.1), donnant le couple, montre que celui-ci dépend de deux variables qui sont choisies comme variables d'états  $I_d$  et  $I_q$  (respectivement courants longitudinal et en quadrature)

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)I_d I_q + \phi_f I_q] \quad \text{(II.1)}$$

Il s'agit donc de définir une relation entre ces deux variables, puisqu'il n'y a qu'une grandeur à commander (le couple) et deux variables à réguler ( $I_d$  et  $I_q$ ).

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante  $I_d$  nulle. Nous contrôlons le couple uniquement par le courant  $I_q$ . On règle ainsi la vitesse ou la position par la composante  $I_q$  [31]. La figure (II.1) représente le principe de découplage pour la MSAP.

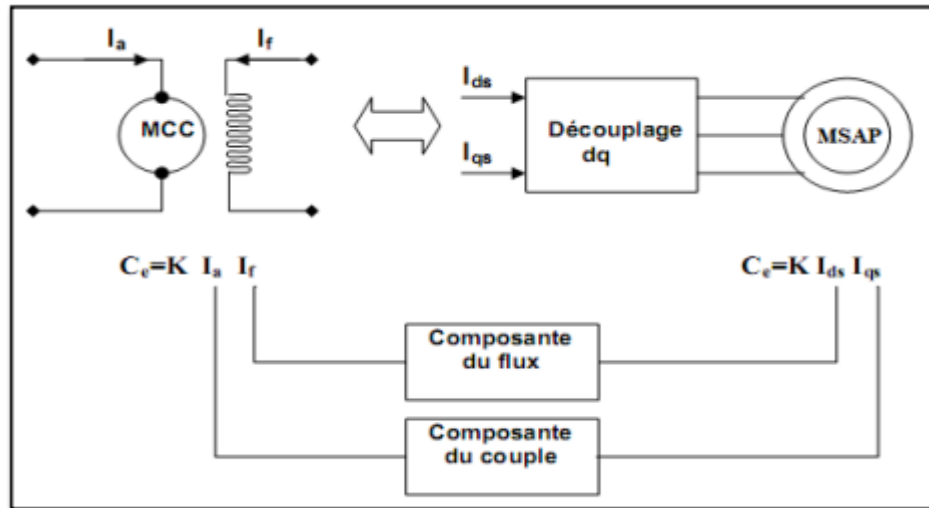


Figure II.1 : Schéma du principe de découplage pour la MSAP par analogie avec la MCC.

### II.2.1 Description du système global

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant.

La figure (II.2) représente le schéma global de la commande vectorielle en vitesse ou en position d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère ( $d, q$ ).

Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_{d_{ref}}, V_{q_{ref}}$ . Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{q_{ref}}$ . Cette référence est limitée au courant maximal. Par contre, le courant  $I_{d_{ref}}$  est imposé nul dans notre cas. Les sorties de la régulation des courants  $I_d$  et  $I_q$ , après passage dans le repère ( $a, b, c$ ), servent de références de tensions ( $V_{a_{ref}}, V_{b_{ref}}, V_{c_{ref}}$ ) pour la commande de l'onduleur à MLI [31].

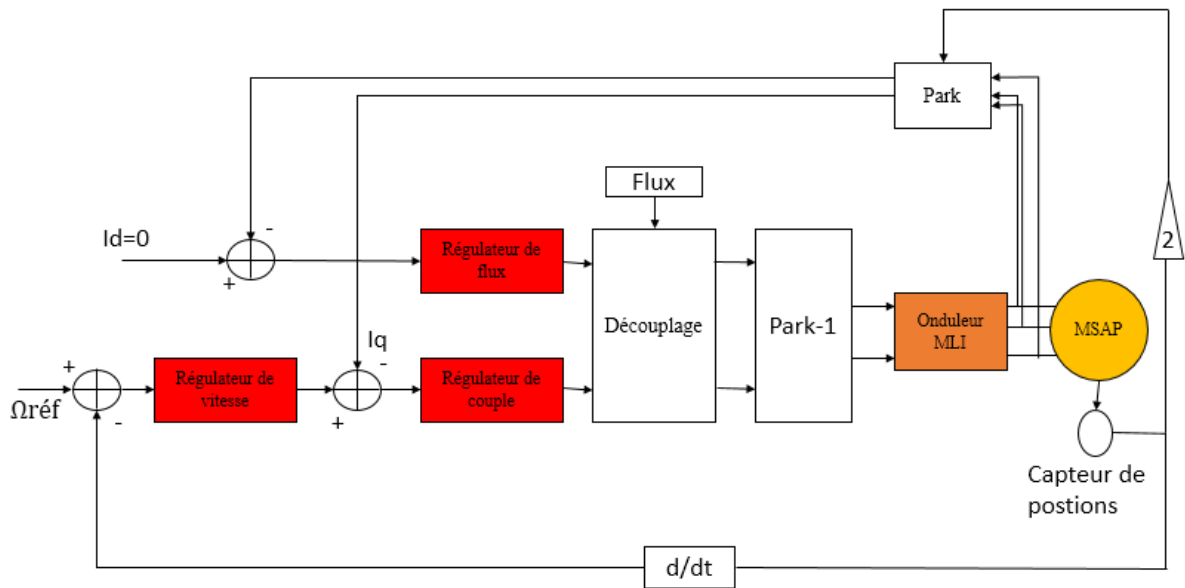


Figure II.2 : Schéma bloc de la commande vectorielle de la MSAP [31].

### II.2.2 Le modèle de la MSAP

L'estimation des variables d'état a besoin d'un modèle adéquat de la machine asynchrone. Le modèle biphasé dans le repère (d, q) de la MSAP est obtenu en utilisant la transformation de PARK. La représentation de la dynamique de la MSAP donnée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \\
 V_q &= R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega L_d I_d + \omega \lambda_m \\
 C_e &= \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + \lambda_m I_q]
 \end{aligned}
 \tag{II.2}$$

### II.2.3 Découplage

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes **d** et **q** [31].

La compensation a pour but de découpler les axes **d** et **q**. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs. Les équations statoriques comprennent, en effet, des termes qui font intervenir des courants de l'autre axe [31].

Ces équations s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \\
 V_q &= R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega L_d I_d + \omega \lambda_m
 \end{aligned}
 \tag{II.3}$$

La figure (II.3) représente le couplage entre les axes d et q.

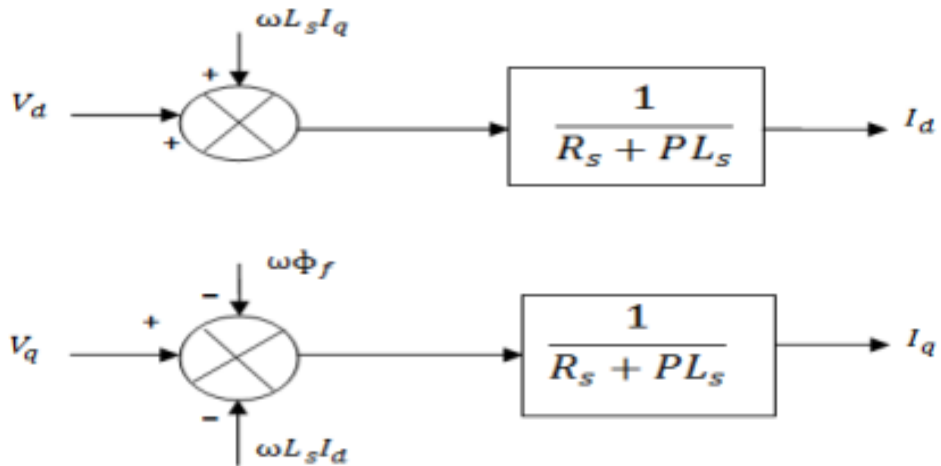


Figure II.3 : Le couplage entre les axes d et q [31].

#### II.2.4 Calculs des régulateurs

##### ➤ Régulateur de courant $I_d$

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence imposé. Les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés ici au moyen des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires. Le schéma fonctionnel de la boucle du courant ( $I_d = V_{d1} / (R_s + pL_d)$ ) est représenté par la figure (II.4).

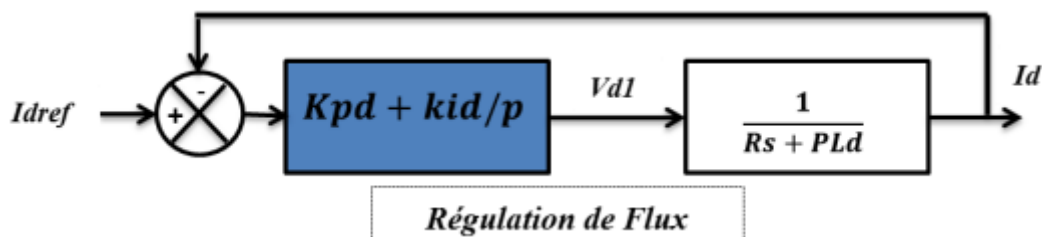
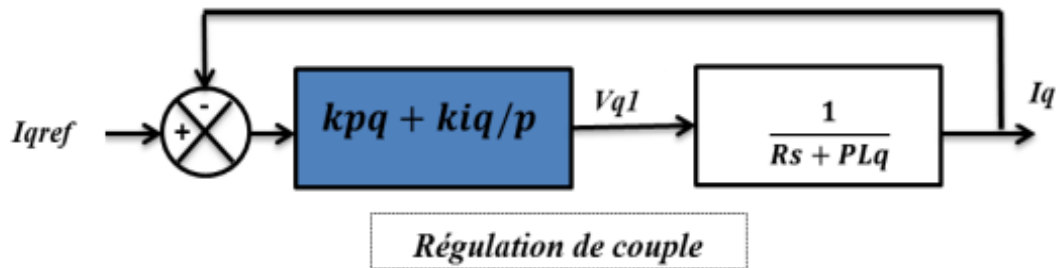


Figure II. 4 : Boucle de régulation de courant  $I_d$  [31].

##### ➤ Régulateur de courant $I_q$

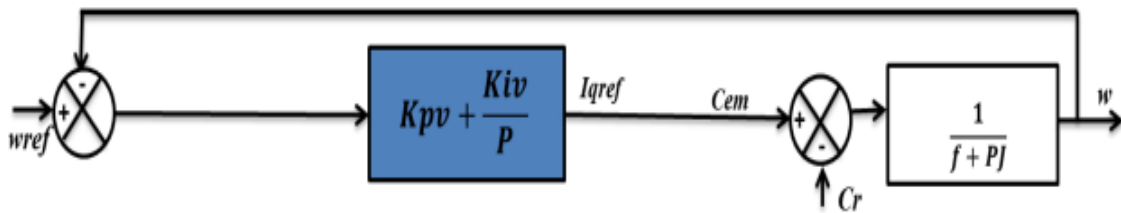
De la même manière que le calcul précédent, on détermine le régulateur du courant avec **figure (II.5)** :



**Figure II.5** : Boucle de régulation du courant  $I_q$  [31].

➤ **Régulateur de la vitesse**

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante [32] :



**Figure II.6** : Boucle de régulation de la vitesse  $\Omega$ .

### II.3 Les observateurs

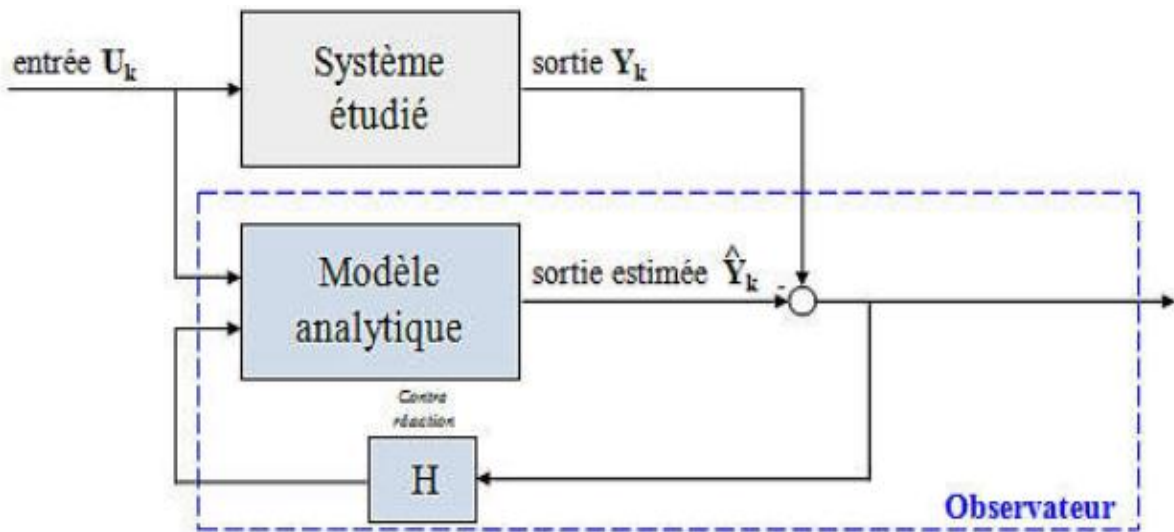
Les observateurs sont des systèmes auxiliaires qui estiment dynamiquement l'état du système en fonction des entrées et des sorties mesurées. Par conséquent, l'entrée de l'observateur est l'entrée et la sortie du système d'origine, et la sortie de l'observateur est l'état estimé.

Les observateurs sont principalement utilisés à des fins de contrôle. Il peut également être utilisé dans le domaine de la détection et de l'isolation de défauts, ou pour filtrer les mesures de bruit. [32].

#### II.3.1 Principe de fonctionnement de l'observateur

Le principe des méthodes basées sur des observateurs en boucle fermée (aussi appelés estimateurs d'état) est de reconstruire tout ou partie du vecteur d'état du système étudié à partir d'un modèle analytique fiable du système.

Système et grandeurs mesurables. **La figure (II.7)** illustre le principe d'un observateur en boucle fermée, où la matrice H représente une rétroaction négative qui minimise les effets des perturbations et Erreur de modèle [33].



**Figure II.7 :** Schéma fonctionnel d'un observateur d'état [34].

### II.3.2 Classification des observateurs

Il existe de nombreuses techniques d'observation. Elles diffèrent en fonction de la nature du système considéré (linéaire ou non linéaire), de l'environnement considéré (déterministe ou Stochastique) et, en fin, de la dimension du vecteur d'état à estimer (complet ou réduit).

En fonction de la nature du système considéré, ces observateurs peuvent être classés en deux grandes catégories [35] [36] :

#### II.3.2.1 Observateurs pour les systèmes linéaires

C'est les observateurs dont la construction du gain est basée sur une matrice "A " du système qui est linéaire et invariant dans le temps. L'observateur de Luenberger et le filtre de Kalman se basent sur cette approche.

#### II.3.2.2 Observateurs pour les systèmes non linéaires

Les systèmes peuvent être non linéaires, dans ce cas, des observateurs ont été développés pour pallier cette difficulté. On peut citer par exemple :

- des observateurs où les gains de correction sont calculés à partir d'une analyse par la méthode de Lyapounov.
- des observateurs à structure variables (modes glissants).
- des observateurs à grand gain.

En fonction de l'environnement considéré, deux grandes familles d'observateurs se distinguent [29] :

- **Observateurs de type déterministes**

Ce sont les observateurs qui ne prennent pas en compte les bruits de mesures et les fluctuations aléatoires des variables d'état : l'environnement est déterministe, parmi ces observateurs nous pouvons citer l'observateur de Luen berger.

- **Observateurs de type stochastiques**

Ces observateurs donnent une estimation optimale des états en se basant sur des critères stochastiques. Leurs observations se basent sur la présence du bruit dans le système, ce qui est souvent le cas. L'algorithme du filtre de Kalman illustre bien cette application. En fin, en fonction de la dimension du vecteur d'état, les observateurs du flux peuvent être classés en deux familles [29].

## II.4 Filtre de Kalman étendu (FKE)

Les équations du filtre de Kalman étendu sont similaires aux équations du filtre de Kalman standard à l'exception de l'équation de prédiction d'état qui est remplacée par une équation non linéaire [37]. La seule différence entre les deux groupes d'équations est la linéarisation des fonctions non linéaires par le développement de Taylor du premier ordre, c'est à dire les dérivés partiels premiers des fonctions non linéaires par rapport à l'état et les paramètres du système. Les prédictions de l'état et de la covariance d'état sont données par les équations suivantes :

- Les équations d'état dynamique de PMSM sont

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} [-R_s i_d + P_n \omega_r L_q i_q] + \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} [-R_s i_q - P_n \omega_r L_d i_d - P_n \omega_r \psi_f] + \frac{v_q}{L_q} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} P_n i_q (\psi_f - (L_q - L_d) i_d) \right] - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{T_l}{J} \end{aligned} \quad (II.4)$$

- Les équations ci-dessus écrites sous forme de représentation de l'espace d'état

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \frac{P_n \omega_r L_q}{L_d} & 0 \\ \frac{-P_n \omega_r L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} & \frac{-P_n \psi_f}{L_q} \\ \frac{-3P_n (L_q - L_d) i_q}{2J} & \frac{3P_n \psi_f}{2J} & \frac{-B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

- La représentation temporelle discrète de l'équation ci-dessus est

$$f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}, w_k) = X \quad (II.6)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_d} & \frac{P_n \omega_r L_q T_s}{L_d} & 0 \\ \frac{-P_n \omega_r L_d T_s}{L_q} & 1 - \frac{R_s T_s}{L_q} & \frac{-P_n \psi_f T_s}{L_q} \\ \frac{-3P_n(L_q - L_d)i_q T_s}{2J} & \frac{3P_n \psi_f T_s}{2J} & 1 - \frac{B T_s}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} T_s & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} T_s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

- La matrice de gradient est donnée comme

$$\mathbf{F}_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x_k} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_d} & \frac{P_n \omega_r L_q T_s}{L_d} & 0 \\ \frac{-P_n \omega_r L_d T_s}{L_q} & 1 - \frac{R_s T_s}{L_q} & \frac{-P_n \psi_f T_s}{L_q} \\ \frac{-3P_n(L_q - L_d)i_q T_s}{2J} & \frac{3P_n \psi_f T_s}{2J} & 1 - \frac{B T_s}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial h_k}{\partial x_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

- Estimation de la matrice de covariance

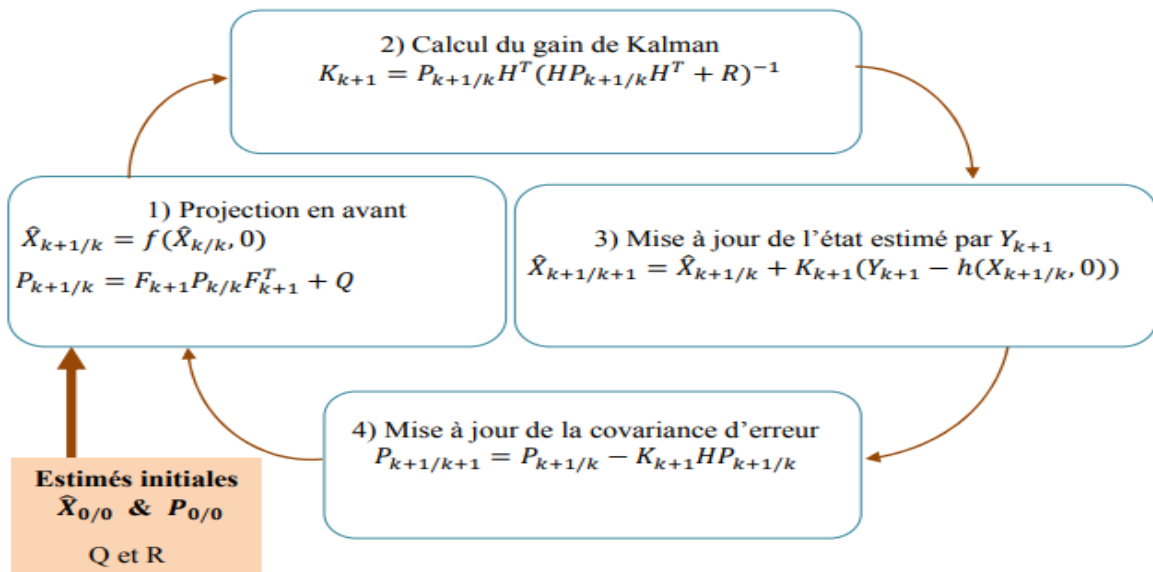


Figure II.8 : Boucle du filtre de Kalman étendu.

#### II.4.1 La stratégie de réglage des matrices de covariance Q et R

Ce sont via ces matrices que passeront les différents états mesurés, prédits et estimés. Leur but est de minimiser les erreurs liées à une modélisation approchée et à la présence de bruits sur les mesures. La détermination des matrices Q et R est très délicate puisque les caractéristiques stochastiques des bruits ne sont généralement pas connues.



$$f(K - 1) = \begin{Bmatrix} I_d(k) + \left( \frac{V_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} I_d + \omega \frac{L_q}{L_d} I_q \right) * T_s \\ I_q(k) + \left( \frac{V_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} I_q - \omega \frac{L_d}{L_q} I_d - \frac{\varphi_f}{L_q} \omega \right) * T_s \\ \omega(k) \\ \theta(k) + \omega * T_s \end{Bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

### II.5.2 L'algorithme de EKF

L'algorithme de FKE nécessite à chaque instant le calcul des matrices de linéarisation F et H. Elles sont données comme suit :

$$F = \frac{df}{dx} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s * R_s}{L_d} & \frac{T_s * L_q}{L_d} P\Omega & \frac{T_s * L_q}{L_d} I_q & 0 \\ -\frac{T_s * L_d}{L_q} P\Omega & 1 - \frac{T_s * R_s}{L_d} & T_s * \left( -\frac{L_d}{L_q} I_d - \frac{\varphi_f}{L_q} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & T_s & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Les termes de la matrice H sont dépendants sur l'état du système et, par conséquent, la matrice H est variable dans le temps.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Les paramètres de la machine choisie sont donnés dans l'annexe A [38]. En utilisant des méthodes d'essai et d'erreur, pour sélectionnés les valeurs Q et R pour assurer la meilleure stabilité ( $q_1=1e-11$  et  $r=1e-8$ ).

Dans ce cas les paramètres du filtre sont ceux des bruits eux-mêmes [39], par conséquent :

$$Q = \text{COV} (ww^t) = E[w(k) w^t(k)] = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e-9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e-9 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$R = E [V(k) V^t (k)] = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \tag{II.14}$$

### II.6 Simulation de la commande avec et sans capteur de vitesse du MSAP

Dans ce qui suit sont présentés la simulation d'estimation de vitesse de la MSAP par utilisation du filtre de Kalman étendu :

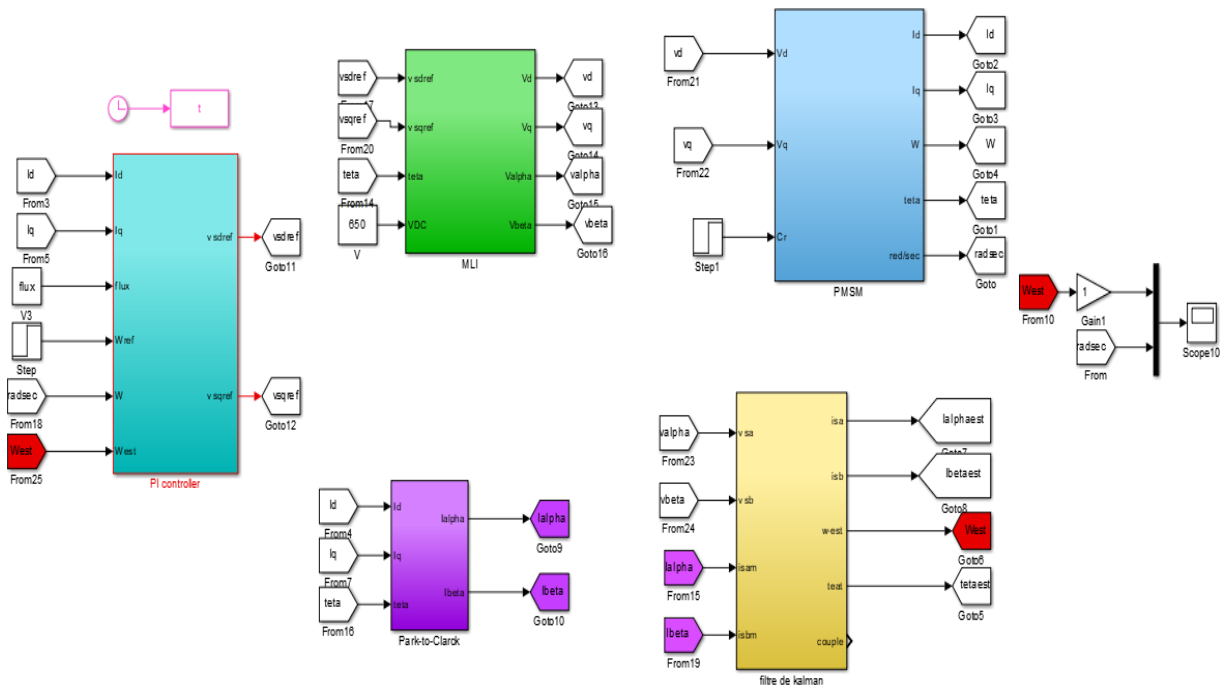
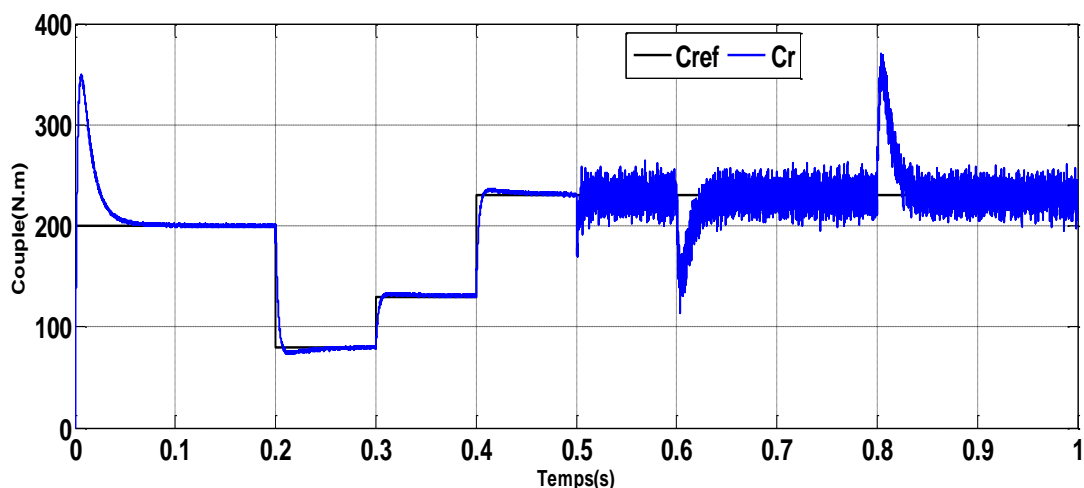
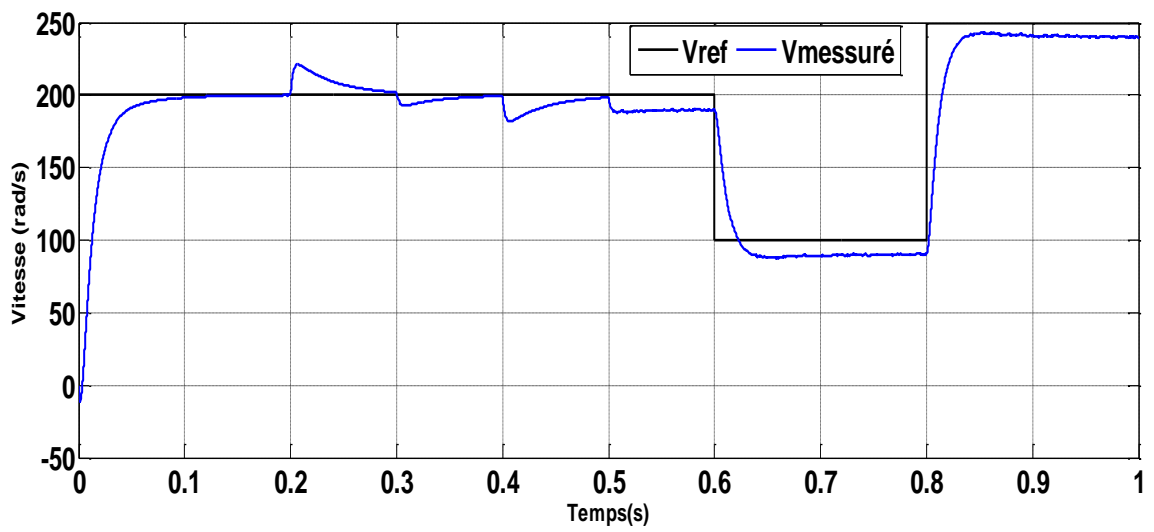
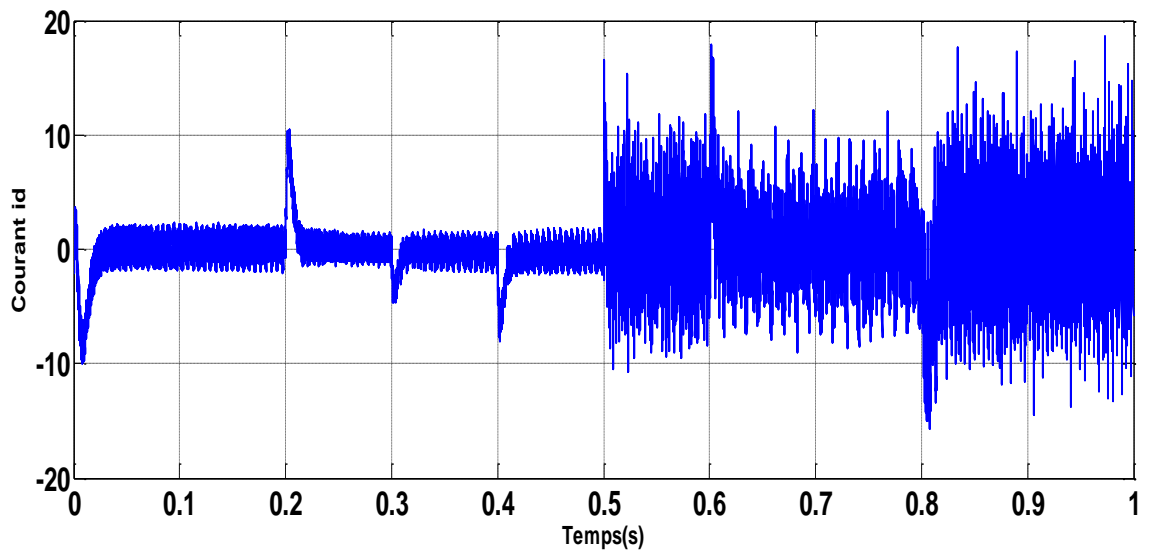
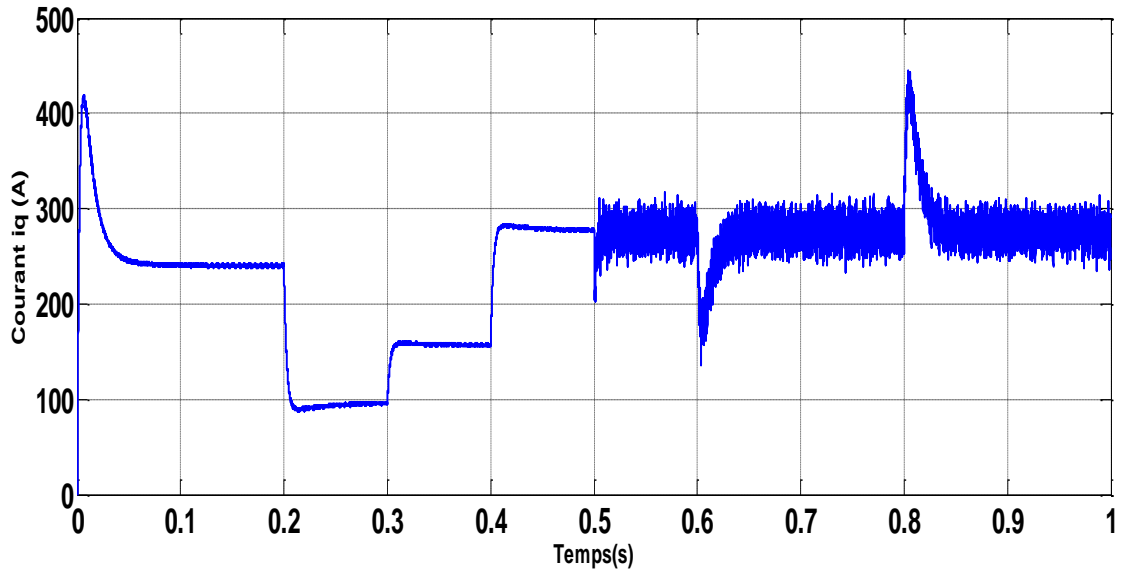


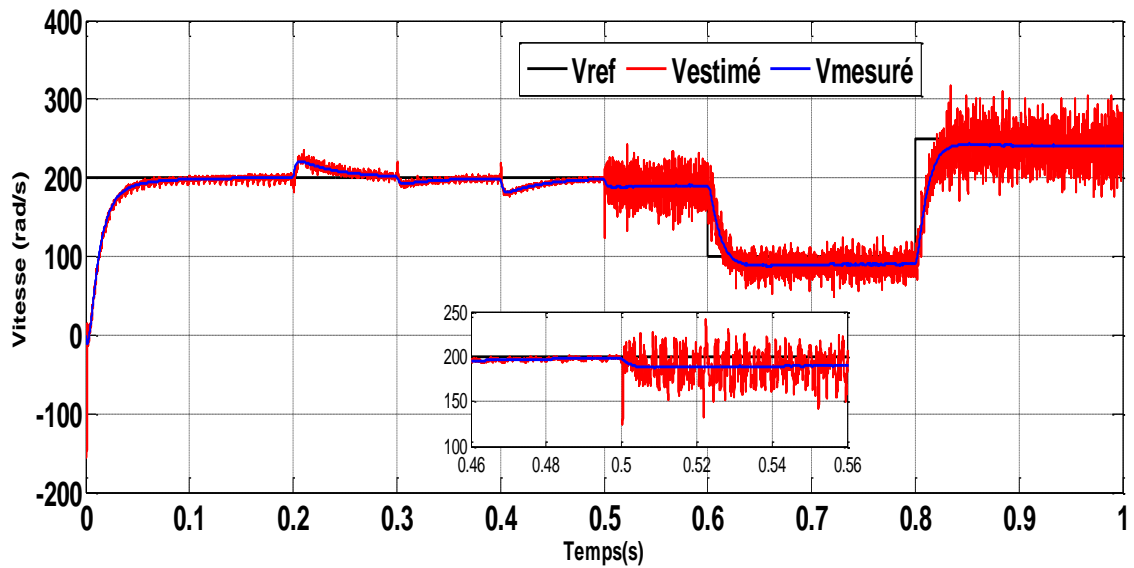
Figure II.10 : simulation de l'estimation de vitesse du MSAP avec EKF.

#### II.6.1 Résultats de simulation

Les figures (II.11) montrent que les résultats de simulation de commande de vitesse avec et sans capteur :







**Figure II.11** : résultats de simulation de commande de vitesse du MSAP avec capteur et sans capteur (avec EKF à  $t=0.5$  s).

### II.6.2 Interprétation des Résultats

D'après les résultats de simulation de la commande avec capteur et sans capteur (EKF), on remarque que le filtre donne une réponse pas cible et aussi des fluctuations important par rapport à la vitesse.

L'allure de couple se présente par des fluctuations importantes à l'instant 0.5 s (cas de filtre kalman étende), donc le couple c'est l'image du courant iq.

Le défaut de filtre se manifesté à la marge de fluctuation a le couple et la vitesse plus de 15% à la vitesse nominal pour  $t=0.5$  s.

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la commande vectorielle de moteur synchrone à aimant permanent ont utilisé l'estimateur de Kalman étendu que représente un outil mathématique capable de déterminer des grandeurs d'états non mesurables évolutives ou des paramètres du système à partir des grandeurs physiques mesurables.

Les résultats de simulation montrent que le contrôle de vitesse permet d'obtenir des performances pas satisfaisantes, EKF il est toujours capable de suivre la machine MSAP mais avec vitesse supérieur à la vitesse nominal.

Pour l'amélioration des performances de commande sans capteur on faire un ajustement optimal pour les gains des régulateurs (PI) et les matrices de covariance Q et R ont utilisé les méthodes de calcul automatique (les méthodes d'optimisation) basée sur la minimisation d'une fonction objective (erreur d'estimation) constituera l'objet principal de troisième chapitre.

# **Chapitre III :**

*Les algorithmes d'optimisation*

### III.1 Introduction

Les problèmes d'optimisation présentent généralement un grand nombre de solutions non optimales. En pratique, l'objectif n'est pas d'obtenir à un optimum absolu, mais seulement à une bonne solution, et la garantie de l'inexistence d'une solution sensiblement meilleure. Pour atteindre cet objectif au bout d'un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes appelées "méta heuristiques " [40].

Les régulateurs classiques (PI) donne toujours des meilleurs résultats pour un réglage de vitesse mais l'inconvénient majeur de ses régulateurs reste la sensibilité pour les changements des paramètres de la machine, on cherche à exploiter des méthodes modernes pour un besoin pressant afin d'améliorer leurs performances de plus en plus élevées.

Dans ce chapitre nous sommes intéressés pour améliorer les performances du filtre de Kalman étendue EKF pour contrôler la vitesse en cas d'absence de capteur de vitesse en utilisant des nouvelles techniques d'optimisation sur le système de commande sans capteur de vitesse.

### III.2 Principe de l'optimisation

L'optimisation est le fait d'obtenir le meilleur résultat dans des circonstances données. Dans tout domaine d'ingénierie, les ingénieurs doivent prendre beaucoup de décisions technologiques et de gestion. Le but ultime de toutes ces décisions est soit minimiser l'effort requis ou maximiser le bénéfice souhaité. Cependant, l'effort et le bénéfice dans toute situation. Concrète peut se modéliser en une fonction cout de certaines variables de décision. L'optimisation peut être définie comme le processus de trouver les variables qui donnent le maximum ou minimum de cette fonction, sans ou avec contraintes [41].

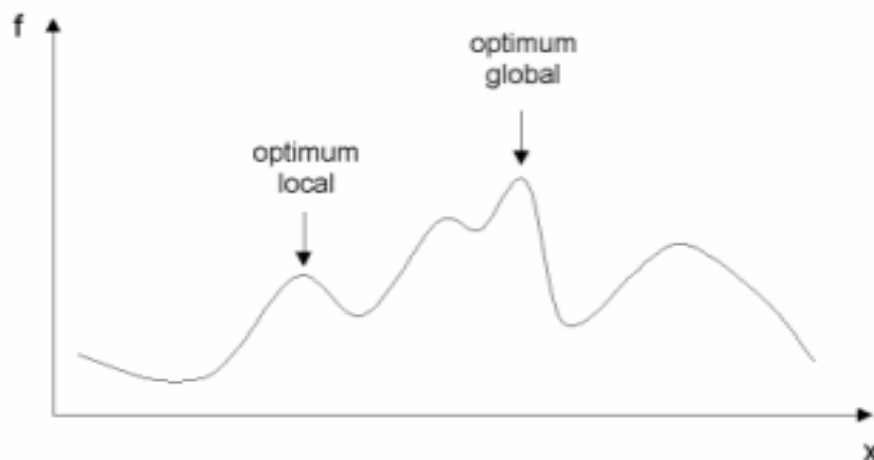


Figure III.1 : Principe d'optimisation.

### III.3 Classification des méthodes d'optimisations

Pour résoudre un problème d'optimisation, il est important de bien identifier à quelle catégorie ce problème appartient. En effet, les algorithmes développés sont conçus pour résoudre un type de problème donné et sont peu efficaces pour un type différent. La classification des problèmes d'optimisation change d'un auteur à l'autre.

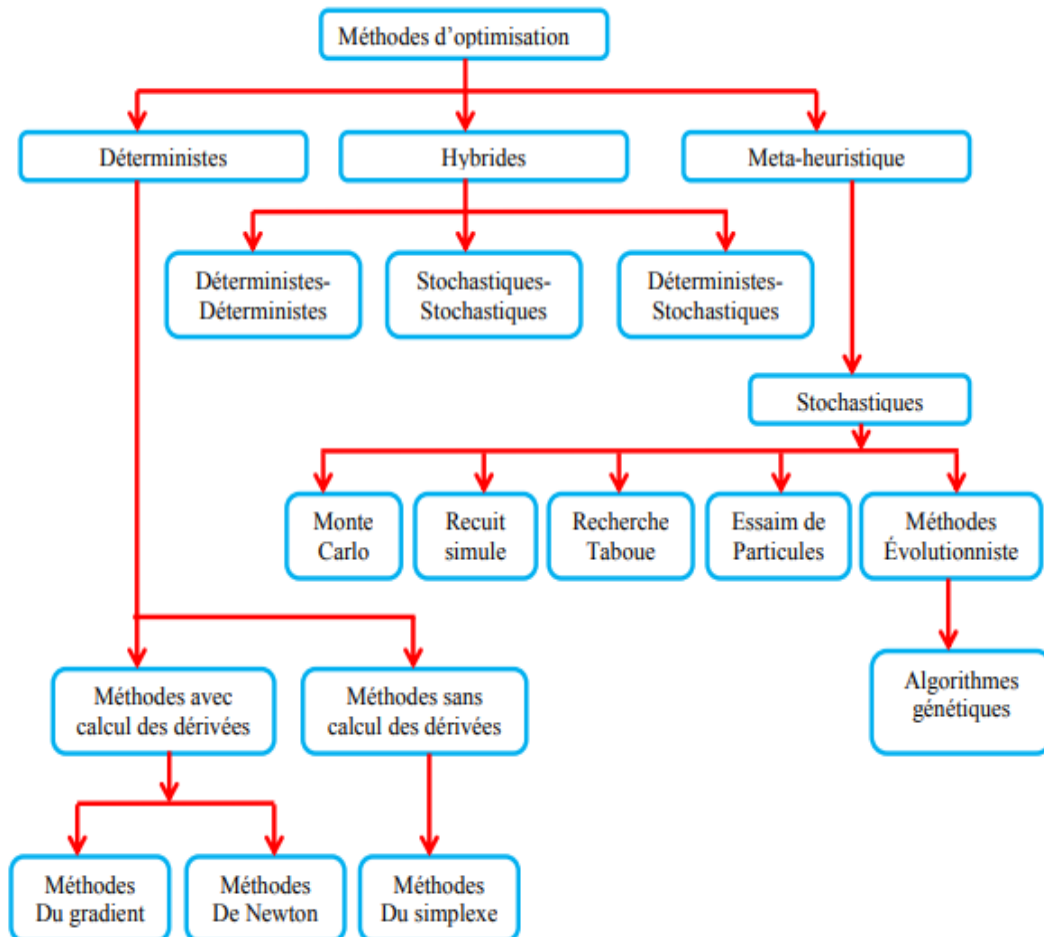


Figure III.2 : Classification des méthodes d'optimisation [42].

#### III.3.1 Méthodes d'optimisation déterministes

Les méthodes déterministes se divisent en deux classes principales : les méthodes d'exploration directe et les méthodes d'exploration indirecte.

Les méthodes indirectes cherchent à atteindre les extrema locaux en résolvant les systèmes d'équations, souvent non linéaires, obtenus en annulant le vecteur gradient de la fonction étudiée. La recherche d'un extremum hypothétique commence par la restriction de l'espace de recherche aux points de pente nulle dans toutes les directions.

Les méthodes d'exploration directes recherchent les optima locaux en se déplaçant dans une direction qui dépend du gradient de la fonction. Pour trouver un minimum local, on peut emprunter la direction de la plus forte pente.

Les méthodes déterministes sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide, ou quand la forme de la fonction est connue à priori.

### III.3.2 Méthodes d'optimisation stochastiques

Ces méthodes sont basées sur une approche en partie ou entièrement guidée par un processus stochastique (aléatoire). Contrairement aux méthodes déterministes, leur convergence n'est pas garantie, ou, dans le meilleur des cas, elle est garantie de manière asymptotique (c'est-à-dire pour un nombre infini d'itérations). La méthode stochastique la plus simple est l'échantillonnage aléatoire (ou méthode de Monte-Carlo) qui consiste à évaluer des points engendrés de façon aléatoire et à conserver le meilleur. Son avantage est d'être simple et très facile à implémenter, mais elle présente un sérieux inconvénient : elle n'est pas efficace, et exige souvent un nombre élevé d'itérations pour donner une solution acceptable [40].

Parmi les différentes méthodes stochastiques d'optimisation globale, nous intéressons à Heuristiques (ou approximations). Contrairement aux méthodes dites exactes, ces les heuristiques ne fournissent pas nécessairement des solutions optimales, mais seulement de bonnes Selon disponibilité. L'heuristique peut être conçue pour résoudre une classe de problèmes donné, ou comme méthode générale applicable à divers problèmes d'optimisation (méta-heuristique). Parmi ces dernières on peut distinguer : la méthode des colonies de fourmis, la méthode algorithmique Génétique et optimisation des essaims de particules.

## III.4 La méthode d'optimisation PSO

### III.4.1 Introduction

L'optimisation par Essaim de Particules (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [43].

Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés

d'oiseaux [44]. L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (la vectrice solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.



(a) Colonie de fourmis



(b) Groupe de poissons migrateurs



(c) Groupe d'abeilles



(d) Volée d'oiseaux en formation de V

**Figure III.3** : Principe de la méthode PSO [42].

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécu [45].

Cette méthode permet, aux particules de faire converger tous les résultats vers un même point, l'optimum de la fonction ou du problème posé. Dans ce chapitre, nous allons détailler le principe de fonctionnement d'une PSO.

### III.4.2 Définition de la méthode

L'optimisation par essaim de particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'hyper-espace de recherche et constituent, chacune, une solution potentielle. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. À partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage.

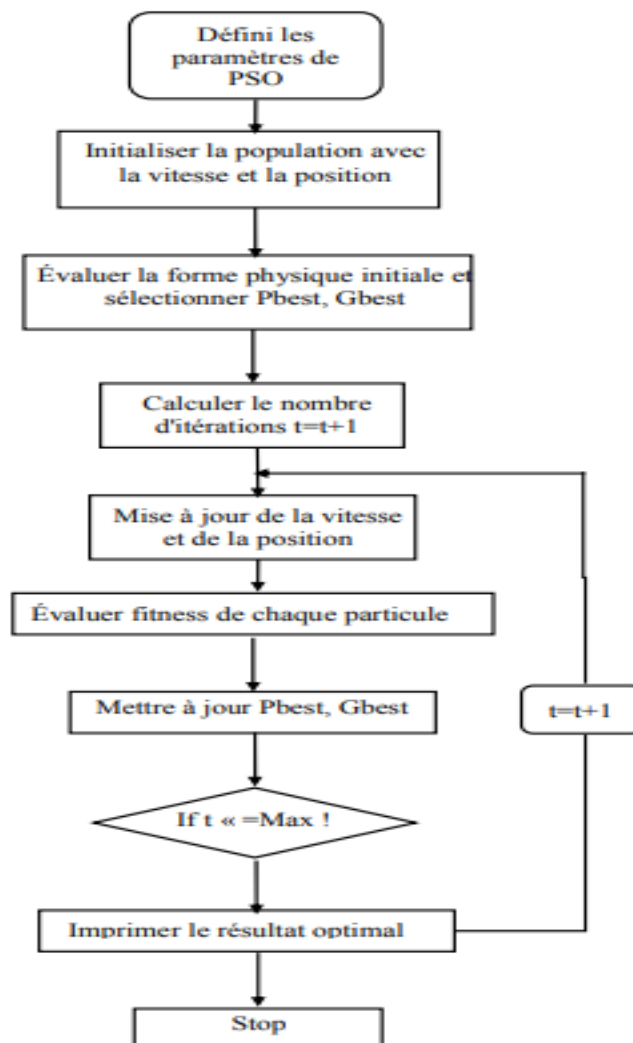


Figure III.4 : principe d'algorithme de PSO [44].

### III.4.3 Formalisation mathématique

Une particule  $i$  de l'essaim dans un espace de dimension  $D$  est caractérisée, à l'instant  $t$ , par :

- a)  $\mathbf{X}$  : sa position dans l'espace de recherche.
- b)  $\mathbf{V}$  : sa vitesse.
- c)  $\mathbf{P}_b$  : la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée.
- d)  $\mathbf{P}_g$  : la position de la meilleure solution connue de tout l'essaim.
- e)  $F(\mathbf{P}_b)$  : la valeur de fitness de sa meilleure solution.
- f)  $F(\mathbf{P}_g)$  : la valeur de fitness de la meilleure solution connue de tout l'essaim.

Le déplacement de la particule  $i$  entre les itérations  $t$  et  $t+1$  se fait selon les deux équations [40] et [41] [46] :

- j)  $\mathbf{C}_1$  et  $\mathbf{C}_2$  : deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération, elles peuvent être non constantes dans certains cas selon le problème d'optimisation posé.
- k)  $\mathbf{r}_1$  et  $\mathbf{r}_2$  : deux nombres aléatoires tirés de l'intervalle  $[0,1]$ .

### III.4.4 Configuration de la méthode

Il existe plusieurs paramètres qui interviennent et influencent la performance de la méthode PSO. Le choix de ces paramètres reste critique et dépend généralement du problème posé [47], [48], mais a une grande influence sur la convergence de l'algorithme.

#### 1) Nombre de particules :

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

#### 2) Topologie du voisinage :

La topologie du voisinage défini avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées :

a) topologie en étoile : chaque particule est reliée à toutes les autres, ie. L'optimum du voisinage est l'optimum global.

b) topologie en anneau : chaque particule est reliée à n particules (en général, n = 3), c'est la topologie la plus utilisée.

c) topologie en rayon : les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale.



**Figure III.5** : Trois topologies du voisinage : (a) anneau (avec  $n=2$ ), (b) rayon, (c) étoile [45].

Le voisinage géographique auquel nous sommes amenés à penser en premier lieu n'est pas nécessairement pertinent car, d'une part, il s'agirait d'un voisinage trop local, et d'autre part car la sociabilisations des particules tend à rendre tout voisinage social en voisinage géographique. Enfin, c'est un voisinage très lourd en termes de calculs car nécessitant de recalculer le voisinage de chaque particule à chaque itération.

### 3) Coefficients de confiance :

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires  $\rho_1$  et  $\rho_2$  peuvent être définis de la façon suivante :

Où  $r_1$  et  $r_2$  suivent une loi uniforme sur  $[0,1]$  et  $c_1$  et  $c_2$  sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation  $c_1 + c_2 \leq 4$ .

### 4) Vitesse maximale et coefficient de constriction :

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale (notée  $V_{\max}$ ) pour améliorer la convergence de l'algorithme.

Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction  $k$  [40] et qui permet de resserrer l'hyper-espace de recherche.

L'équation de la vitesse devient alors :

$$\vec{v}_i(t) = k \cdot (\vec{v}_i(t-1) + \rho_1 \cdot (\vec{x}_{\text{phesti}} - \vec{x}_i(t)) + \rho_2 \cdot (\vec{x}_{\text{vbesti}} - \vec{x}_i(t))) \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Avec :} \quad k = 1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\sqrt{|\rho^2 - 4\rho|}}{2} \quad (\text{III.2})$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 > 4$$

Les études [42] indiquent que l'utilisation d'un coefficient de constriction donne généralement un meilleur taux de convergence sans avoir à fixer de vitesse maximale. Cependant, dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de fixer  $V_{\text{max}}=X_{\text{max}}$  en plus du coefficient de constriction, ce qui, selon les études de SHI et EBERHART [49], permet d'améliorer les performances globales de l'algorithme.

#### 5) Facteur d'inertie :

Le facteur d'inertie  $\Psi$  introduit par SHI et EBERHART permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode.

Une grande valeur de ( $\Psi > 1$ ) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc, in fine, d'exploration globale. À contrario, une faible valeur de ( $\Psi < 1$ ) est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc, d'exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale. Le calcul de la vitesse est alors défini par :

La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyper-espace exploré et aucune valeur de  $\Psi$  ne peut garantir la convergence vers la solution optimale.

Les études menées par SHI et EBERHART indiquent une meilleure convergence pour  $\Psi \in [0.8, 1.2]$ . Au-delà de 1.2, l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

Enfin, il est également possible de faire diminuer le facteur d'inertie au cours du temps, un peu à la manière de la température dans un algorithme de recuit simulé

(Simulated Annealing). De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0.9 à 0.4.

6) Initialisation de l'essaim :

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisés aléatoirement selon une loi uniforme sur  $[0,1]$ . Cependant, en ce qui concerne la position des particules, il est préférable d'utiliser un générateur de séquence de SOBOL qui est plus pertinent dans la disposition homogène des particules dans un espace de dimension  $n$ .

7) Critères d'arrêt :

Le critère d'arrêt diffère suivant le problème d'optimisation posé et les contraintes de l'utilisateur, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie puisque la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait plusieurs études ont été menées dans ce sens [50], différentes propositions ont eu lieu : l'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence n'a pas été atteint cela peut être : le nombre maximum d'itérations ; l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "précision acceptable". D'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés selon le problème d'optimisation posé et des contraintes utilisateurs.

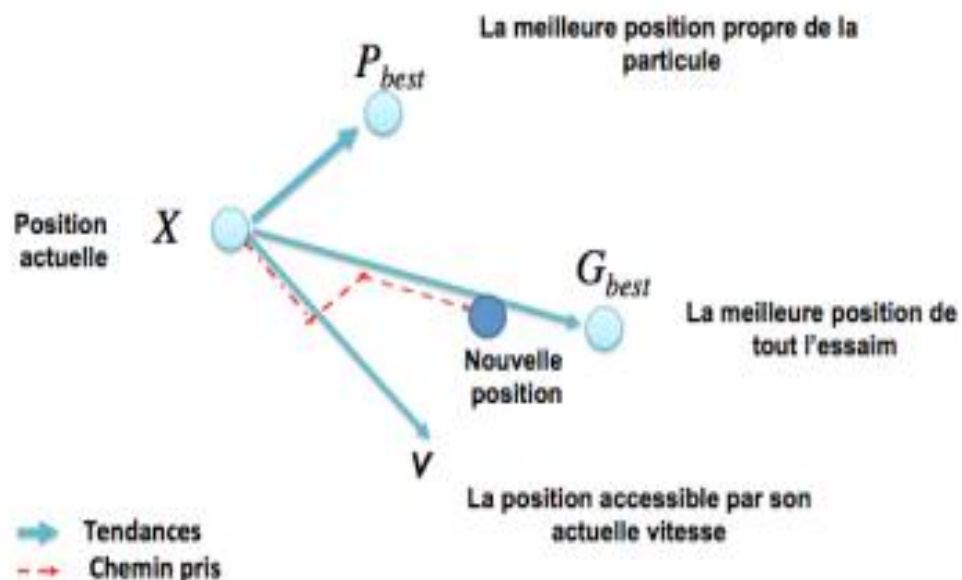


Figure III.6 : Déplacement d'une particule [52].

## III.5 Algorithmes génétiques

### III.5.1 Introduction

Les algorithmes génétiques (Génétiq ue Algorithm e GA) sont des algorithmes d'optimisation inspirés de la théorie de l'évolution des espèces de Charles Darwin. Les premiers travaux de John Holland remontent aux années 1960 et ont trouvé un premier aboutissement en 1975 avec la publication de « Adaptation in Natural and Artificiel Systèmes ». C'est cependant l'ouvrage de David Goldberg qui a largement contribué à développer les algorithmes génétiques. Un algorithme génétique est basé sur une population d'individus dont chacun est une solution candidate du problème. Chaque solution doit être codée. Cette représentation codée et appelée chromosome, et est composée de gènes. Le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement est exprimé par la valeur de la fonction coût (fonction objectif) correspondante. La taille de la population reste constante tout au long de l'algorithme génétique. La recherche de la solution est réglée par trois opérateurs qui sont appliqués successivement. La phase de coopération est gouvernée par un opérateur de sélection et un opérateur de croisement alors que la phase d'adaptation individuelle fait appel à un opérateur de mutation. La création d'une nouvelle génération est obtenue par itération de l'algorithme génétique qui va créer de nouveaux individus et en détruire d'autres (mécanisme de sélection naturelle) ce qui permet le renouvellement de la population (l'ensemble des solutions courantes). L'exploration de l'espace de recherche est alors réalisée par les opérateurs de mutation et assure la diversification des individus de la population (et donc des solutions). L'exploitation, quant à elle, est assurée par les opérateurs de croisement, qui recombinent les solutions, afin de les améliorer en conservant leurs meilleures caractéristiques [53].

### III.5.2 Principe de fonctionnement

Pour les algorithmes génétiques, nous essayons de simuler le processus d'évolution d'une population. Nous partons d'une population de N solutions du problème, représentées par des individus. Cette population choisie aléatoirement est appelée population parent. Le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement est exprimé par la valeur de la fonction coût  $f(x)$  où  $x$  est la solution que l'individu représente. On dit qu'un individu est d'autant mieux adapté à son environnement, que le coût de la solution qu'il représente est plus faible. Au sein de cette population, interviennent alors plusieurs méthodes de sélection d'un ou de deux parents, qui produisent une nouvelle solution, à travers les opérateurs génétiques, tels que le croisement et la mutation. Ces opérateurs

permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace des autres solutions possibles. L'opérateur de croisement (crossing-over) recompose les gènes d'individus existant dans la population. L'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploitation de l'espace de solutions [53]. Le mécanisme de sélection des individus permettant d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les moins bons. La nouvelle population, obtenue par le choix de N individus parmi les populations parent et enfant, est appelée génération suivante. En itérant ce processus, on produit une population plus riche en individus mieux adaptés.

### III.5.2.1 Principales caractéristiques

Les algorithmes génétiques présentent plusieurs avantages tels que :

- ✓ La simplicité de l'approche
- ✓ La possibilité de paralléliser l'algorithme
- ✓ La facilité d'implémentation
- ✓ La flexibilité : peut être facilement modifié pour d'autres problèmes
- ✓ Il gère les problèmes d'optimisation multi-objectif et multimodale
- ✓ Il permet une bonne exploration de l'espace de recherche

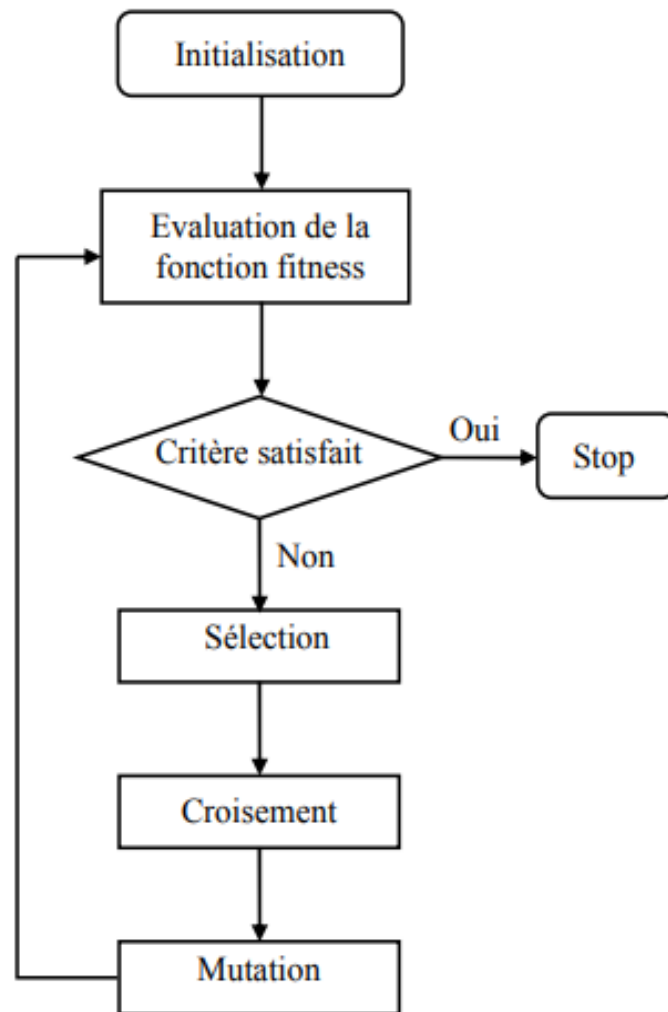
D'autre part, il existe des limites pour cet algorithme tels que :

- ✓ Le problème de représentation de la solution,
- ✓ L'ajustement de différents paramètres : taille de population, taux de mutation,
- ✓ Son exécution qui est lente par rapport à d'autres méthodes bio-inspirées,
- ✓ Sa convergence prématurée,
- ✓ Il ne peut pas garantir des temps de réponse constants.

### III.5.3 Domaines d'applications

- ✓ Problème de voyageur de commerce.
- ✓ Robotique.
- ✓ Optimisation des structures mécanique.
- ✓ Optimisation de fonction numérique.
- ✓ Optimisation de réseaux (Gaz, Fluide, Télécommunication).

- ✓ Routage dans les réseaux.
- ✓ Construction des cartes génétiques.
- ✓ Bio-informatique (alignement des séquences ADN).
- ✓ Ordonnancement



**Figure III.7 :** Organigramme des algorithmes génétiques

### III.6 L'optimisation de système de la commande sans capteur de vitesse

Le système de commande sans capteur basé principalement sur les régulateurs de commande et le filtre de Kalman étendu sera l'objet d'une optimisation des deux sous-systèmes.

#### III.6.1 Critères de performance

L'intérêt d'un système de commande est de minimiser l'écart  $e(t)$  entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. Pour choisir un bon réglage du régulateur, on prend en compte l'amplitude maximum de l'écart et la durée nécessaire pour qu'il s'annule après une perturbation ou un changement de consigne [55]. Il existe plusieurs critères numériques permettant de mesurer la qualité d'un réglage donné. Parmi ces critères on peut citer [56] :

##### III.6.1.1 Intégrale de la valeur absolue de l'erreur (IAE)

L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur est donnée par :

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| \cdot dt \quad (\text{III.3})$$

Ce critère exprime la surface générée par la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle, et son rôle c'est d'éliminer les petites erreurs [56].

##### III.6.1.2 Intégrale du carré de l'erreur (ISE)

L'intégrale du carré de l'erreur est donnée par :

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 \cdot dt \quad (\text{III.4})$$

L'intérêt de cet indice de performance est de corriger les systèmes dont le régime transitoire qui dure trop longtemps, et tient beaucoup moins compte des dépassements inférieurs à 1.

##### III.6.1.3 Intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps (ITAE)

L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps est donnée par :

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (\text{III.5})$$

L'introduction du paramètre temps, va corriger les systèmes à réponse très oscillatoire.

##### III.6.1.4 Intégrale du carré de l'erreur pondérée par le temps (ITSE)

L'intégrale du carré de l'erreur pondérée par le temps est donnée par :

$$ISE = \int_0^{\infty} t \cdot e(t)^2 \cdot dt \tag{III.6}$$

Ce critère met peu l'accent sur les erreurs initiales et pénalise fortement les erreurs qui se produisant vers la fin de la réponse transitoire à une entrée échelon.

### III.6.2 L'optimisation des gains des régulateurs de la commande

Les régulateurs PI (Proportionnel, Intégral) sont encore largement utilisés dans le milieu industriel malgré l'émergence d'autres méthodes de régulation en raison de leur faible prix, de leur simplicité de conception et d'utilisation.

Le régulateur PI est basé sur une structure très simple dont le fonctionnement ne dépend que de deux coefficients, qui sont les gains appliqués sur les signaux : proportionnel ( $K_p$ ), intégral ( $K_i$ ) : l'action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et l'action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [55].

Pour ajuster les valeurs du régulateur de commande PI ( $K_p$  et  $K_i$ ), on va utiliser l'algorithme de génétiques et PSO ou la fonction objective est basée sur l'erreur entre le signal de référence et le signal réel issu des mesures de la machine.

On a utilisé la fonction objective avec le critère d'optimisation **IAE** pour réduire au minimum l'erreur entre la vitesse de référence et la vitesse réelle de la machine.

La figure (III.8) présente le schéma bloc global d'implantation de l'algorithme (Ga et PSO) pour l'ajustement des gains  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur PI associé à la commande vectorielle de la MSAP :

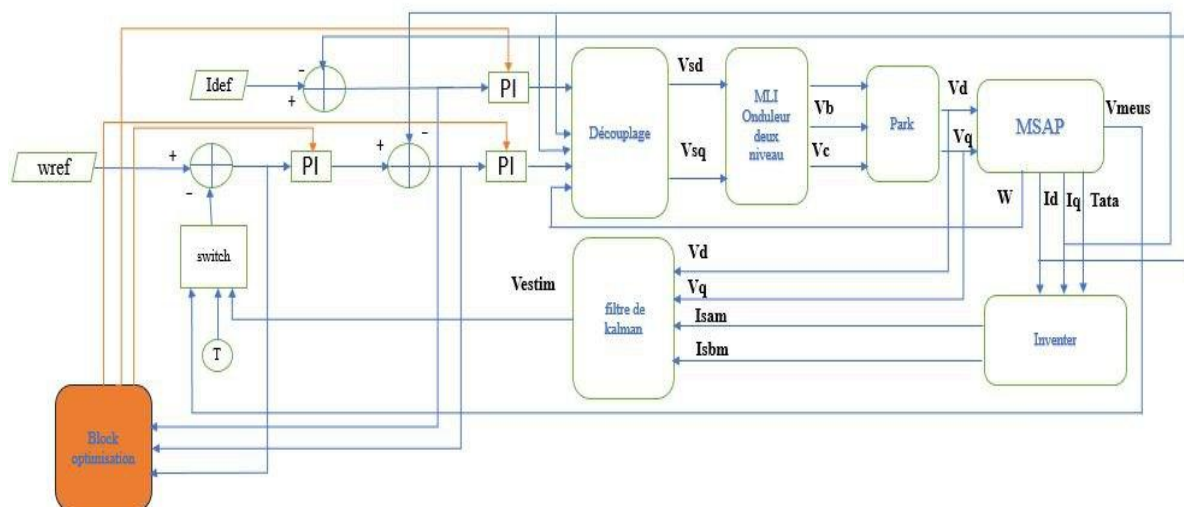


Figure III.8 : Schéma bloc d'optimisation des gains des régulateur (PI) de commande

**III.6.3 Optimisation de la conception de algorithmes EKF**

Selon la théorie des algorithmes de filtrage de Kalman, Q, P et R sont des matrices inconnues et ces matrices doivent être obtenues à partir des propriétés stochastiques des bruits [57], [58], [59]. Par conséquent, dans la plupart des cas, on utilise le réglage expérimental d'essais et d'erreurs pour obtenir la meilleure estimation d'état. Trouver les paramètres corrects de ces matrices de covariance peut se refléter sur l'estimation d'état précise basée sur les algorithmes de filtre de Kalman.

La fonction d'objective minimiser l'erreur entre la vitesse estimée et la vitesse mesurée, pour obtenir une estimation précise pour le control de vitesse avec l'observateur de Kalman étendue.

**III.6.3.1 Les variables de conception**

Les variables de conception sont les coefficients des matrices Q, et R :

$$Q = \text{diag}[Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 ]$$

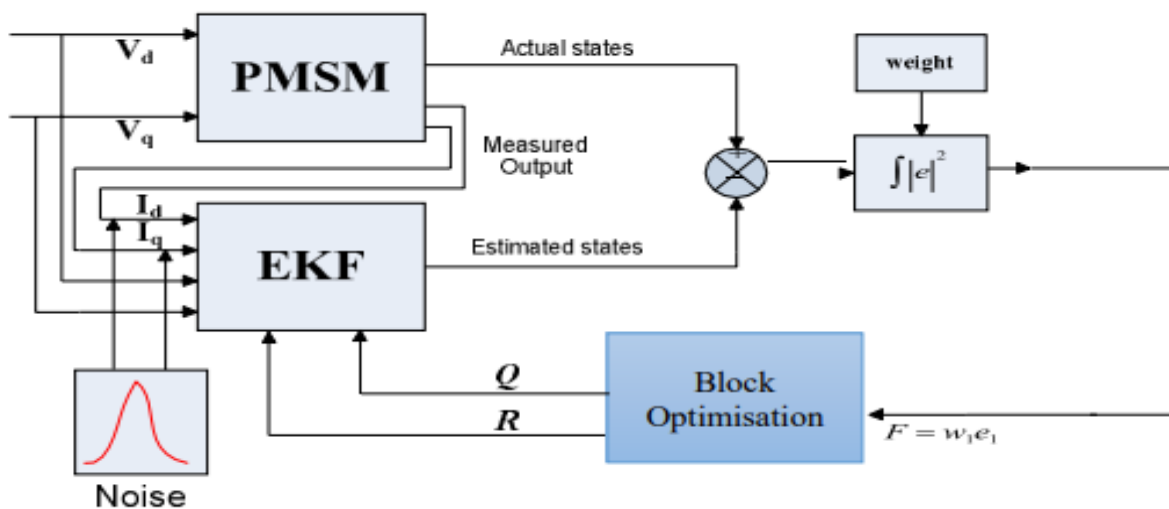
$$R = \text{diag}[R_1 \ R_2]$$

**III.6.3.2 La fonction d'objective**

On a utilisé la forme de ISE pour minimiser l'erreur entre la vitesse estimée et la vitesse mesurée :

$$\text{ISE} = \int (\omega_{r-act} - \omega_{r-est})^2 . dt \quad \text{(III.5)}$$

La figure III.9 suivent montre le bloc d'optimisation sur Matlab/Simulink :



**Figure III.9 :** schéma bloc d'optimisation de filtre de Kalman étendu

### III.6.4 L'algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation de fonction objectif est utilisé pour trouver les variables de conception optimales basées sur la maximisation ou la minimisation du vecteur des fonctions objectives. Dans cet travail l'algorithme d'optimisation est utilisé pour trouver des matrices de covariance d'état et de bruit (Q et R) basées sur la minimisation de ISE entre la vitesse mesurée et estimée par EKF. Et la minimisation de la fonction objective des gains de commande IAE pour ajuster les valeurs du régulateur de commande PI ( $K_p$  et  $K_i$ ) en utilisant deux techniques d'optimisation génétique algorithme GA et PSO.

### III.7 Résultats de simulation

Après l'application d'optimisation avec programme a été développé en utilisant MATLAB (optimtool). Les simulations obtenues à simulation à ( $Cr=80N.m$  à  $t=0.2$  et  $Cr=50N.m$  à  $t=0.3$  et  $Cr=100N.m$  à  $t=0.4$ ) et avec vitesse ( $w=100rad/s$  à  $t=0.6s$  et  $w=150rad/s$  à  $t=0.8s$ ). Représentées sur la **figure (III.10)** :

➤ **Algorithmes génétiques**

**Tableau III.1** : Résultat d'optimisation des gains avec la technique AG pour la même taille de population (5)

Les résultats d'optimisations des gains de la commande	
Le régulateur de courant Id	$K_p = 7.90087386188510$
	$K_i = 530.381456968950$
Le régulateur de courant Iq	$K_p = 3.87305563142996$
	$K_i = 469.824548849359$
Le régulateur de vitesse	$K_p = 3.82473184909560$
	$K_i = 587.477463554283$
La fonction d'objective	0.9421395047358914

**Tableau III.2** : Résultat d'optimisation de EKF avec la technique AG pour la même taille de population (5)

<b>Les résultats d'optimisations du EKF</b>	
<b>Les Valeurs des éléments des matrices Q et R</b>	$q_1= 548.699128129531$
	$q_2= 760.841165869653$
	$q_3= 423.903161333720$
	$q_4= 521.333671049990$
	$r_1=r_2= 1$
<b>La fonction d'objective</b>	0.9421395047358914

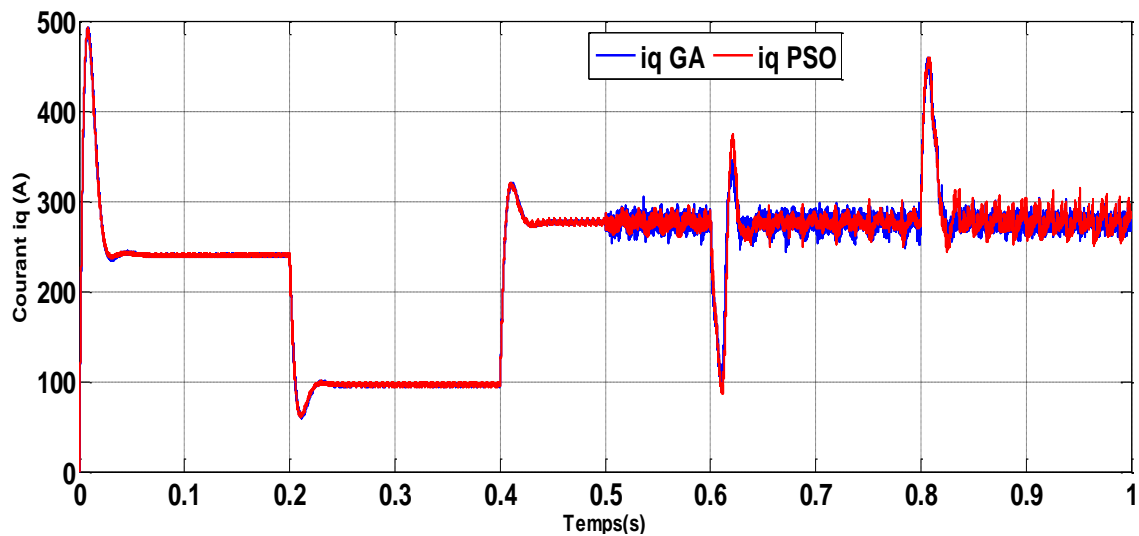
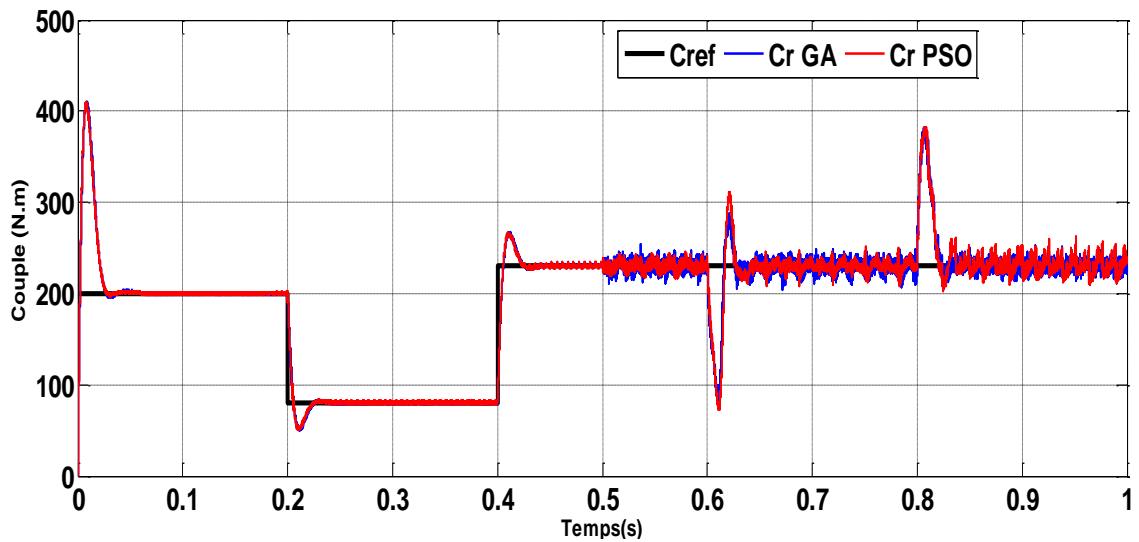
➤ **Particule Swarm optimisation (PSO)**

**Tableau III.3** : Résultat d'optimisation des gains avec la technique PSO pour la même taille de population (5) et 50 itérations

<b>Les résultats d'optimisations des gains de commande</b>	
<b>Le régulateur de courant Id</b>	$K_p= 3.54435633432221$
	$K_i= 900$
<b>Le régulateur de courant Iq</b>	$K_p= 1.52574896574711$
	$K_i= 919.365784419024$
<b>Le régulateur de vitesse</b>	$K_p= 3.91478931521441$
	$K_i= 600$
<b>La fonction d'objective</b>	50 Swarm.Gbest. O=0.54471

**Tableau III.4** : Résultat d'optimisation de EKF avec la technique PSO pour la même taille de population (5) et 50 itérations

Les résultats d'optimisations de EKF	
Les Valeurs des éléments des matrices Q et R	$q_1= 293.030818861113$
	$q_2= 672.032647721792$
	$q_3= 901.291899048134$
	$q_4= 482.063001690533$
	$r_1=r_2=0.0001$
La fonction d'objective	50 Swarm.Gbest. O=0.038854



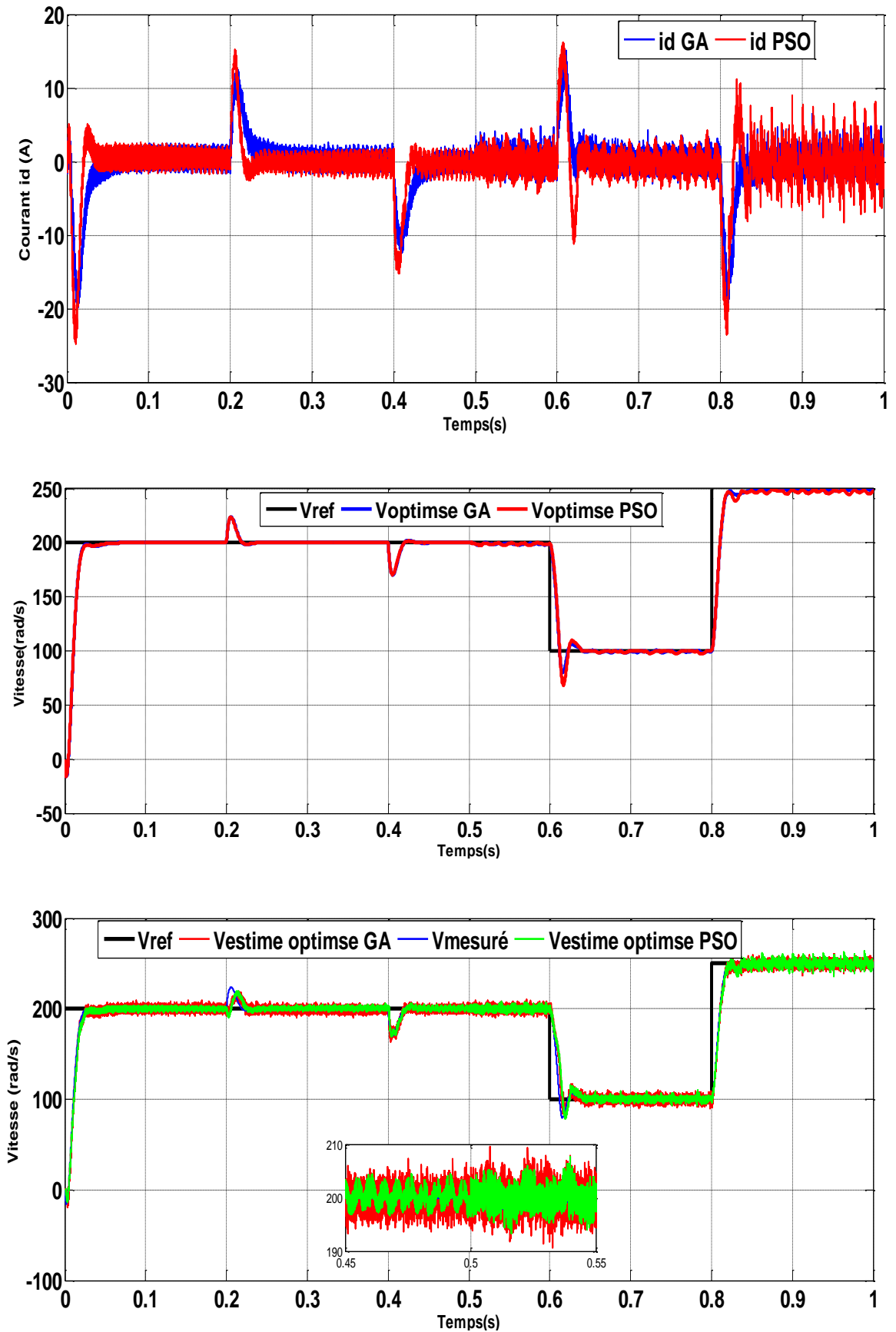


Figure III.10 : Résultats de simulation de la commande par EKF optimisé à  $t=0.5s$  par deux technique (GA et PSO)

### III.7.1 Interprétation des résultats

L'évaluation de l'efficacité des méthodes d'optimisation utilise (PSO. GA) basée sur l'estimation sont testé au fonctionnement de commande de vitesse avec filtre de kalman étende.

D'après les résultats de simulation on remarque qui le couple électromagnétique donne des fluctuations faibles d'après la présence de EKF à ( $t=0.5s$ ) avec l'optimisation de PSO par contre le GA donnée d'fluctuation plus augmenté par rapport de PSO.

Pour la Alleur de vitesse mesuré on remarque à l'instant  $t=0.5s$  pour le contrôle de filtre de kalman étende des ondulations très faibles avec d'erreur statique presque égal à zéro. et pour la vitesse estime il est présent des faible erreur d'estimation .

Les résultats de simulation montrent que la technique de PSO est mieux que la technique de GA et on remarque aussi la fluctuation est inférieur avec PSO à compare par GA. Donc l'optimisation avec PSO est plus performante et robuste par rapport l'optimisation avec GA. En termes de rapidité, de rejet de perturbation et de précision PSO est le meilleur.

### III.8 Étude comparative entre PSO et GA

Les résultats de simulation obtenue précédemment par l'optimisation de système sans capteur de vitesse avec les deux techniques PSO et GA nécessitent une étude comparative pour connaitre les performances de chaque méthode.

**Tableau III.5 :** Tableau de compression entre PSO et GA par rapport les paramètres de performance.

Algorithmes d'optimisation	Paramètres de performance			
	Tr	Td	D%	ISE
Génétique algorithmes	0.0261	0.025	2.5%	0.942139
Particle Swarm Optimisation	0.0160	0.02	2%	0.038854

- **Tr** : temps de réponse (sec),
- **Td** : Temps nécessaire pour rejeter la perturbation (temps de rejet),
- **IAE** : Intégrale de l'erreur de valeur absolue,
- **D%** : critère de dépassement.

### III.8.1 Interprétation des résultats

D'après les figures (III.10) et le tableau (III.4) de comparaison qui représente les valeurs les plus significatives, on remarque que la technique de PSO est plus performante à comparées avec GA. Le ISE avec PSO est inférieur à ISE avec GA, et le temps de convergence d'algorithme PSO est plus rapide que l'autre. Ce qui prouve l'avantage de la technique de PSO.

### III.9 Conclusion

Le but de ce chapitre c'est d'améliorer la performance de filtre de Kalman étendu pour le contrôle optimal de vitesse avec la commande vectorielle.

Dans ce travail, on a utilisé deux techniques d'optimisation pour ajuster les paramètres de commande vectorielle avec EKF, et on a fait une comparaison entre les deux techniques. D'après les résultats de simulation et le tableau de comparaisons on peut remarquer que l'algorithme de PSO peut assurer des meilleures performances par rapport au AG.

Grâce aux résultats obtenus on remarque aussi que la convergence du processus de chaque technique (PSO, GA) pour différents nombres d'itération, pour une meilleure solution à faible valeur de la fonction d'objectif. Et en termes de temps d'exécution l'utilisation du PSO est plus avantageuse comparée au GA.

Le chapitre suivant est consacré à l'application de technique de commande sans capteur de vitesse dans le domaine des véhicules électriques en appliquant un cycle de conduite NEDC réel.

# **Chapitre IV :**

*Application à un véhicule électrique  
avec un cycle de conduit*

### IV.1 Introduction

A ce stade, nous devons tester les performances de notre système dans un véhicule réel. Pour ce faire, nous avons dû appliquer comme vitesse de référence un cycle de conduite normalisé et un couple de traînée simulant les différentes forces de roulement du véhicule à l'aide d'un modèle dynamique.

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une étude de l'observateur et la commande vectorielle utilisé dans une chaîne de traction. En utilisant des algorithmes d'optimisation pour améliorer la vitesse du véhicule en améliorant les paramètres des commande (PI) et ceux de l'observateur (Q et R).

Dans ce chapitre, nous présenterons l'application des stratégies de contrôle sur la chaîne de traction. Pour cela, un modèle dynamique du véhicule Cela nous permet d'obtenir des consignes de vitesse et de couple d'un véhicule réel.

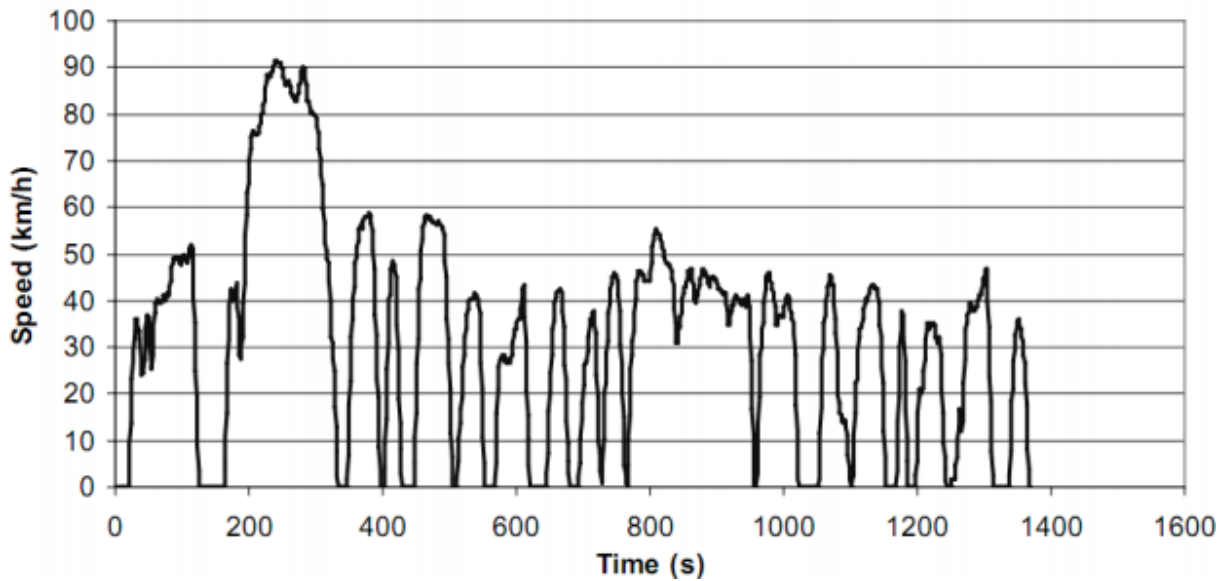
### IV.2 Cycle de conduite

Une mission de conduite pour un véhicule, est constituée, par un trajet partant, d'un point **A** et allant à un point **B**. De manière générale, le profil de vitesse du véhicule et/ou son trajet physique sont inconnus. Pour des applications automobiles plusieurs cycles de conduite sont normalisés pour représenter des missions standards. Les cycles de conduite sont composés d'un profil de vitesse et d'un profil de pente de la route et parfois profil de couple, et représentent des modes de conduite pour des régions ou pays différents. Les mêmes cycles utilisés pour évaluer les émissions des gaz polluants et la consommation de carburant pour les véhicules thermiques, sont utilisé pour l'évaluation des véhicules électriques. Toutefois, les tendances réelles de conduite sont souvent beaucoup plus complexées et exigeantes (vitesse, accélération...) que celles de ces cycles d'homologation [60].

L'objectif principal de ces cycles est la description des conditions d'utilisation des véhicules dans leur diversité : en particulier, on ne cherche pas à décrire l'ensemble des conditions en un seul cycle moyen, mais par un ensemble de cycles spécifiques routiers et autoroutiers, etc.) [61] Ces dernières années, plusieurs cycles normalisés ont été proposés pour représenter les conditions de fonctionnement typiques tell que [62] :

Pour les Etats-Unis, le cycle le plus commun est le FUDS (Fédéral Urban Driving Schedule). Il est basé sur une étude statistique du trafic à Los Angeles. Dans la littérature, on le retrouve également sous le nom de « FTP 75 urbain » (FTP - Federal Test Procedure). Ce cycle

est présenté sur la **Figure (VI.1)**, la vitesse étant exprimée en km/h sachant qu'on a fait la conversion suivante (1miles = 1,6Km).



**Figure IV.1 :** Cycle de conduite FTP [63].

Au niveau de l'Europe, le cycle le plus utilisé est le Nouveau Cycle Européen de Conduite **NEDC** (New European Driving Cycle) présenté sur la Figure (VI.2). Ce cycle est largement

Adopté en Europe pour évaluer les émissions **CO2** et la consommation de carburant des véhicules légers Le Nouveau Cycle Européen de Conduite représente un parcours mixte incluant quatre segments consécutifs de Cycle de Conduite Urbain (**UDC** – urban drive cycle) suivie par un segment du Cycle de Conduite Extra Urbain (**EUDC** – extra urban drive cycle). L'**UDC** a été développé pour représenter les conditions de fonctionnement en ville, par exemple Paris ou Rome. Le segment **EUDC** a été ajouté après le quatrième cycle **UDC** pour considérer un mode de conduite plus dynamique avec une vitesse moyenne et de pointe supérieure.

Le cycle conduite NEDC contient deux cycles (urbain, extra urbain) pour décrire le parcours et reproduire les conditions réelles d'usage du véhicule. Par la suite, seulement le profil de conduite urbain (200s), il est considéré pour représenter la mission car le véhicule considéré est de type urbain.

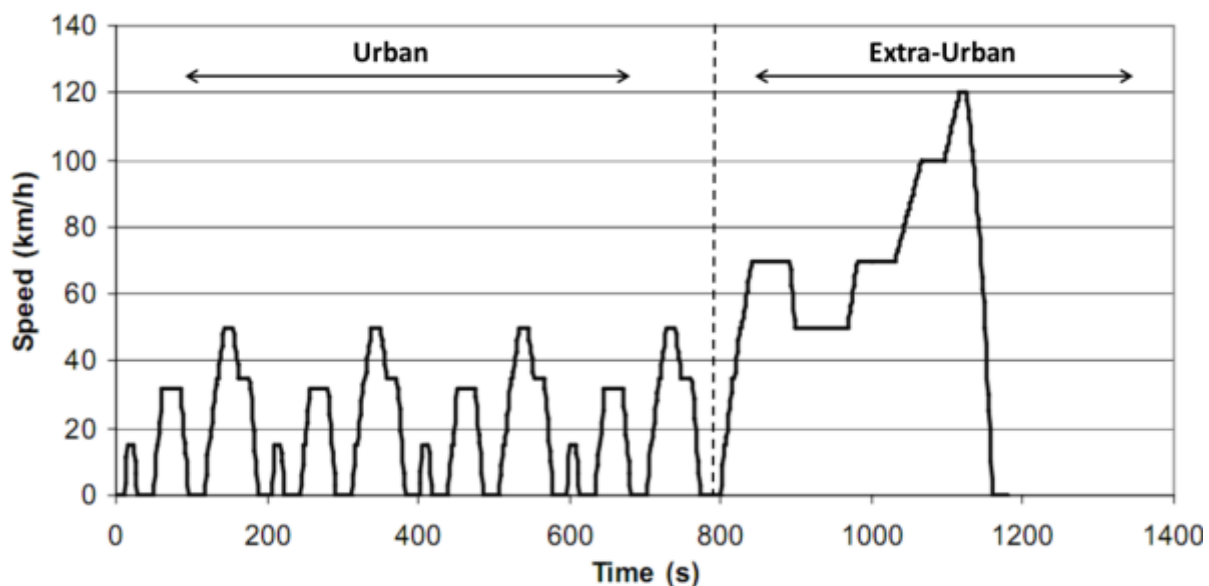


Figure IV.2 : Cycle de conduite NEDC.

Pour avoir une idée sur ces cycles de conduite on montre dans le tableau suivant (IV.1) quelques cycles avec ces caractéristiques [63].

Tableau IV.1 : Le temps, la distance et la vitesse maximale de quelque cycle de conduites Normalisé [63].

Les cycles	Temps	Distance	Vitesse Max
Braunschweig City Driving Cycle (BCDC)	1740s	10900.32 m	58.21 km/h
ARTIMIS Driving Cycle	3143 s	51695.46m	150.37 km/h
MODEM – Hyzem	720 s	4192.48 m	58.51 km/h
European Transient Cycle (ETC)	1800s	29493.59 m	90.8 km/h
EPA New York Cycle (NYCC)	598 s	1902.76 m	44.45 km/h
California Dynamometer Driving Schedule Cycle (CDDSC)	1435s	15802.15 m	407.35 km/h
City Suburbain Cycle (CSC)	1700s	10751.94m	70.26 km/h
JP 10 mode cycle	135 s	663.43 m	40.09 km/h
New European Driving Cycle (NEDC)	1180 s	11016.63 m	120.09 km/h
Federal Test Procedure (FTP)	1369 s	11996.85 m	91.15 Km/h



**Figures IV.3 :** véhicule électrique Blue car [60].

#### IV.2.1 Modèle dynamique du véhicule

Le véhicule considéré dans notre travail est de type urbain c'est le véhicule Blue car, il représente dans **la figue (IV.3)**, et les paramètres de cette voiture sont résumés dans le **tableau (VI.1) [60]**.

**Tableau IV. 2** Paramètres du véhicule électrique urbain de type Blue car [60].

Paramètres du VE	Valeur
Masse du véhicule ( $M_{VE}$ )	820 kg
Force dû à la gravité ( $g$ )	$9.81 \text{ m/s}^2$
Rayon d'une roue ( $r$ )	0.33 m
Masse volumique de l'air ( $\rho$ )	$1.2 \text{ kg/m}^3$
Surface frontal( $S$ )	2.75
Coefficient pénétration dans l'air ( $C_x$ )	0.3
Coefficient de résistance au roulement a l'état dynamique ( $C_0$ )	$1.6e-6$
Coefficient de résistance au roulement a l'Etat statique ( $C_1$ )	0.008
Pente de la route ( $\alpha$ )	2.5%

La puissance et l'énergie consommées sont définie par la dynamique du véhicule sous les conditions de conduite comme le cycle de vitesse et le profil de pente. La puissance demandée pour la propulsion des roues  $P_{VE}$  s'exprime par [1-3] [64] :

$$\begin{cases} P_{VE} = C_T \cdot \Omega_{ROUVE} \\ C_T = F_T \cdot r \\ \Omega_{ROUVE} = V_{VE} \cdot r^{-1} \\ P_{VE} = F_T \cdot V_{VE} \end{cases} \quad \text{IV. 1)}$$

Avec  $C_T$  : couple total ;  $\Omega_{ROUVE}$  : la vitesse de rotation de la roue ;  $F_T$  : la force de traction ;

$V_{VE}$  : la vitesse du VE et  $r$  : le rayon de la roue. L'effort total nécessaire pour vaincre la résistance à l'avancement et accélérer le véhicule

Représente la somme de quatre forces : la force de frottement (force de la roue), la force due à la pente, la force de résistance aérodynamique et la force due à l'accélération. La force totale s'écrit alors sous la forme suivante

$$F_T = F_{ROUVE} + F_{PENTE} + F_{AERO} + F_{ACC} \quad \text{(IV. 2)}$$

Les différentes forces résistantes ajoutées à la force d'accélération  $F_{acc}$ .- Les forces résistantes au roulement sont (voir **Figure (VI.3)**) : - la force aérodynamique  $F_{aero}$  - la force Froue due au contact des roues sur la chaussée -  $F_{pente}$  la force gravitationnelle due à la pente tel que

$$F_{PENTE} = F_{mg} - F_{gx} \quad \text{(IV. 3)}$$

$$\begin{cases} F_{AERO} = 0.5\rho S C_x \cdot V_{VE}^2 \\ F_{ROUVE} = M_{VE} \cdot g \cdot (C_0 + C_1)V_{VE}^2 \\ F_{acc} = m \frac{dV_{VE}}{dt} = m \cdot r \cdot \frac{d\Omega_{VE}}{dt} \\ F_{PENTE} = M_{VE} \cdot g \cdot \sin \alpha \\ F_{MG} = F_{PENTE} + F_y \end{cases} \quad \text{( IV.4)}$$

Avec :  $M_{VE}$  : Masse du Véhicule.

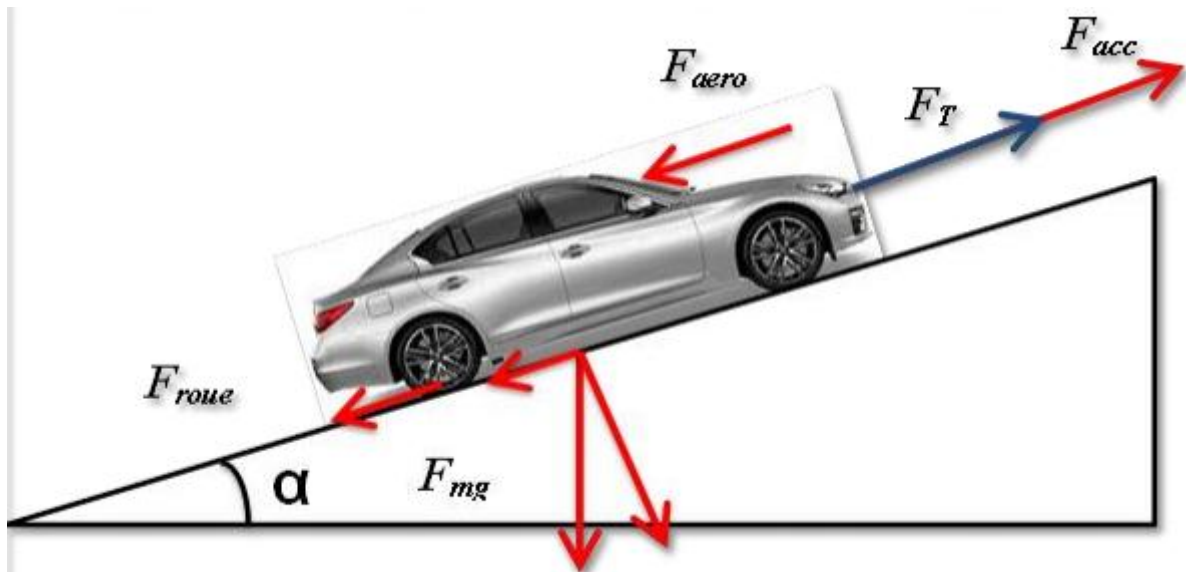


Figure IV.4 : Forces appliquées sur un véhicule électrique en roulement [60]

La puissance PVE requise pour la propulsion durant une mission ainsi que l'énergie Consommée  $E_{Vcons}$  peuvent être exprimées par : Le véhicule considéré dans ce travail est de type urbain, dont les paramètres sont donnés par le **Tableau (IV.1)**.

$$\begin{cases} P_{VE} = \left( M_{VE} \times \frac{dV_{VE}}{dt} + F_{AERO} + F_{ROUNE} + F_{gx} \right) V_{VE} \\ E_{VCans} = \int_{t_0}^{t_\sigma} P_{VE}(t) dt \end{cases} \quad \text{IV.5)}$$

**Remarque :**

1- Pour appliquer notre technique de commande il faut remettre la vitesse de référence en (Rad/s).

Donc:

$$(km/h) \times \frac{1}{3.6} = (m/s) \quad \text{IV.6)}$$

$$(m/s) \times \frac{1}{r} = (red/s) \quad \text{IV.7)}$$

2- La puissance du moteur de notre CDT est égale **60kw**, donc on calcule le couple Nominale comme suit:

On a **P=2** 'nombre de pair de pole'; La vitesse nominale est égale **250 rad /s**

$$C_m = \frac{Pu}{\Omega} = \frac{60000}{250} \quad \text{IV.8)}$$

$$C_m = \mathbf{240 \text{ N.m}}$$

On remarque que le couple de charge max dans les résultats égale presque **800N.m**, Donc on calcule le rapport du réducteur pour maximise le couple dans la roue.

$$K = \frac{\text{Proue}}{\Omega} = \frac{800}{240} = 3.34 \quad \text{IV. 9)}$$

$$K=3.34$$

### IV.3 Partie de la Simulation

Dans cette partie, on souhaite simuler le modèle dynamique du véhicule pour connaître le couple de charge (**Cr**) à base du profil de vitesse (**NEDC**), ensuite on va l'appliquer comme consigne à la technique de commande choisi. On a fait le choix du profil européen en raison de ses caractéristiques (accélération vitesse constante et freinage) et comme notre véhicule sera utilisée comme un véhicule urbain.

#### IV.3.1 Simulation du modèle dynamique

##### IV.3.1.1 Schéma bloc

Nous présentons d'un schéma bloc pour le modèle dynamique de voitures électriques avec observateur.

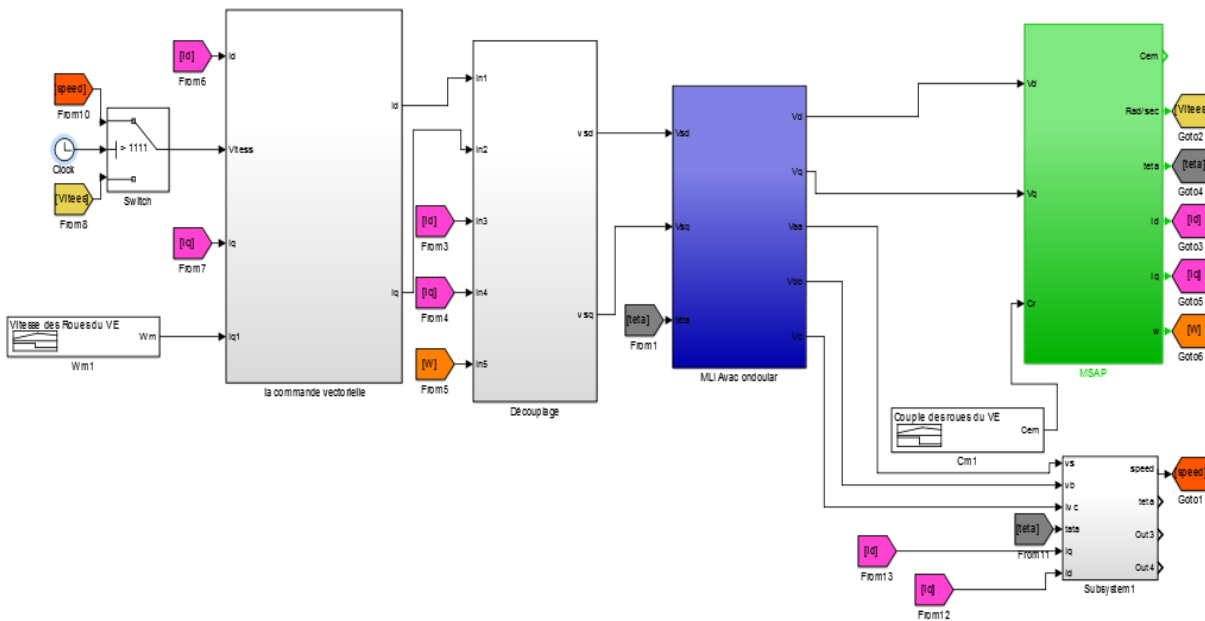


Figure IV.5 : Schéma bloc de simulation avec consignes de couple et vitesse réelles

IV.3.1.2 Résultat de la simulation des consignes de couple, de vitesse et de puissance

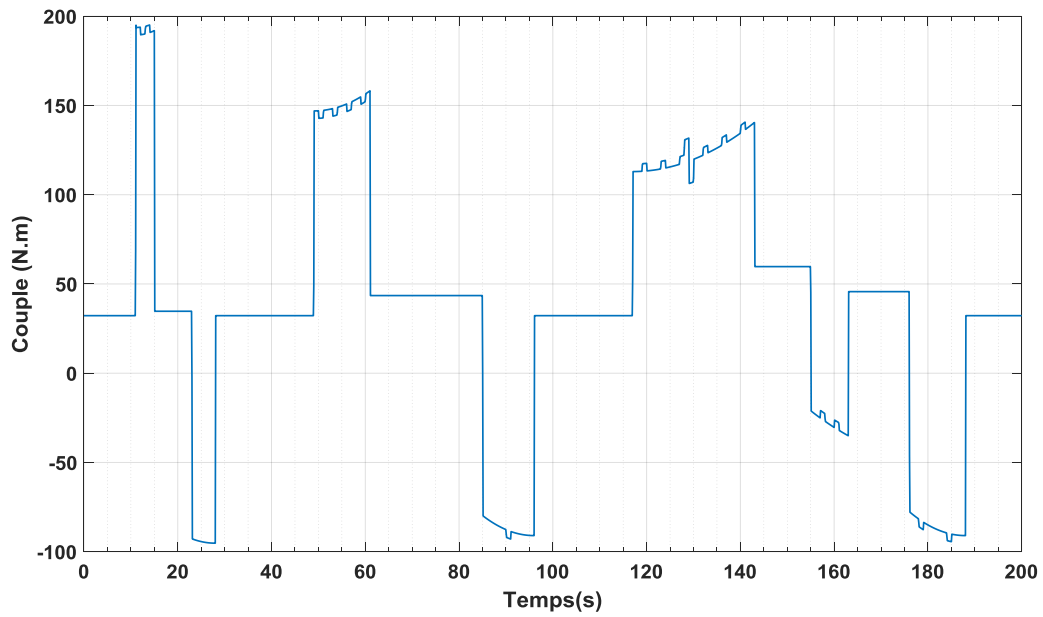


Figure IV.6 : Résultat de la simulation des consignes de couple référence ( $C_r$ ).

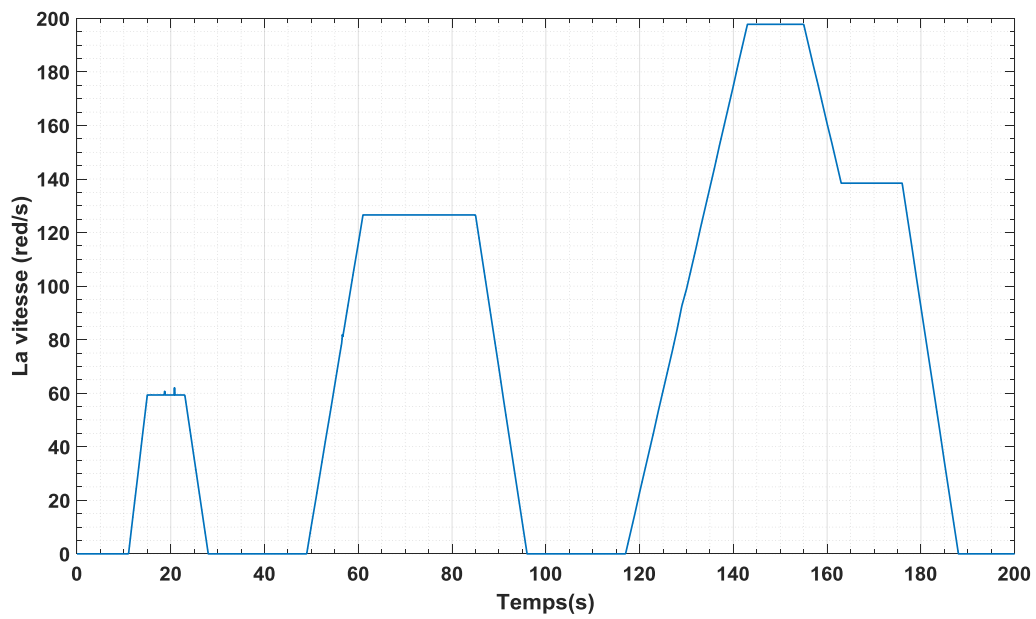
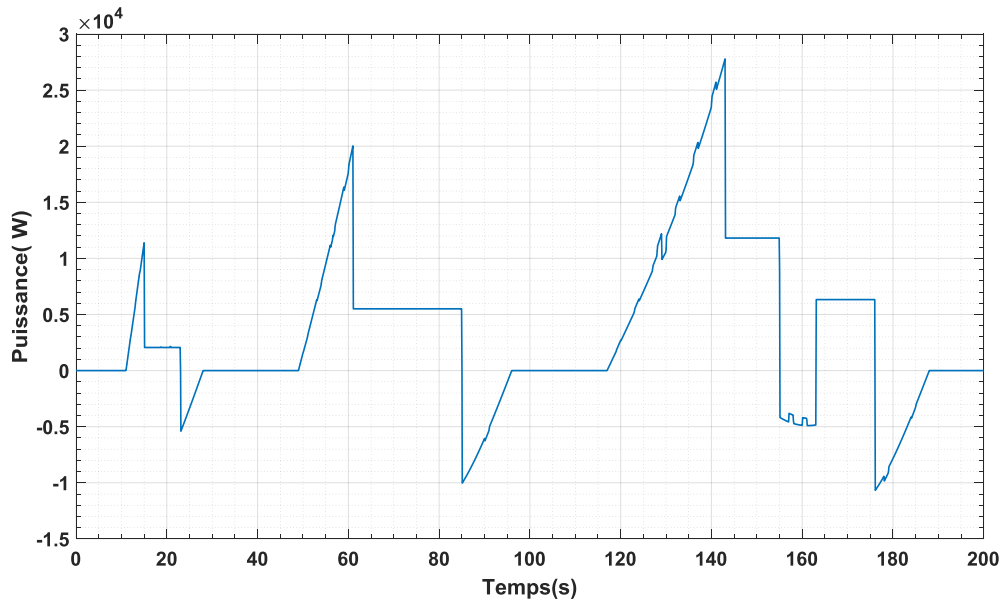


Figure IV.7: Résultat de la simulation des consignes de vitesse référence ( $V_{ref}$ ).

D'après ces résultats (**figure (VI.7, VI.6)**). Et l'équation de la puissance ( $P_{VE}=V_{ref}*C_r$ ), on peut déduire la puissance de demandée par le véhicule comme montré à la **figure (VI.8)**.

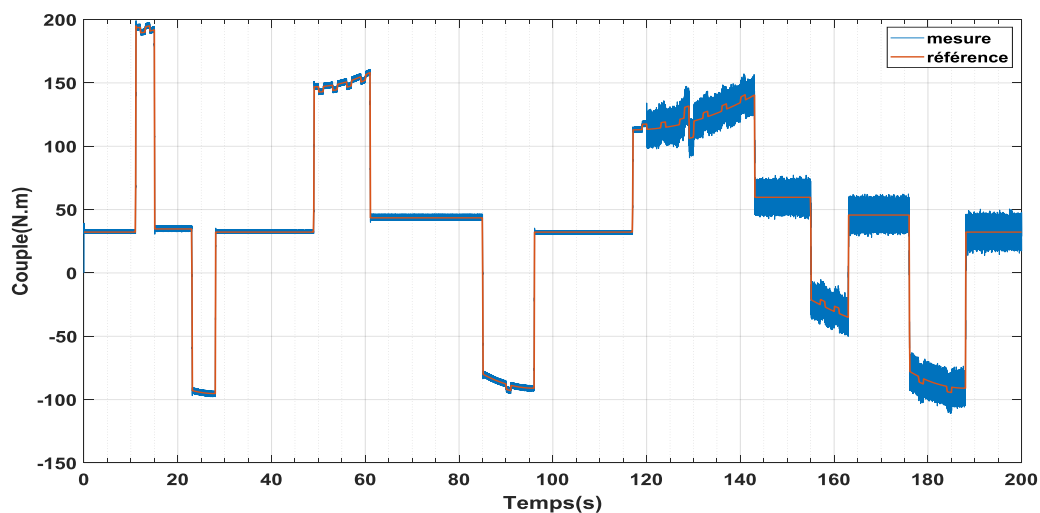


**Figure IV.8:** Résultat de la simulation des consignes de puissance référence ( $P_{ref}$ ).

#### IV.3.2 Application du cycle de conduite à la CDT avec les techniques de commande vectorielle sans capteur ( $t=120s$ )

Dans cette partie nous avons travaillé sur le même système de chapitre III et en ajoutant des consignes de vitesse et de couple réelles,

Notre objectif à travers cette étape est d'étudier les performances de la voiture électrique en l'absence capteur et remplacez-le par l'observateur de filtre de kalman



**Figure IV.9:** Résultats de simulation du couple de charge, avec les techniques de Commande vectorielle.

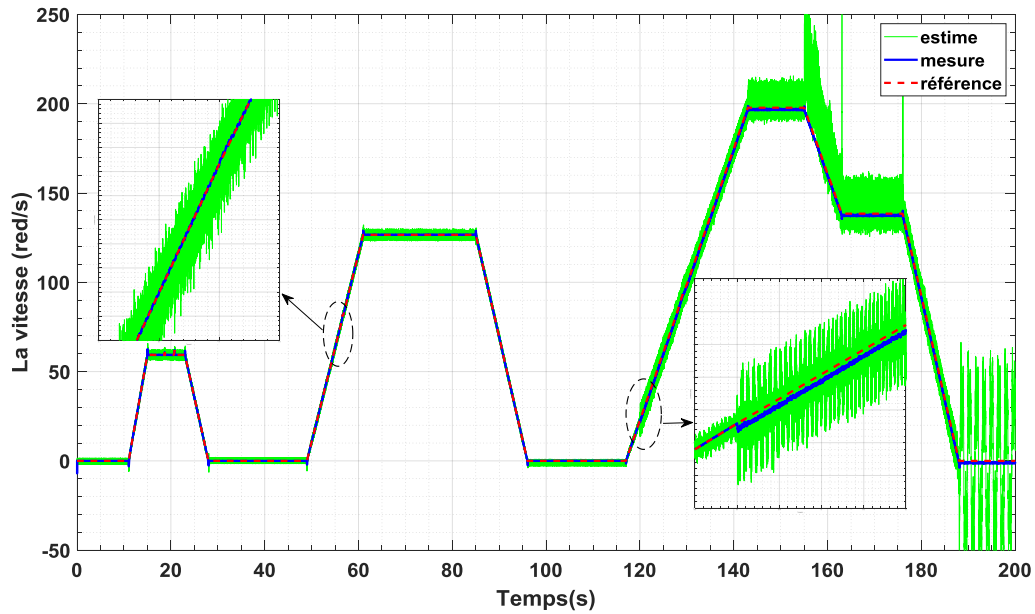


Figure IV.10: résultats de simulation de la vitesse du véhicule , avec la technique de commande vectorielle

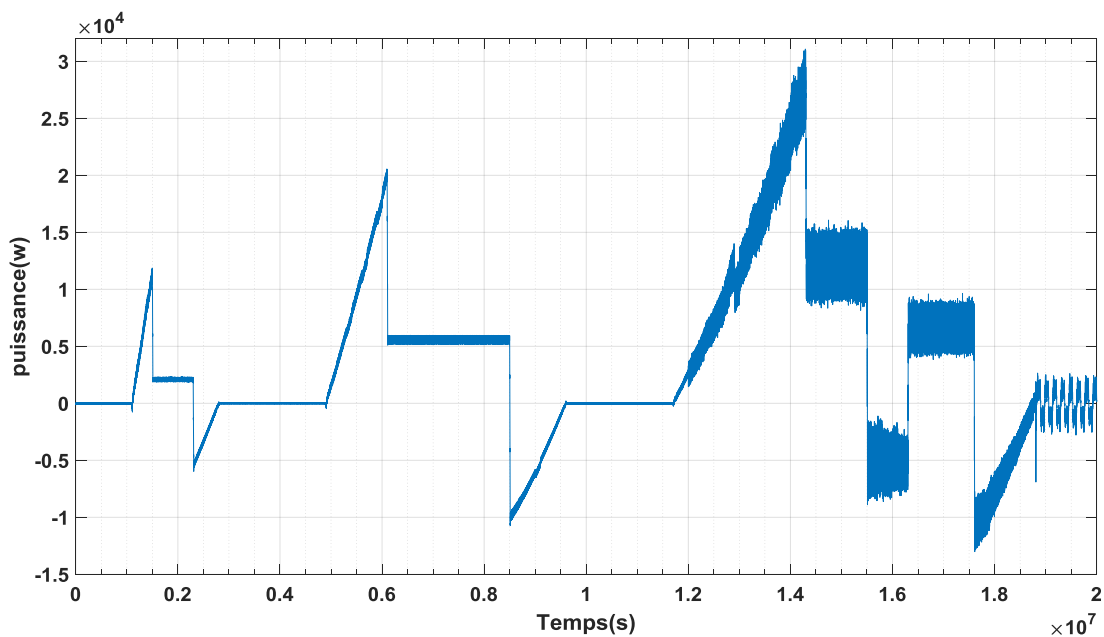


Figure IV.11: Résultats de simulation de la puissance estime

#### IV.4 Interprétation

D'après ces figures, nous constatons que les grandeurs suivent leurs consignes convenablement en utilisant la technique de commande vectorielle.

- Les figures (IV.9) et (IV.10) présentent les résultats de cette étude, mettant en évidence les courbes de couple et de vitesse de référence ainsi que les courbes correspondantes mesurées.

L'objectif principal était de déterminer si les courbes convergeaient malgré l'absence de capteur de vitesse et d'évaluer les erreurs potentielles lors des phases d'accélération et de décélération.

Nos résultats ont montré une convergence satisfaisante des courbes, avec des erreurs minimales observées même pendant les périodes de fluctuations intenses. Ceci démontre l'efficacité de l'observateur de Kalman dans la compensation de l'absence temporaire de capteur de vitesse dans les voitures électriques.

On remarque La présence d'une vitesse estime acceptable Lorsqu'il y a un capteur de vitesse Jusqu'à l'instant 120 s en cas d'absence de capteur de vitesse Il y a un léger changement de 1,5 % à 3 % Jusqu'à l'instant 170 s et entre 190 s à 200 s, la fluctuation de vitesse devient très importante

La vitesse affecte estime directement sur le couple mesure et la puissance mesure Parce qu'il remplace la vitesse mesure dans CV, Ceci explique l'existence des fluctuations dans le couple mesure et puissance mesure.

- D'après **la figure (IV.11)** qui montre la puissance instantanée, on remarque que durant les Phases d'accélération et décélération, la puissance est lisse dans le cas de la commande par CV

Dans le cas existence de capteur de vitesse on remarque rapprochement entre puissance référence et la puissance mesure avec existence Très petites erreurs peut être le négliger

En l'absence capteur de vitesse quand le moment 120 s on remarque augmenter en de fluctuations Ceci est dû au fait Produit la vitesse estime avec couple mesure.

## **IV.5 Conclusion**

Ce chapitre est consacré à la discussion de l'application de la commande vectorielle sans capteur de vitesse à la chaîne de traction du véhicule urbain réel. Au départ, nous nous sommes approchés des spécifications du véhicule avec lequel nous voulions valider les approches proposées. Cela est représenté par le cycle de conduite européen normalisé (NEDC) et le modèle dynamique du véhicule.

En utilisant ces deux derniers sous-systèmes, nous avons eu les consignes de couple de charge et de la vitesse mécanique à appliquer sur le moteur en cas de présence/absence du capteur de vitesse.

Les résultats de simulation obtenus ont prouvé que la commande vectorielle peut assurer des performances acceptables en termes de stabilité et de suivi de la consigne mais en cas de défaillance de système peut provoquer des effets néfastes sur la chaîne de conversion et par la suite sur le véhicule.

L'utilisation du filtre de Kalman pour la commande sans capteur peut assurer une continuité de service en cas de défaillance du capteur de vitesse avec des performances acceptable. Autrement, il assure une robustesse vis-à-vis les perturbations pendant les régimes d'accélération et de freinage du véhicule.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le travail présente dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de performance de la chaîne de traction de véhicule électrique dans le cas de défaut de capteur de vitesse.

L'objectif principal consiste à :

- L'application de commande sans capteur en utilise le filtre de kalman étendu pour le contrôle de vitesse.
- Assurer des bonnes performances de la commande sans capteur mécanique à travers l'application des techniques d'optimisation (PSO, GA).
- L'application des résultats de simulation sur un modèle réel de véhicule électrique.

Le principe de la commande vectorielle de moteur synchrone à aimant permanent basé sur l'utilisation d'estimateur de Kalman étendu que représente un outil mathématique capable de déterminer des grandeurs d'états non mesurables évolutives ou des paramètres du système à partir des grandeurs physiques mesurables.

La commande vectorielle est l'une des solutions qui permet de commander la machine d'une façon semblable à la machine à courant continu à excitation séparé ou le découplage entre le flux et le couple est naturel. La régulation de vitesse et courants sont assurées des régulateurs classiques de type (PI).

Pour cela, on a proposé d'utiliser les méthodes d'optimisation pour améliorer le contrôle de vitesse on a appliqué les deux techniques PSO et GA. Grâce aux résultats obtenus, on peut remarquer que l'optimisation présente bon performance pour les deux méthodes.

L'étude comparative entre GA et PSO a permis de montrer l'aptitude de la deuxième technique en termes de robustesse et de performance dynamique.

Par la suite, l'application des résultats de technique PSO sur la commande sans capteur de vitesse pour le domaine des véhicules électriques en appliquant un cycle de conduite a été présentée.

Les résultats de simulation obtenus confirment que la commande vectorielle avec EKF assure des performances acceptables et satisfaites en termes de stabilité et de suivre de la consigne mais sa robustesse est faible spécialement dans certains scénarios.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Par perspective à notre travail, nous recommandons la poursuite des travaux suivants :

- Utilisation des onduleurs multi niveaux afin d'augmenter le nombre de vecteur de tension utilisé, ce qui minimise les fluctuations de couple électromagnétique.
- Utilisation des techniques d'intelligences artificielles tels que les réseaux neurone pour améliorer la performance de filtre de kalman étendu.
- Remplacement des régulateurs PI par des régulateurs mode glissant d'ordre supérieur afin d'améliorer le système de commande.

# **BIBLIOGRAPHIE**

### Références bibliographiques

- [1] UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT « Étude d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique ». Promotion de juin 2018 E. Vehicles.
- [2] University of Hong Kong, Hong Kong, Chin" Electric Vehicles" ELECTRICAL ENGINEERING – Vol. III - Electric Vehicles - C C Chan
- [3] Article" A Brief History of Electric Vehicles" September 2022.
- [4] BENARIBA Hassan" Contribution à la commande d'un véhicule électrique " Université Aboukir Belkadi – Tlemcen –
- [5] A. Nouh, Contribution au développement d'un simulateur pour le véhicule électrique routier, Thèse doctorat, Université Belfort-MontBéliard, Mars 2008.
- [6] K. Tanguy, Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier, Université laval, Québec, Canada, 2013.
- [5] C.C. Chan, an overview of electric vehicle technology, Proceedings of the IEEE, Vol 81,N° 9, pp., 1201-1213, Septembers 1993.
- [6] Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 'Commande en vitesse d'un véhicule Électrique 'Mémoire soutenu publiquement le 18 septembre 2018
- [7] K. T. Chua, C. C. Chan, and C. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2246– 2257, 2008.
- [8] R. Mkahl, 'Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des aux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique, " Ph.D. dissertation, BelfortMontbéliard, 2015.
- [9] Z. HASSAINE et al. \_ 'Commande latérale d'un véhicule électrique, " Ph.D. dissertation.
- [10] UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA {Commande non-linéaire application aux véhicules électriques}. DAHMANI Belkacem.MAALMI Ameer. 2021 /2022.
- [11] Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. {Commande latérale d'un véhicule électrique}. HASSAINE Zakaria et ZEGHOUDI Soufane. 2019 – 2020.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [12] MARIF Ismail ABDAT Hichem. La commande en vitesse d'un véhicule électrique. Master's thesis, Université de Tlemcen.
- [13] R. Toscani, Commande et diagnostic des systèmes dynamiques, édition Ellipse, 2ème édition, ISBN 978-2729863364, Mars 2011.
- [14] UNIVERSITÉ PARIS-SUD 'Commande Tolérante aux Défauts d'une Chaîne de Traction d'un Véhicule Électrique' Aziz RAISEMCHE. THÈSE DE DOCTORAT Soutane le 27 Novembre 2014.
- [15] S. Ibrahim, A.D. Antoni and H. Takashi, 'Simulation-Based Analysis of Short Circuit Fault in Parallel-Series Type Hybrid Electric Vehicle,' International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, vol. 3, pp. 2045-2049, Beijing, China, October 2011
- [16] MA. Rodriguez-Blanco, A. Claudio-Sanchez, D. Theilliol, L.G. Vela-Valdes, P. SibajaTera, L. Hernandez-Gonzalez and Aguayo-Alquicira, 'A Failure detection strategy for IGBT based on gate-voltage behavior applied to a motor drive system,' IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 5, pp. 1625-1633, May 2011
- [17] B.R.O. Baptista, M.B. Abadi, A.M.S. Mendes and S.M.A. Cruz, 'The performance of a three-phase induction motor fed by a three-level NPC converter with fault tolerant control strategies,' 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp. 497-504, Valencia, Spain, August 2013.
- [18] A. Vola and E. Garone, "Enhancing the actuator fault tolerance in autonomous over actuated vehicles via adaptive control allocation," 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications, pp. 1-6, Amman, Jordan, May 2008.
- [19] O. Ondel, Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale Lyon, Novembre 2006.
- [20] R. Casimir, Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes, Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2003.
- [21] O. Ondel, Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale Lyon, Novembre 2006

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [22] Faiza KAMOUN CHARFI, « Surveillance des systèmes électroniques de puissance embarqués dans le véhicule électrique -méthodes et outils ». Thèse de Doctorat. L'école nationale d'ingénieurs de Sfax. Décembre 2004.
- [23] Nassim BELKHERCHI, « Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle – application aux procédés biologiques ». Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier). Avril 2011
- [24] Loures R., « Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de pétri temporel flou », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2006.
- [25] UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET” Commande d'un MSAP sans capteur mécanique fondée sur l'observateur par mode glissant avec logique Floue et présence de défauts” RAFA Zahra. PROMOTION 2018 /2019.
- [26] LAHOUEL DALILE, « Commande non-linéaire Adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents », thèse de Magister, Université Batna, 2009.
- [27] F. BENCHABANE, A. MENACER, A. BENAKCHA, D. TAIBI, k. Yahia, « Étude comparative entre la commande vectorielle avec régulateurs PI et à mode glissant pour l'asservissement de la vitesse ou la position d'un moteur synchrone à aimants permanents »,2014.
- [28] NAIT Slimane B. « Synthèse d'observateurs non linéaires : Application au diagnostic de défauts » Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU (ALGERIE)
- [29] Akin. B, "State Estimation Techniques for speed sensor less field-oriented control of Induction motors". Thesis of Master, the Middle East technical University, Ankara, Turkey, 2003.
- [30] K. Amor, “Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP),” Thèse doctorat, Université Aix Marseille, 2012.
- [31] F. BENCHABANE, “Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering,” Thèse magister, UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER, BISKRA, 2005
- [32] A. Abid, “Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP,” Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [33] SAHRAOUI Dahmane, « Estimation par Filtre de Kalman Étendu des États et paramètres De La Machine Asynchrone En Vue De Détection Des Défauts » Mémoire de Master, Université, Msila, 2013.
- [34] Ayan Mahmoud M. « Observation et diagnostic de processus industriels à modèle non linéaire application aux machines électriques » Thèse de Doctorat École centrale de NANTES (FRANCE), juillet 2010.
- [35] Grellet. G, Clerc. G, "Actionneurs électriques, principe /Modèle/ commande », Eyrolles, Deuxième Edition 2000.
- [36] Garcia. [S.G, "Étude et mise en œuvre d'estimateurs et d'observateurs robuste de flux et de vitesse pour une machine à induction à cage commandée vectoriellement". Thèse de doctorat, Paris sud, France, 1998.
- [37] Zedong ZHENG, « Commande à haute performance et sans capteur mécanique du moteur synchrone à aimants permanents ». Thèse de doctorats
- [38] LABORATORY OF MECHANICAL TRANSMISSIONS, « Research on Harmonic Torque Reduction Strategy for Integrated Electric Drive System in Pure Electric Vehicle». Article », Article, china, 1 August 2020.
- [39] SAAD CHOUIREB, « Sensorless control of PMSM drive for electric vehicle applications » Mémoire de Master, University Amar Telidji De Laghouat, 2022.
- [40] NABTI. Kh, « Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone ». Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, Décembre. 2010.
- [41] Guillaume CALAS, « Optimisation par essaim particulière ». Spécialisation Sciences Cognitives et Informatique Avancée.
- [42] Merzoug Med Salah, « Étude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) ». Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [43] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, pages 1942–1948, Perth.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [44] Maheswara Rao Chintala, Ramana Pilla, Ayya Rao SLV Tummala, « Tuning of Extended Kalman Filter for Speed Estimation of PMSM Drive using Particle Swarm Optimization ». Article (IJAIEEM), 7 Juillet 2016.
- [45] BOUSSAÏD Ilham, « Perfectionnement de metaheuristiques pour l'optimisation continue ». Université Paris-Est CRETEIL, 2013.
- [46] KENNEDY J., EBERHART R., "Particle Swarm Optimization," Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IEEE Press, vol. 8, no. 3, pp. 1943–1948. 1995.
- [47] PARSOPOULOS K.E., VRAHATIS M.N., Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization. In: Natural Computing: an international journal, vol. 1, n° 2-3, pp.235-306. 2002.
- [48] HYASS M.E., HYASS P., Good Parameters for Particle Swarm Optimization. In : Laboratories Technical Report no. HL1001. 2010.
- [49] Akin. B, "State Estimation Techniques for speed sensor less field-oriented control of Induction motors". Thesis of Master, the Middle East technical University, Ankara, Turkey, 2003.
- [50] ZIELINSKI K., LAUR R., Stopping Criteria for Differential Evolution in Constrained Single-Objective Optimization. In: Advanced in Differential Evolution, the series Studies in Computational Intelligence, vol. 143, pp. 111-138 Springer, Berlin Heidelberg. 2008.
- [51] COOREN Y., Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. Thèse de Doctorat, Université de Paris 12 Val de Marne, France. 2008.
- [52] ELHAMI N., Contribution aux méthodes hybrides d'optimisation heuristiques : Distribution et application à l'interopérabilité des systèmes d'information. Thèse de Doctorat, Université Mohammed V Rabat, Maroc & Université de Rouen, France, 2013.
- [53] Holland.J.H.(1975). Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press.
- [54] Goldberg. (1989). genetic algorithms in search, optimisation, and machine learning. Addison -Wesley.

## BIBLIOGRAPHIE

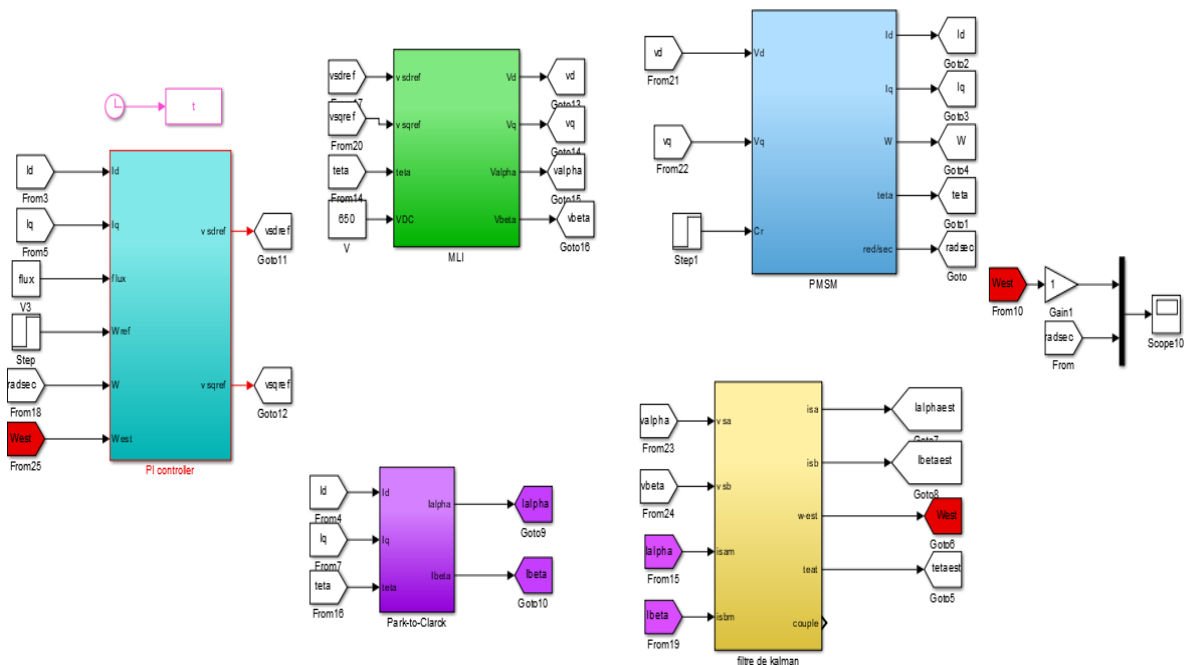
---

- [55] HAMIDIA Fathia, « Contribution à la commande Neuro-floue des machines Électriques », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique (ENP), Algérie, 2013.
- [56] KIMOUCHE Mohammed Amine et BENZID Moussa, « Les méthodes métaheuristiques pour l'optimisation en génie électrique. », Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2019.
- [57] M. K. Hussain, "State estimation of direct field orientation control induction motor drive by using Kalman filter," Engineering and Technology Journal, vol. 30, no. 15, 2012
- [58] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan, "Speed-sensorless estimation for induction motors using extended kalman filters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 272–280, Feb. 2007, doi: 10.1109/TIE.2006.885123.
- [59] M. K. Hussain, "Senseless speed and position of direct field orientation control induction motor drive," Al-Khwarizmi Engineering Journal, vol. 8, no. 4, pp. 9–25, 2012.
- [60] B. Bendjedia, "Gestion et optimisation d'énergie électrique dans les systèmes Multisources," These doctorat, Université Houari Boumediene, alger, 2014. [18] K. Ben Mansour, "Commande Tolérante aux Défauts d'une Chaîne de Traction Electrique," These magister, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, Bordj elbahri, 2011.
- [62] B. Tabbache, "Réalisation d'un emulateur de vehicule électrique," Mémoire de magistère, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, Bordj Elbahri, 2007.
- [63] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. Mccrae, and P. G. Boulter, A reference book of driving Cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, TRL Limite. USA: Project Report PPR354, 2009.
- [64] A. BOUCHA, "Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué," These magister, Université Mohamed Boudiaf,Oran, 2015

# **ANNEXES**

Paramètres de la machine synchrone a aimant permanent

Parameter	Value	Unit
Peak power	60	kW
Peak torque	250	Nm
Maximum speed	7000	rpm
Base speed	2292	rpm
DC voltage	650	V
Stator resistance	0.153	$\Omega$
Stator inductance	1.8	mH
Permanent magnet flux linkage $\psi_f$	0.2778	Wb
Pole number $P_n$	4	-
Phase current limit	150	A



Simulation de commande vectorielle du MSAP avec EKF

- PI controle**
- commande MLI**
- MSAP**
- filtre de kalman étendu**
- transformation de Park**

