

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

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité :**

**AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE**

## **THÈME**

**Modélisation d'un véhicule électrique**

*Préparé par : M.SAAIDIA Ali*  
*M.AISSA Abdelwahid*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>NEGADI KARIM</b>	<b>MCA</b>	<b>Président</b>
<b>OGAB CHAHRAZED</b>	<b>MCB</b>	<b>Examineur</b>
<b>BENCHEIKH MUSTAPHA</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2018 /2019**

## Remerciement

*Au nom d'ALLAH, le Tout - Miséricordieux, le Très – Miséricordieux*

*La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager  
après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au  
jour de la résurrection.*

*On tient à remercier, nos parent nos frères et amis, et surtout notre encadreur*

*M.BENCHEIKH.*

*Merci* 

---

***Notation***


---

$F_{rr}$  : La force de résistance au roulement.

$\mu_{rr}$  : Le coefficient de résistance au roulement.

$g$  : L'accélération de la gravité exprimée en ( $m/s^2$ ).

$m$  : à masse totale du véhicule exprimée en (kg).

$F_{ad}$  : La force aérodynamique.

$\rho$  : La masse volumique de l'air.

$A$  : La surface frontale du véhicule.

$C_d$  : Coefficient de la traînée du véhicule.

$v$  : La vitesse du véhicule.

$F_{hc}$  : La force d'escalade.

$P$  : La pente.

$\psi$  : L'angle de la pente exprimée en (rad).

$F_{ta}$  : Force d'accélération.

$a$  : accélération du véhicule.

$F_{te}$  : Le couple d'essieu.

$r$  : Le rayon du pneu.

$G$  : Rapport de transmission.

$T$  : Le couple moteur.

$\omega$  : La vitesse angulaire du moteur.

$\dot{\omega}$  : L'accélération angulaire du moteur.

$I$  : le moment d'inertie du rotor du moteur.

$F_{\omega a}$  : La force d'accélération angulaire.

$\eta_g$  : L'efficacité du système d'engrenage (rendement).

$T_{max}$  : Le couple maximale.

$\omega_c$  : La vitesse angulaire critique du moteur.

$K$  : Coefficient de Peukert.

$K_m$  : Le constant du moteur.

$T_0$  : Couple initiale.

$\Phi$  : Le flux magnétique.

$i$  : Le courant d'induit.

$U$  : La tension fournit au moteur.

$E_s$  : La force électromotrice (la tension d'induit).

$E_b$  : La force électromotrice arrière.

$R_a$  : Résistance d'induit d'un moteur.

$B$  : Un champ magnétique d'intensité.

$F$  : La force mécanique.

$P_{r.n}$  : La puissance rotorique nominale.

$T_{r.n}$  : Le couple rotorique nominale.

$v_{max}$  : La vitesse maximale.

$\omega_{r.n}$  : La vitesse angulaire nominale.

$\omega_{r.max}$  : La vitesse angulaire maximale.

$N$  : nombre des pas.

$T_n$  : Le couple nominale.

$P_n$  : La puissance nominale.

$v_n$  : La vitesse nominale.

$T_L$  : Le couple limite.

$T_r$  : Le couple rotorique.

$C_p$  : Capacité de Peukert.

$\delta t$  : pas de calcul.

---

<i>Abréviation</i>
--------------------

---

AC : machines à courant alternatif.

CF : La charge fournie.

CR : La charge totale retirée.

DoD : La profondeur de décharge.

FEM : la force électromotrice.

ICE : électrique à combustion interne.

ICVE : véhicule électrique à combustion interne.

GM : General Motors.

MCC : Moteur à courant continu.

VE : véhicule électrique.

VEH : véhicule électrique hybride.

VEB : Le véhicule électrique à batterie.

VHR : Le véhicule hybride rechargeable.

PAC : La voiture à pile à combustible.

PWM : Pulsed Width Modulation.

SSE : Système de stockage d'énergie.

ÉDC : État de charge.

MÉP : Membrane échangeuse de protons.

## SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Notation.....	III
Abréviation.....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE 1</b> .....	<b>4</b>
I.1. Introduction .....	5
I.2. Véhicules tout électriques .....	6
I.2.1. Histoire des véhicules tout électriques .....	6
I.2.2. Comparaison véhicule électrique avec les autres.....	9
I.2.3. Composants d'un véhicule électrique .....	10
I.2.4. Caractéristiques des véhicules électriques.....	11
I.2.5. VE commercialisés.....	12
I.2.6. Avantages et inconvénients du véhicule électrique .....	12
I.2.6.1. Avantages .....	12
I.2.6.2. Inconvénients .....	13
I.3. Véhicules électriques hybrides.....	13
I.3.1. Historique des véhicules électriques hybrides .....	13
I.3.2. Composants utilisés dans les véhicules hybrides.....	14
I.3.3. Principales architectures des véhicules hybrides .....	15
I.3.3.1. Architecture série .....	15
I.3.3.2. Architecture parallèle .....	16
I.3.3.3. hybride Série-parallèle .....	17

I.4.	Commandes de véhicule hybride .....	19
I.5.	Véhicule à pile à combustible .....	20
I.5.1.	Historique des véhicules à pile à combustible .....	20
I.5.2.	Principe de fonctionnement .....	21
I.5.3.	Différentes technologies de piles à combustibles .....	22
I.5.4.	Les caractéristiques .....	24
I.6.	Conclusion.....	24
<b>CHAPITRE2</b>	.....	<b>25</b>
II.1.	Introduction .....	26
II.2.	Configurations des véhicules électriques .....	26
II.3.	Performances des véhicules électriques .....	29
II.4.	Modèle dynamique .....	29
II.4.1.	La force de résistance au roulement.....	30
II.4.2.	La force aérodynamique .....	30
II.4.3.	La force d'escalade .....	31
II.4.4.	Force d'accélération .....	32
II.4.5.	Effort de traction total .....	33
II.5.	Modélisation de l'accélération des véhicules électriques.....	34
II.5.1.	Paramètres de performance d'accélération.....	34
II.6.	Moteur à courant continu .....	35
II.6.1.	Principes fondamentaux du moteur à courant continu .....	36
II.6.2.	Description d'un moteur à courant continu .....	36
II.6.3.	Moteur à excitation séparée.....	37
II.6.4.	Force électromagnétique .....	38
II.6.5.	Contrôle du moteur à courant continu .....	39
II.6.6.	Avantages et inconvénients.. .....	42

II.7. Modélisation de la batterie .....	42
II.7.1. Le but de la modélisation de batterie .....	42
II.7.2. Circuit équivalent de batterie.....	43
II.7.3. Capacité de la batterie de modélisation.....	44
II.8. Conclusion.....	47
<b>CHAPITRE3</b> .....	48
III.1. Introduction.....	49
III.2. Modélisation de l'accélération .....	49
III.2.1. Modélisation de l'accélération d'un scooter électrique.....	49
III.2.2. Modélisation de l'accélération d'une petite voiture.....	53
III.3. Exemple d'étude des paramètres de la Nissan Leaf 2015.....	56
III.3.1. Simulation de l'évolution de couple et la puissance par rapport au vitesse.....	56
III.3.2. Interprétation du résultat .....	58
III.3.3. Simulation de l'évolution du vitesse et la puissance par rapport au temps.....	59
III.3.4. Interprétation du résultat .....	61
III.4. Exemple d'étude des paramètres de la Tesla modèle S 2014 .....	62
III.4.1. Simulation de l'évolution de couple et la puissance par rapport au vitesse.....	62
III.4.2. Interprétation du résultat .....	63
III.4.3. Simulation de l'évolution du vitesse et la puissance par rapport au temps.....	63
III.4.4. Interprétation du résultat .....	64
III.5. Simulation de la batterie.....	65
III.6. Conclusion.....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Les types de véhicule électrique .....	5
Figure I.2. Première voiture électrique au monde. ....	6
Figure I.3. La Jamais Contente. ....	7
Figure I.4. La Buick SKylark de GM (General Motors). ....	7
Figure I.5. La Prius(Toyota 1997). ....	8
Figure I.6. La Nissan Leaf .....	9
Figure I.7. Principaux composants électriques et choix pour un système EV .....	10
Figure I.8. Eexemple de VE comemercialisés.....	12
Figure I.9. Architecture série du véhicule hybride.....	16
Figure I.10. Architecture parallèle du véhicule hybride.....	17
Figure I.11. Architecture série-parallèle du véhicule hybride. ....	18
Figure I.12. Schéma Principale de fonctionnement des piles à combustible .....	22
Figure II.1. Illustration conceptuelle de la configuration générale de l'VE. ....	27
Figure II.2. Configuration VE due aux variations de la propultion électrique. ....	28
Figure II.3. Schéma illustrant les différentes forces longitudinales agissant sur un véhicule en mouvement sur une route inclinée. ....	30
Figure II.4. Pente sur la roue. ....	31
Figure II.5. Un arrangement simple pour connecter un moteur à une roue motrice.....	32
Figure II.6. Schéma d'un moteur à courant continu.....	37
Figure II.7. Moteur à excitation séparée (indépendante).....	37
Figure II.8. Caractéristiques couple-vitesse des machines à courant continu .....	39
Figure II.9. Caractéristiques de performances idéales pour les centrales de véhicules.....	40
Figure II.10. Caractéristique de la pente couple/vitesse pour un moteur à courant continu.. ..	41
Figure II.11. Exemple d'un modèle de circuit équivalent plus raffiné d'une batterie Ceci modélise une partie du comportement dynamique d'une batterie.....	43
Figure III.1. Scooter électrique .....	49
Figure III.2. Accélération maximale du scooter électrique. ....	52
Figure III.3. Graphique de distance / temps pour un scooter électrique. ....	53
Figure III.4. La voiture électrique révolutionnaire GM EV1 à batterie. ....	53
Figure III.5. Accélération totale de la voiture électrique GM EV1. ....	56
Figure III.6. L'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse.....	58
Figure III.7. L'évolution la vitesse et puissance par rapport au temps. ....	.61

Figure III.8. L'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse.....	62
Figure III.9. L'évolution de la vitesse et la puissance par rapport au temps.....	64
Figure III.10. L'évolution de la tension aux bornes de la batterie en fonction de la charge fournie par la batterie pour trois courants différents.....	67
Figure III.11 : L'évolution de profondeur de déchargement à trois courants différents constants en fonction de temps pour une batterie NiCad 50 Ah.....	68

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1. Comparaison entre les configuration série,parallèle et série/parallèle .....	18
Tableau I.2. Comparaison des différentes technologies de pile à combustible .....	23
Tableau II.1. Domaine d'application pour un moteur à excitation séparée.....	37

# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

A l'échelle mondiale, le secteur du transport, en particulier le transport routier, est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie ainsi que des émissions polluantes notamment de gaz à effet de serre. Ceci est dû au fait que ce transport est assuré par des véhicules fonctionnant essentiellement sur la base de carburants issues de matières fossiles extrêmement polluantes telles que le pétrole.[1]

Aussi, partant du principe que le pétrole est une source épuisable et afin de réduire la consommation d'énergie ainsi que la pollution atmosphérique qui l'accompagne, les seuils d'émission des principes polluants de notre environnement sont réglementés par une charte internationale que les pays signataires de cette charte doivent respecter pour la protection de la couche d'ozone qui ne cesse de se dégrader continuellement ainsi que pour réduire le réchauffement climatique qui menace la planète entière.

Ces préoccupations d'ordre environnemental, nous obligent à nous intéresser à la substitution des véhicules thermiques utilisés actuellement par des véhicules électriques (VE) très prometteurs tant sur le plan de la consommation énergétique que sur celui des émissions polluantes (à condition de privilégier l'énergie électrique verte c'est-à-dire obtenue à base d'énergies renouvelables et non pas d'énergies fossiles). En effet, actuellement ces véhicules électriques sont perçus comme une solution majeure pour réduire le désastre écologique causé par les véhicules thermiques. Cependant, les performances de ces véhicules électriques, restent encore insuffisantes (notamment l'autonomie électrique) pour assurer leur généralisation au niveau de leur utilisation. Aussi, une solution alternative a été trouvée par les constructeurs, consistant à privilégier le véhicule électrique hybride (VEH). Ce dernier, est en effet réservé à une utilisation urbaine en mode électrique et une utilisation en mode thermique en dehors de la ville. Ceci a pour conséquence de réduire la pollution en ville, d'augmenter l'autonomie du véhicule et de s'affranchir de beaucoup de problèmes posés par l'utilisation du véhicule tout électrique notamment ceux de la disponibilité de la recharge électrique (pour les véhicules rechargeables !) et du temps de recharge qui parfois est très long.[1]

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'étude qui consiste en le développement la modélisation d'un véhicule électrique et étude leur vitesse, leur puissance et leur couple par rapport au temps, et en fait la comparaison entre différents types de véhicules électriques (véhicules électriques Tesla modèle S 2014 & Nissan Leaf 2015)

Aussi, le mémoire est subdivisé en trois chapitres.

Le premier intitulé « Généralités sur les véhicules électriques (VE) et électriques hybrides (VEH) et pile à combustible (PAC) », est consacré à la présentation du VE et du VEH et du PAC en passant en revue leur fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques (en terme de performance et limitations).

Dans le deuxième chapitre intitulé « modélisation d'un véhicule électrique », est consacré de trouver un modèle mathématique qui représente le véhicule électrique pour concrétiser notre but.

Dans le troisième et dernier chapitre, intitulé « résultats de simulation et discussions », nous présentons les graphes de simulations et en fait l'interprétation de notre résultat et faire une comparaison entre les véhicules électriques on terme de robustesse.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale.

# CHAPITRE 01

## GENERALITE SUR LES VEHICULES ELECTRIQUES

# I CHAPITRE 01

## Généralité sur les véhicules électriques

### I.1. Introduction

Les véhicules électriques correspondent à l'ensemble des véhicules équipés d'un ou plusieurs moteurs fonctionnant principalement avec une propulsion électrique. On distingue aujourd'hui trois principales catégories de véhicules électriques :

- Le véhicule électrique à batterie aussi appelé véhicule tout électrique ou 100% électrique (VEB). Il utilise pour unique énergie motrice l'électricité stockée dans des batteries rechargeables sur le secteur.
- Le véhicule hybride rechargeable (VHR). Il est doté d'un moteur thermique et d'un moteur électrique alimenté par des batteries. Le VHR démarre en mode électrique et le groupe thermique n'intervient qu'au-delà d'une certaine vitesse ou lorsque les batteries sont épuisées. Contrairement à l'hybride conventionnel, il peut se recharger directement sur le secteur.
- La voiture à pile à combustible (PAC). Elle est aussi appelée voiture à hydrogène car son moteur électrique est alimenté par une pile à combustible qui produit elle-même l'électricité à partir de l'hydrogène.

Les voitures à PAC de série n'étant pas encore commercialisées en Algérie, nous nous intéresserons, dans la présente publication, uniquement aux VEB et VHR, deux technologies qui bénéficient d'un fort soutien public.

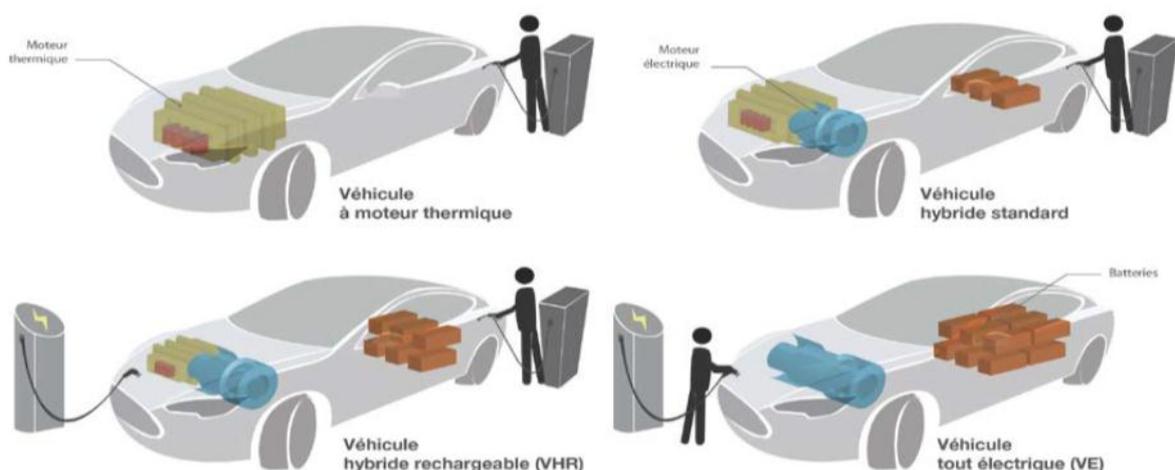


Figure I.1. Les types de véhicule électrique

Notons que les caractéristiques des véhicules électriques rechargeables ont fortement évolué au cours des dernières décennies grâce, entre autres, à l'introduction d'une nouvelle technologie de batteries.

Les batteries de type lithium-ion. Ces dernières offrent en effet des performances élevées (notamment en termes d'autonomie et de durée de vie) par rapport aux batteries plomb et nickel-cadmium des années 1990, compatibles avec une production industrielle. Les premiers modèles de grande diffusion ont ainsi été lancés en 2010 pour le véhicule 100% électrique et en 2012 pour l'hybride rechargeable. Si les premiers véhicules commercialisés correspondaient plutôt à des modèles haut de gamme, l'offre « constructeurs » n'a cessé de s'élargir avec l'apparition de modèles compacts destinés au grand public. Ainsi, chaque constructeur a aujourd'hui au moins un modèle électrique dans sa gamme et l'offre devrait poursuivre sa diversification dans les années à venir. [1]

## I.2. Véhicules tout électriques

### I.2.1. Histoire des véhicules tout électriques

Aujourd'hui, la voiture propre est un problème sur lequel travaillent nombre d'industriels de l'automobile, pour répondre aux problèmes que pose la pollution atmosphérique. La voiture électrique, que l'on présente d'ailleurs comme "la solution" au problème de la pollution des gaz d'échappement, ne date pas d'hier. Déjà, à la fin du 19ème siècle, au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique). D'ailleurs, les performances des premiers prototypes de véhicule électrique n'avaient rien à envier à celles des véhicules à propulsion thermique de l'époque.

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique.

Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler Jusqu'à 6 km/h. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, on voit sur la photo de la Figure I.2, Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui est la première au monde.

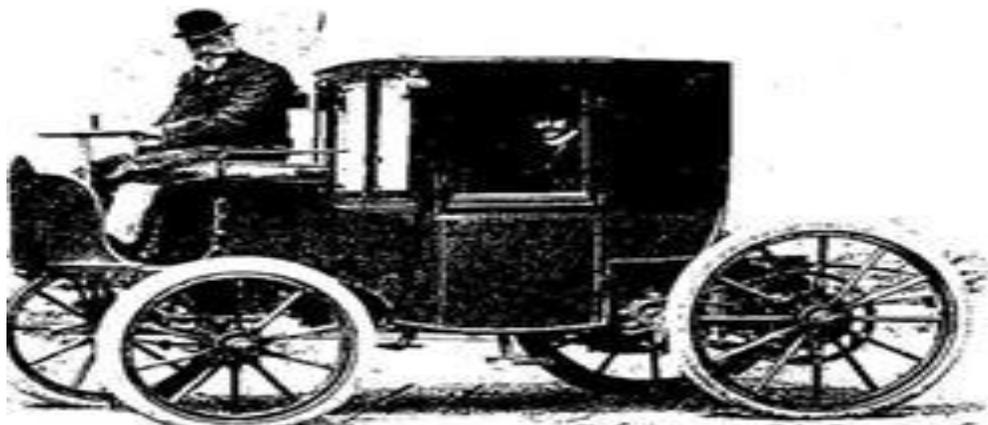
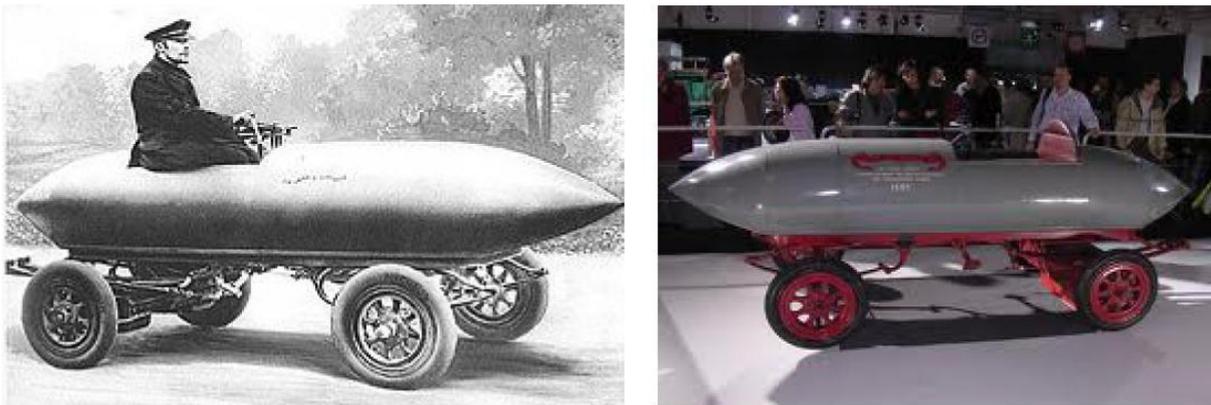


Figure I.2. Première voiture électrique au monde

En 1899 en Belgique, une société a construit "La Jamais Contente", la première voiture électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). La voiture était pilotée par le belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille (Figure I.3).

Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des voitures à essence et à vapeur. Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que ceux à essence.



**Figure I.3. La Jamais Contente**

En 1966, l'environnement commence à devenir une préoccupation. Le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973, date du premier choc pétrolier. Ce choc a dû favoriser l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, pratiquement rien n'a été fait dans ce sens.

En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors), Figure I.4



**Figure I.4. La Buick Skylark de GM (General Motors)**

En 1976, le Congrès américain adopte « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act », qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.

Dès 1988, la société automobile General Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius (Figure I.5).



**Figure I.5. La Prius (Toyota 1997)**

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant à partir de 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1 ; GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation ; Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières.

En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et pour les clients individuels en Avril 2010 suivie par la vente au public à Hong Kong en mai 2010.

En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) est une voiture électrique à cinq places annoncée par Nissan en 2009, a été commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et elle est devenu disponible dans l'ensemble de l'Europe depuis fin 2011.

Aujourd'hui, la voiture tout électrique commence à percer, moyennant une autonomie en évolution permanente. De nombreux modèles sont proposés à la vente. L'implication des villes dans la protection de l'environnement joue également un rôle : les villes développent les réseaux de bus électriques et récemment de voitures électriques en location (Autolib/Paris fin 2011) qui donnent ainsi une bonne visibilité à l'électrique.

A l'heure actuelle, l'ensemble des véhicules électriques proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la pile à combustible qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie (400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques.

Le prix de ces véhicules est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique. [2]



Figure 1.6 : La Nissan Leaf

### I.2.2. Comparaison véhicule électrique avec les autres :

Les véhicules électriques (VE) utilisent un moteur électrique pour la traction et des batteries chimiques, des piles à combustible, des ultra-condensateurs et / ou des volants d'inertie pour les sources d'énergie correspondantes.

Le véhicule électrique présente de nombreux avantages par rapport au véhicule à moteur à combustion interne classique (ICEV), tels que l'absence d'émissions, un rendement élevé, une indépendance vis-à-vis du pétrole et un fonctionnement silencieux et en douceur. Les principes opérationnels et fondamentaux dans les véhicules électriques (VE) et les véhicules utilitaires légers (ICEV) sont similaires. Il existe toutefois certaines différences entre les véhicules utilitaires légers (ICEV) et les véhicules électriques (VE), tels que l'utilisation de réservoirs d'essence et de batteries, (ICE) vs moteur électrique et les exigences différentes en matière de transmission. [3]

### I.2.3 Composants d'un véhicule électrique :

Les principaux composants d'un système VE sont le moteur, le contrôleur, la source d'alimentation et la transmission. La structure détaillée d'un système VE et l'interaction entre ses divers composants sont illustrés à la figure 1.7. La Figure 1.7 illustre également les choix disponibles pour chacun des composants de niveau de sous-système. Les batteries électrochimiques ont été la source d'énergie traditionnelle dans les véhicules électriques. Les batteries au plomb ont été le premier choix, en raison de leur technologie bien développée et de leur coût réduit, bien que de nouvelles technologies prometteuses soient testées dans de nombreux prototypes. Les batteries ont besoin d'un chargeur pour restaurer le niveau d'énergie stockée une fois que leur énergie disponible est presque épuisée du fait de leur utilisation. Des sources d'énergie alternatives sont également en cours de développement pour les véhicules à zéro émission. Le problème de la portée limitée des véhicules électriques alimentés par batterie a incité à rechercher d'autres sources d'énergie, telles que les piles à combustible et les volants d'inertie. Des prototypes ont été développés avec des piles à combustible, tandis que des véhicules de production vont émerger dans un proche avenir.

La majorité des véhicules électriques développés jusqu'à présent sont basés sur des machines à courant continu (MCC), des machines à induction ou des machines à aimants permanents. Les inconvénients des MCC ont poussé les développeurs de véhicules électriques à se pencher sur différents types de machines à courant alternatif (AC). Les machines à induction à faible coût et sans entretien sont devenues une alternative attrayante pour de nombreux développeurs. Cependant, le fonctionnement à haute vitesse des machines à induction n'est possible qu'avec une pénalité en taille et en poids. Excellente performance avec

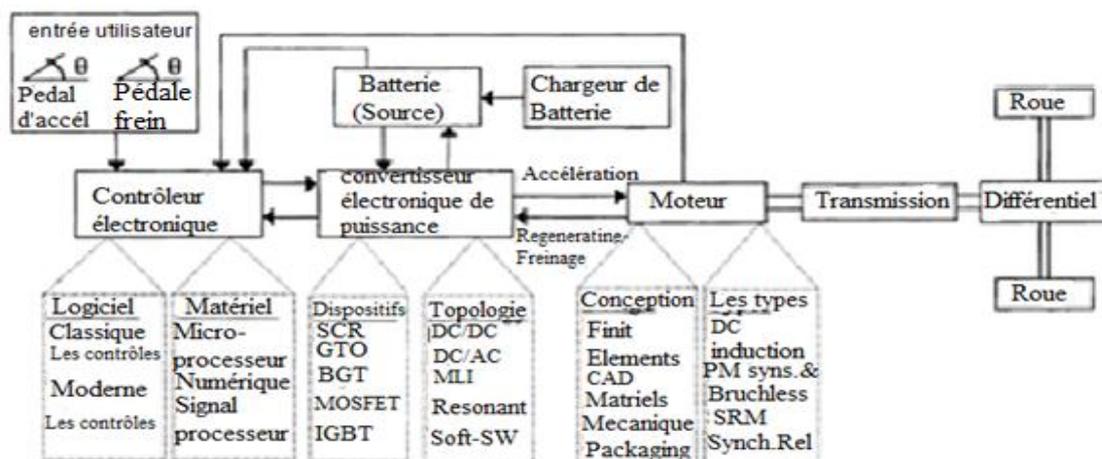


Figure I.7. Principaux composants électriques et choix pour un système EV.

Les caractéristiques de densité de puissance élevée des machines à aimants permanents en font une solution attrayante pour les applications VE, bien que le coût des aimants permanents puisse devenir

prohibitif. La densité de puissance élevée et le coût de production potentiellement faible des machines à réluctance commutée les rendent idéales pour les applications VE. Cependant, le problème du bruit acoustique a jusqu'à présent eu un effet dissuasif sur l'utilisation de machines à réluctance commutée dans les véhicules électriques. La conception du moteur électrique comprend non seulement les aspects électromagnétiques de la machine, mais également des considérations thermiques et mécaniques. Les tâches actuelles de conception de moteurs reposent sur des études par éléments finis et divers outils de conception assistée par ordinateur, ce qui rend le processus de conception extrêmement efficace.

Le moteur électrique est entraîné par une unité de traitement de puissance basée sur l'électronique de puissance qui convertit la tension continue fixe disponible à partir de la source en une source de tension variable à fréquence variable contrôlée pour maintenir le point de fonctionnement souhaité du véhicule. Le circuit électronique de puissance composé de dispositifs à semi-conducteurs de puissance a connu un développement considérable au cours des 3 dernières décennies. La technologie habilitante de l'électronique de puissance est un élément moteur clé dans la mise au point d'un groupe motopropulseur performant et performant pour les véhicules électriques. Il existe aujourd'hui des dispositifs de grande puissance dans un emballage compact, permettant de développer des unités de traitement de puissance légères et efficaces connues sous le nom de moteurs d'entraînement de puissance électroniques. Les progrès réalisés dans les dispositifs à semi-conducteurs de puissance et la technologie d'intégration à très grande échelle sont à l'origine du développement de circuits électroniques de puissance compacts et efficaces. Les développements dans les processeurs de signaux numériques ou les microprocesseurs à grande vitesse permettent la mise en œuvre complexe d'algorithmes de contrôle avec un degré élevé de précision. Le contrôleur comprend des algorithmes pour l'entraînement du moteur dans la boucle interne ainsi que le contrôle au niveau du système dans la boucle externe. [4]

#### **I.2.4. Caractéristiques des véhicules électriques :**

Le véhicule électrique est alimenté par au moins un moteur électrique alimenté par des batteries rechargeables. Il ne dégage aucune émission de gaz à effet de serre et les batteries peuvent généralement être rechargées en quelques heures.

Parce qu'ils ne disposent pas d'un moteur à combustion interne, les véhicules électriques n'ont pas besoin du niveau de maintenance requis par les moteurs à combustion interne. Les véhicules électriques fonctionnent aussi beaucoup plus silencieusement.

Les véhicules électriques fonctionnent avec un niveau d'efficacité supérieur à celui des véhicules à essence. En fait, 59 à 62% de l'énergie du réseau électrique est convertie en énergie aux roues par les véhicules électriques, contre 17 à 21% par les véhicules à essence. Les véhicules électriques ont également le potentiel de réduire la dépendance énergétique, car l'énergie électrique peut être générée au niveau national.

De nombreux véhicules électriques sont également équipés d'un freinage par récupération, un système permettant de stocker l'énergie cinétique associée au freinage dans les batteries ou les super condensateurs de la voiture. Cette énergie peut ensuite être utilisée pour étendre la portée du véhicule électrique. Les Nissan Leaf, les Toyota Prius, les Chevrolet Volt et Tesla Roadster sont des exemples de véhicules électriques dotés de capacités de freinage par récupération. [5]

### I.2.5. VE commercialisés :

Deux exemples de VE commercialisés de nos jours sont la Peugeot 106 électrique et EV1 de General Motors, présentées sur la figure 1.8. En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors). Dès 1988, le président de GM, Roger Smith, lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998. La Peugeot 106 électrique a été vendue en 9000 exemplaires en juin 2002. Ce véhicule est entraîné par un moteur à courant continu à excitation séparée d'une puissance nominale de 11kW. La puissance maximale élevée à 20kW. Sa vitesse maximale est de 90 km/h et atteint les 50km/h en 8.5s.

Quelques prototypes ont été testés à partir de la Peugeot 106. Des performances ont été atteintes avec le prototype " 106 Vedelic " mais les performances sont toujours insuffisantes par rapport à celle des véhicules thermiques. [6]



EV1 de GM



Peugeot 106 Électrique

Figure I.8. Exemples de VE commercialisés.

### I.2.6. Avantages et inconvénients du véhicule électrique :

#### I.2.6.1. Avantages :

Ce type de moteur permet de réaliser une économie d'essence en utilisant de l'énergie électrique sous forme de batteries ou de piles.

Les véhicules électriques ont des impacts environnementaux très faibles durant tout leur cycle de vie, de la production à l'élimination.

Lors de son utilisation, une voiture électrique ne produit pas directement de gaz polluants ni de gaz à effet de serre. De plus, elle est peu bruyante et diminue ainsi la pollution sonore.

Les véhicules électriques semblent être la solution la plus prometteuse pour une utilisation urbaine, compte tenu de l'autonomie relativement limitée qu'assurent les batteries et du rapport coûts/bénéfices potentiellement supérieur que présente le déploiement des infrastructures de recharge dans les villes.

### **I.2.6.2. Inconvénients :**

L'autonomie est souvent inférieure à 200 km, là où une voiture classique a une autonomie de 400 à plus de 800 km. Cependant, une Audi A2 électrique a battu le record en parcourant une distance de 600 km sans recharge !

La vitesse est limitée, entre 60 et 80 km/h de moyenne.

Les moteurs électriques utilisent une source d'énergie dont on maîtrise assez mal le stockage.

Les batteries d'accumulateur sont lourdes, encombrantes et longues à recharger et leurs recyclages posent encore problème. [7]

## **I.3. Véhicules électriques hybrides :**

### **I.3.1. Historique des véhicules électriques hybrides :**

Même si le VH apparaît maintenant comme une solution aux faibles performances des VE actuels le concept de VH n'est pas nouveau. En effet, il est aussi vieux que l'automobile lui-même. A l'origine, son but n'était pas de minimiser la consommation de carburant, mais surtout d'assister les faibles performances des moteurs à combustion de l'époque.

Les premières VH de type série ou parallèle ont été présentées à Paris au Salon de 1899. Le VH parallèle avait un petit moteur thermique refroidi par air, assisté par un moteur électrique et alimenté par des batteries au plomb. Le moteur électrique était utilisé dans le cas où la puissance de traction dépassait la puissance du moteur thermique. Lors d'un stationnement ou d'un roulage au-dessous de la capacité du moteur thermique, la batterie était chargée par le moteur thermique.

Le premier VH série a été conçu pour augmenter l'autonomie d'un VE. Deux moteurs électriques entraînaient séparément les deux roues arrière, la batterie étant rechargée par un moteur thermique de  $\frac{3}{4}$  chevaux couplé à un générateur de 1,1 kW. [8]

Ces deux types de VH ont été commercialisés jusqu'en 1914 avant de disparaître complètement, à cause des améliorations des moteurs à combustion interne.

Même si quelques études et prototypes de VH ont vu le jour après les années 70, l'intérêt des constructeurs est réapparu dans les années 90, une fois convaincus que le VE ne pouvait pas, dans l'état de la technologie actuelle, remplacer les véhicules thermiques. Le plus gros effort de développement et de commercialisation a été fait par les constructeurs japonais. Ces efforts se sont concrétisés par des VH

commercialisés apportant de réels gains en consommation. Le VH le plus connue est la Prius de Toyota commercialisée à partir de 1997 au Japon et suivi par la Prius 2 sortie en 2004. Honda avec son Insight et sa Civic Hybride est un autre pionnier dans le domaine. En effet, Honda a été le premier constructeur automobile à commercialiser une VH en dehors du Japon et notamment en Amérique du Nord avec l'Insight en 1999. En 2002 il a été suivi par la Civic Hybrid, le premier VH « véritablement commercialisé » [Honda]. Aujourd'hui de plus en plus de voitures hybrides apparaissent, comme la Ford Escape Hybrid<sup>35</sup>, la Lexus<sup>36</sup> RX400h, GS450h et LS600hL ou le Toyota<sup>37</sup> Highlander, etc. [8]

### **I.3.2. Composants utilisés dans les véhicules hybrides :**

Ce paragraphe reprend de façon succincte les différents composants couramment utilisés. On retrouve évidemment les composants servant à stocker l'énergie, deux organes de traction de type différent (électrique et mécanique) ainsi que des éléments de transmission. Pour plus de détails sur ces derniers (équations fondamentales mises en œuvre, etc.).

#### **• Stockage de l'énergie**

Les véhicules hybrides utilisent au moins une source d'énergie réversible. Pour stocker l'énergie, le composant le plus couramment utilisé est la batterie. Les batteries au plomb sont parmi les moins chères mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, ayant généralement un meilleur rendement et sont plus légères peuvent être utilisées, comme par exemple le Nickel Métal Hydrure, le Lithium Ion. Néanmoins, aujourd'hui, leur coût est plus élevé et leur gestion (température, cycles de charge décharge, estimation de l'état de charge) s'avère plus délicate.

D'autres composants ont été envisagés pour le stockage de l'énergie : les super capacités et les volants d'inertie mais leur usage reste relativement marginal. Il semble que l'association de batteries et de super capacités soit une solution intéressante d'un point de vue technique mais relativement coûteuse à mettre en œuvre.

Souvent, pour des raisons évidentes de coût, les principaux composants et/ou technologies mis en œuvre dans les véhicules hybrides sont déjà utilisés dans l'automobile.

#### **• Moteurs :**

Toutes les technologies du moteur thermique sont envisageables. On peut citer, par exemple, les moteurs diesel, diester, essence, GPL ou bien encore au gaz naturel. Chacune de ces technologies a des caractéristiques différentes que ce soit en termes de pollution, de performance, de rendement, d'encombrement et de poids, ou de consommation. Les technologies les plus couramment utilisées pour les applications au véhicule hybride sont les moteurs diesel et essence.

Pour les moteurs électriques, toutes les technologies sont également envisageables : moteur à courant continu, synchrone ou asynchrone, etc. Une des caractéristiques essentielles des véhicules hybrides est le taux d'hybridation, c'est à dire le rapport entre la puissance du moteur thermique et la

puissance totale installée dans le véhicule. Lorsque le taux d'hybridation est proche de 1, le moteur électrique a une faible puissance, comme par exemple les alterna-démarrateurs. Qui permettent de démarrer quasi instantanément le moteur thermique. Lorsque le taux d'hybridation est proche de 0.5 le ou les moteurs électriques participent à la propulsion du véhicule et/ou à la recharge des batteries. Généralement, les moteurs de traction sont intégrés dans le groupe motopropulseur, mais pour certaines applications, les moteurs roues sont situés dans le moyeu de chaque roue.

• **Piles à combustible :**

Les piles à combustible produisent de l'électricité à partir d'hydrogène et leur fonctionnement est pratiquement zéro émission. Cependant, leur utilisation dans le domaine de l'automobile reste au stade du prototype et soulève de nombreux problèmes comme par exemple le stockage de l'hydrogène, ou l'encombrement des composants annexes (compresseurs, radiateurs, etc.). D'autre part, la distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution de carburant actuel. Pour remédier à ce problème, des reformeurs embarqués permettraient de produire l'hydrogène à partir de carburants fossiles, (méthanol, éthanol) mais là encore de nombreux problèmes techniques sont à résoudre.

• **Transmissions :**

Les transmissions mécaniques sont celles couramment utilisées dans les véhicules conventionnels : embrayage (utilisé pour accoupler/désaccoupler deux ensembles mécaniques), boîte de vitesses (manuelle ou automatique) ou variateur continu de vitesse, train planétaire (système mécanique à trois arbres dans lequel le régime de l'arbre de sortie est égal à la somme des régimes des arbres d'entrées), différents types de réducteurs (à courroie, chaîne ou engrenages), etc.

Les différentes façons d'associer ces composants permettent de définir plusieurs architectures de groupes motopropulseurs. [9]

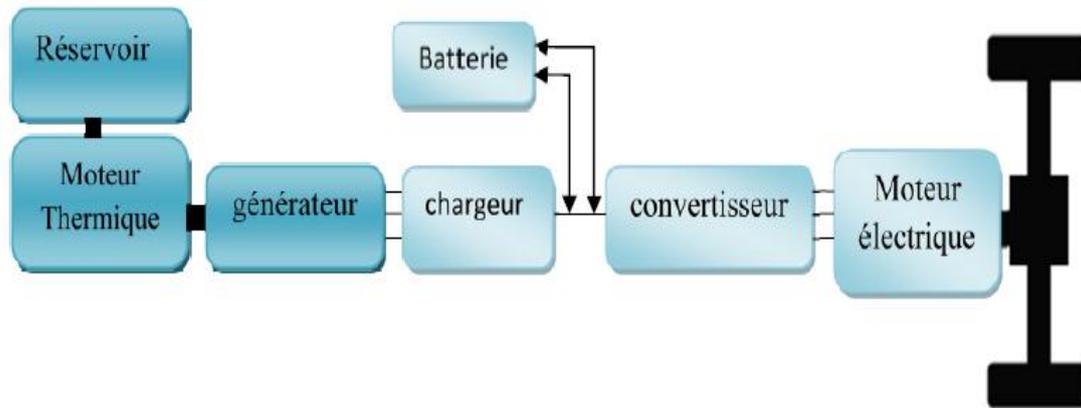
### **I.3.3. Principales architectures des véhicules hybrides :**

Cette classification est la plus utilisée et la plus détaillée. Elle permet de mettre en évidence les couplages mis en jeu. Le choix dans ce rapport s'est porté sur trois principales architecture : hybride série, parallèle et mixte. [10]

#### **I.3.3.1. Architecture série :**

Cette architecture hybride est celle dont la conception est la plus simple. Dans l'architecture série, la propulsion est intégralement assurée par un moteur électrique. Le moteur thermique est mécaniquement découplé des roues et directement lié à une génératrice à vitesse constante via une jonction mécanique qui assure la charge de la batterie. Celle-ci peut alors alimenter une machine électrique connectée aux roues. Les deux moteurs donc en série, on peut alors choisir une vitesse du

moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum, le schéma principe d'un tel véhicule hybride est donné sur la figure I.9. [10]



**Figure I.9. Architecture série du véhicule hybride.**

Les avantages du véhicule hybride série sont :

- une autonomie et une puissance disponible comparable à celle de véhicule thermique.
- une gestion globale de l'énergie présente dans le système.
- possibilité (réduite) de mode zéro émission (aucune émission gazeuse).

L'inconvénient majeur du véhicule hybride série est l'importance du système de motorisation de même pour que le véhicule hybride parallèle avec les mêmes conséquences d'augmentation de la masse, du cout et la diminution des places disponibles.

### **I.3.3.2. Architecture parallèle :**

La première idée est de faire deux véhicule en un. En bénéficiant des avantages de chacun. Le véhicule hybride parallèle possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle (d'où le nom) : un électrique et l'autre thermique. Les deux moteurs ont utilisés séparément et on résout le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour le grand déplacement hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique. Le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tous les deux directement connectés à la transmission, donc aux roues. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon parallèle au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues. Le schéma de principe d'un tel véhicule parallèle est donné sur la figure I.10.[10]

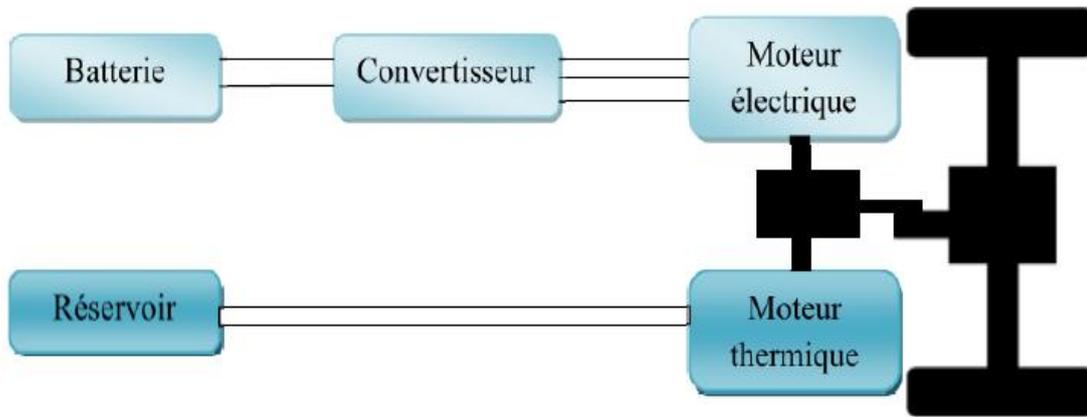


Figure I.10. Architecture parallèle du véhicule hybride.

Les avantages du véhicule hybride parallèle sont :

- Une autonomie et des performances comparables à celle d'un véhicule thermique.
- Possibilité du fonctionnement en mode tous électrique et l'émission zéro du gaz.

Les inconvénients du véhicule hybride parallèle sont :

- L'importance du système motorisation lourd et volumineux, ce qui augmente la masse et limite la place disponible, tout en augmentant le coût du véhiculé.
- Une utilisation peu rationnelle de l'énergie disponible avec une redondance de fonctionnement entre les deux moteurs.

### I.3.3.3. hybride Série-parallèle :

Enfin, il existe une famille de structures alliant les avantages des hybrides séries et des véhicules hybrides parallèles. Ces hybrides, appelés mixtes ou à dérivation de puissance.

Une architecture série-parallèle, combine les modes de fonctionnement des deux architectures série et parallèle. Cette dernière utilise un train planétaire et une première machine électrique qui permet d'amener le moteur sur ses meilleurs points de fonctionnement là où il fournit son meilleur rendement, une deuxième machine participe à la traction.

Au sein de ces structures, une partie de l'énergie délivrée par le moteur thermique est transmise mécaniquement aux roues. Parallèlement, les machines électriques prélèvent ou fournissent de l'énergie à la transmission pour satisfaire les objectifs (accélération, charge ou décharge de la batterie, consommation optimale du moteur thermique). Dans la majorité des cas il y a deux machines électriques, pouvant chacune être soit motrice soit génératrice. Cette configuration permet donc au moins quatre modes de fonctionnement ayant chacun certains avantages. Une telle architecture est décrite sur la figure I.11 : [10]

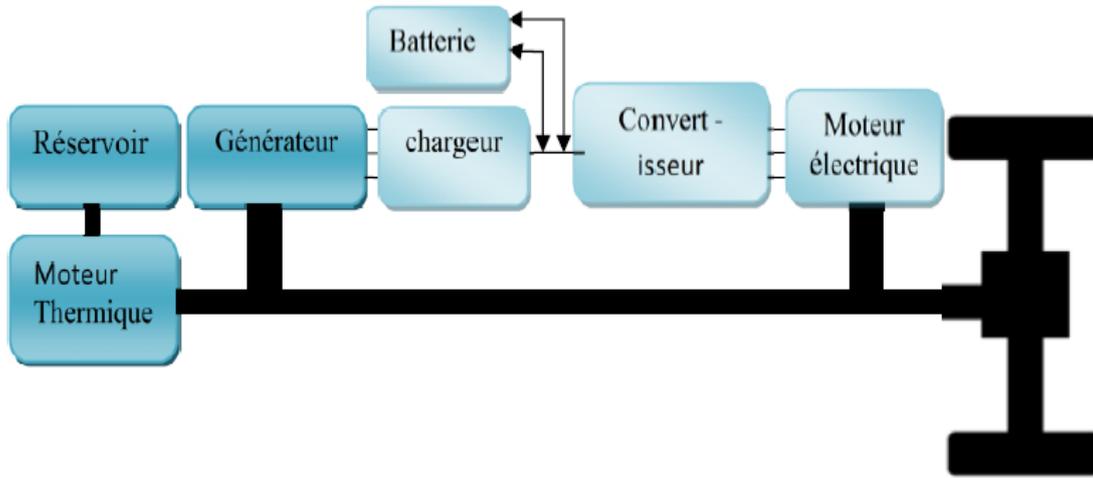


Figure I.11. Architecture série-parallèle du véhicule hybride.

L'inconvénient de ces structures base sur le nombre des machines électriques utilisées, elles nécessitent au moins deux machines en plus du moteur thermique ce qui les rends lourds et couteuses. Et elles sont généralement plus difficiles à commander en raison de leur complexité mécanique.

Cette architecture présente l'avantage d'être très performante, sans nécessiter l'utilisation d'embrayage ou de variateur de vitesse. Les degrés de libertés disponibles pour la commande doivent permettre d'obtenir potentiellement de meilleures performances énergétiques et environnementales.

Une comparaison faite par Toyota entre les trois configurations d'hybride décrites ci-dessus Est présentée dans le Tableau (I.1) Ce dernier met en évidence l'élimination des désavantages des Configurations série et parallèle dans la configuration série/parallèle. [11]

	Economie de carburant				Performances	
	Arrêt	Récupération d'énergie	Gestion de l'énergie	Rendement total	Accélération	Régime permanent
Série	●	⊙	●	●	○	○
Parallèle	●	●	○	●	●	○
Série/ Parallèle	⊙	⊙	⊙	⊙	●	●

⊙ Excellent      ● Supérieur      ○ Défavorable

Tableau I.1. Comparaison entre les configurations série, parallèle et série /parallèle (source -Toyota)

## I.4. Commandes de véhicule hybride :

Étant donné que le véhicule hybride est un système complexe de composants électriques et mécaniques contenant des technologies multidisciplinaires, les techniques et les méthodologies de contrôle modernes jouent un rôle important dans la technologie hybride. La performance d'un VEH dépend de nombreux facteurs interdisciplinaires; Par conséquent, des stratégies de contrôle avancées pourraient améliorer considérablement les performances et réduire les coûts. Les objectifs généraux de contrôle d'un véhicule hybride sont de maximiser l'économie de carburant et de minimiser les émissions. Afin d'atteindre les objectifs, certaines variables clés du système doivent être gérées de manière optimale, notamment le flux d'énergie du système, la disponibilité de l'énergie et de la puissance, la température des sous-systèmes et la dynamique du moteur et du moteur électrique. Certains problèmes typiques de contrôle du VEH sont les suivants:

(a) Faites travailler l'ICE sur les points de fonctionnement optimaux Chaque ICE dispose de points de fonctionnement optimaux sur son plan couple-vitesse en termes d'économie de carburant et d'émissions. Si l'ICE fonctionne sur ces points, il est possible d'obtenir une économie de carburant maximale, des émissions minimales ou un compromis entre économie de carburant et émissions. C'est un objectif de contrôle difficile pour un VEH de faire fonctionner l'ICE sur ces points dans diverses conditions de fonctionnement.

(b) Minimiser la dynamique de l'ICE Lorsqu'un ICE possède une inertie, une énergie supplémentaire est consommée pour générer la cinétique correspondante chaque fois que la vitesse de fonctionnement change. Par conséquent, la vitesse de fonctionnement de l'ICE doit être maintenue constante autant que possible et toute fluctuation rapide doit être évitée. Les VEH permettent de minimiser la dynamique lorsque la charge, la route et les conditions météorologiques changent.

(c) Optimiser la vitesse de fonctionnement de l'ICE Selon le principe de fonctionnement d'un ICE, son efficacité énergétique est faible si l'ICE fonctionne à basse vitesse. La vitesse de l'ICE peut être contrôlée indépendamment avec la vitesse du véhicule et peut même être arrêtée lorsque sa vitesse est inférieure à une certaine valeur afin d'obtenir des avantages maximaux.

(d) Minimiser les heures d'activation / désactivation de l'ICE; L'ICE d'un VEH peut être allumé et éteint fréquemment car il dispose d'une source d'alimentation secondaire; En outre, il est possible de déterminer si ICE doit être activé / désactivé en se basant sur une méthode de contrôle optimale afin de minimiser la consommation de carburant et les émissions.

(e) Gestion optimale de l'état de charge de la batterie (ÉDC) Le niveau de charge de la batterie de la batterie doit être contrôlé de manière à fournir suffisamment d'énergie pour alimenter le véhicule, accepter l'énergie de récupération en freinage ou en descente et maximiser sa durée de vie. La stratégie de contrôle la plus simple consiste à éteindre l'ICE si l'ÉDC de la batterie est trop élevé et à l'activer si

l'ÉDC est trop bas. Une stratégie de contrôle plus avancée devrait pouvoir réguler la puissance de sortie de l'ICE sur la base du niveau d'ÉDC réel de l'SSE.

(f) Contrôler de manière optimale la tension du bus haute tension La tension réelle du bus haute tension d'un VEH doit être contrôlée pendant la décharge et la charge pour éviter de dépasser ou de dépasser les limites; sinon, le SSE ou d'autres composants pourraient être endommagés de manière permanente.

(g) Optimiser la distribution de l'électricité Puisqu'il existe deux sources d'alimentation dans VEH, la tâche de contrôle la plus difficile et la plus importante consiste à diviser le véhicule demande de puissance à l'ICE et le moteur électrique en fonction de la conduite scénario, les conditions routières et météorologiques et l'état du SSE pour atteindre les meilleures économies de carburant, émissions minimales et durée de vie maximale du véhicule SSE.

(h) Respectez la politique zéro émission Dans certains domaines, tels que les tunnels ou les ateliers, il peut être nécessaire d'utiliser certains VEH en mode purement électrique.

(i) Contrôle optimal du système de transmission VEH Les systèmes VEH les plus récents possèdent non seulement les caractéristiques de l'hybride parallèle, mais intègrent également des avantages uniques de la série hybride. La clé de cette implémentation consiste à utiliser un système de transmission avancé qui fournit au moins deux canaux de transmission mécaniques via une commande d'embrayage. En conduite urbaine, le système VEH exploite au maximum les avantages d'une série hybride. Si une accélération à pleins gaz est nécessaire, la puissance requise est fournie simultanément par le moteur à combustion interne et le moteur électrique, mais le moteur à combustion interne fonctionne autant que possible à la vitesse constante. En conduite normale, le moteur à combustion interne et le moteur électrique alimentent l'énergie de manière collaborative afin d'obtenir une économie de carburant maximale. [12]

## **I.5. Véhicules à pile à combustible :**

### **I.5.1. Historique des véhicules à pile à combustible :**

Dès 1839, Sir William Grove (souvent appelé le « père de la pile à combustible ») découvrit qu'il serait possible de produire de l'électricité en inversant l'électrolyse de l'eau. Ce n'est qu'en 1889 que deux chercheurs, Charles Langer et Ludwig Mond, ont inventé le terme « pile à combustible », alors qu'ils essayaient de concevoir la première pile à combustible pratique utilisant de l'air et du charbon. Au début des années 1900, de nouvelles tentatives ont été faites pour développer des piles à combustible capables de convertir le charbon ou le carbone en électricité, mais l'avènement de l'ICE a temporairement anéanti tout espoir de développement ultérieur de la technologie naissante.

Francis Bacon développa en 1932 ce qui fut peut-être le premier appareil à pile à combustible à succès, avec une pile hydrogène-oxygène utilisant des électrolytes alcalins et des électrodes au nickel - alternatives peu coûteuses aux catalyseurs utilisés par Mond et Langer. En raison d'un nombre important d'obstacles techniques, ce n'est qu'en 1959 que Bacon et sa société ont présenté pour la première fois un

système pratique de pile à combustible de 5 kW. Harry Karl Ihrig a présenté son désormais célèbre tracteur de 20 Cheval alimenté par une pile à combustible la même année.

La NASA a également commencé à construire des générateurs électriques compacts destinés aux missions spatiales à la fin des années 50. La NASA a rapidement financé des centaines de contrats de recherche dans le domaine de la technologie des piles à combustible. Les piles à combustible jouent désormais un rôle éprouvé dans les programmes spatiaux, après avoir fourni de l'électricité à plusieurs missions spatiales.

Au cours des dernières décennies, un certain nombre de fabricants - y compris de grands constructeurs automobiles - et divers organismes fédéraux ont soutenu les recherches en cours sur le développement de la technologie des piles à combustible pour une utilisation dans les véhicules à piles à combustible et autres applications.<sup>14</sup> La production, le stockage et la distribution de l'hydrogène sont les plus importants défis. Vraiment, les véhicules à piles à combustible ont encore beaucoup de chemin à parcourir avant de pouvoir être introduits sur le marché. [13]

### I.5.2. Principe de fonctionnement :

Le principe de base de la pile à combustible est la libération d'énergie à la suite d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène. La principale différence entre cela et la simple combustion du gaz est que l'énergie est libérée sous forme de courant électrique, plutôt que de chaleur. Comment ce courant électrique est-il produit?

Pour comprendre cela, nous devons considérer les réactions séparées ayant lieu à chaque électrode. Ces détails importants varient selon les types de pile à combustible, mais si nous commençons par une pile basée sur un électrolyte acide, nous commencerons par le type le plus simple et le plus courant.

À l'anode d'une pile à combustible à électrolyte acide, l'hydrogène gazeux s'ionise en libérant des électrons et créer des ions  $H^+$  (ou des protons):



Cette réaction libère de l'énergie. À la cathode, l'oxygène réagit avec les électrons provenant de l'électrode et les ions  $H^+$  de l'électrolyte pour former de l'eau:



Il est clair que pour que ces deux réactions se déroulent en continu, les électrons produits à l'anode doivent traverser un circuit électrique jusqu'à la cathode. De plus, les ions  $H^+$  doivent passer à travers l'électrolyte. Un acide est un fluide avec des ions  $H^+$  libres, et sert donc à cela.

Très bien. Certains polymères peuvent également contenir des ions  $H^+$  mobiles. Ces matériaux sont appelés « membranes échangeuses de protons (MEP) », car un ion  $H^+$  est également un proton.

En comparant les équations (I.1) et (I.2), nous pouvons voir que deux molécules d'hydrogène seront nécessaires pour chaque molécule d'oxygène si le système doit être maintenu en équilibre. Ceci est illustré à la figure I.12. Il convient de noter que l'électrolyte ne doit laisser passer que les ions  $H^+$  et non les électrons. Sinon, les électrons passeraient à travers l'électrolyte, pas autour du circuit externe, et tout serait perdu. [14]

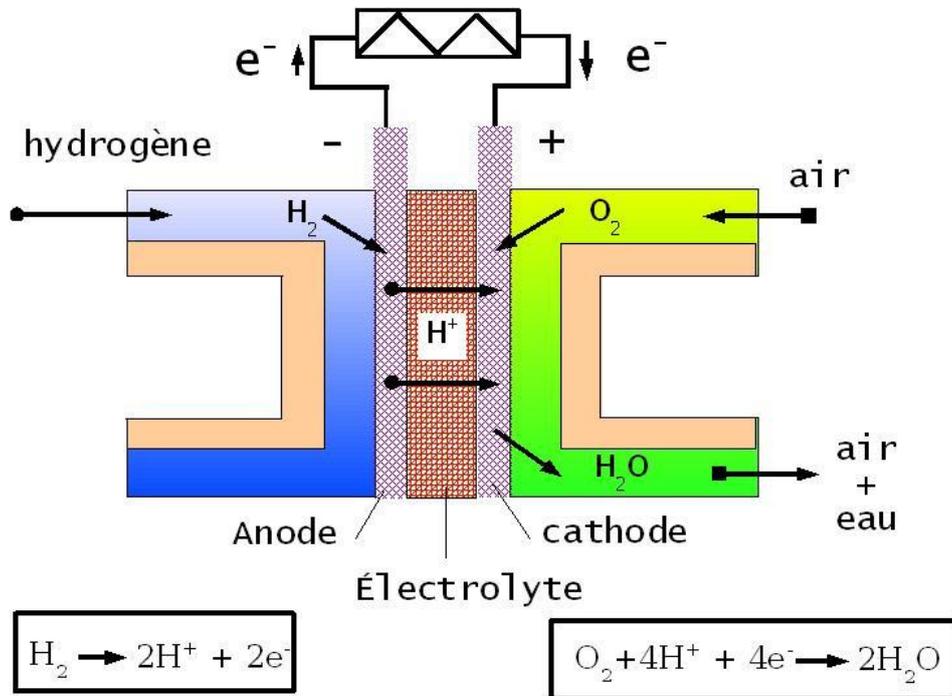


Figure I.12. Schéma Principal de fonctionnement des piles à combustible

### I.5.3. Différentes technologies de piles à combustibles :

En fonction de la nature de l'électrolyte utilisé et de la température de fonctionnement, les piles à combustible alimentées en hydrogène (pur ou reformé 2) sont regroupées généralement en cinq familles principales (comparées dans le tableau I.2) :

1. les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell).
2. les piles à combustible alcalines (AFC, Alkaline Fuel Cell).
3. les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell).
4. les piles à combustible à carbonates fondus (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell).
5. les piles à combustible à oxyde solide (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell).

Paramètres	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Puissance électrique	1 W à 250 kW	10 à 50 kW	100 à 200 kW	500 kW à 10 MW	1 kW à 10 MW
Densité de courant	0,6 A.cm <sup>-2</sup>	0,09 A.cm <sup>-2</sup>	0,18 A.cm <sup>-2</sup>	0,13 A.cm <sup>-2</sup>	0,25-1,25 A.cm <sup>-2</sup>
Rendement	30 à 50%	40 à 60%		50 à 60%	50 à 70%
Durée de vie	5000 h	2000 h	40000 h	20000 h	20000 h
Pression	2-5 bar	1 bar	1 bar	1 bar	1 bar
Température	60-90°C	50-250°C	160-220°C	600-700°C	800-1000°C
Électrolyte	Polymère perfluoré (solide)	Hydroxyde de Potassium (liquide)	Acide phosphorique (liquide)	Carbonate de Lithium/potassium (liquide)	Céramique (solide)
Catalyseur	Platine	Platine, nickel	Platine	Nickel	Perovksites
Combustible	Hydrogène pur ou reformé	Hydrogène	Gaz naturel reformé	Reformage interne de gaz naturel	Gaz naturel
Applications	Transports, portables, stationnaires	Spatiales, transports	Transports, stationnaires	Stationnaires	Transports (APU), stationnaires

**Tableau I.2. Comparaison des différentes technologies de piles à combustible**

A noter qu'il existe également la famille des piles à combustible à combustion directe de méthanol (DMFC, Direct Méthanol Fuel Cell) : elles proposent des caractéristiques proches de celles des piles PEMFC, avec une température de fonctionnement de 60 à 90°C mais un rendement de seulement 10 à 30%. L'alimentation de ce type de piles en méthanol et non en hydrogène les oriente vers une application surtout maritime (sous-marins).

Le principal avantage des piles à combustible fonctionnant à haute température (> 700°C) est qu'elles ont la possibilité d'utiliser directement des composés hydrogénés comme combustible, sans catalyseur noble. En revanche, la durée importante de mise en fonctionnement, due à la montée en température de ces piles, représente un handicap majeur, surtout si l'on s'intéresse aux applications non stationnaires, Produit à partir de combustibles hydrocarbonés, hydrocarbures ou alcools (méthanol ou éthanol).

Les piles à basse température, elles, ne présentent pas cet inconvénient, mais elles utilisent en contrepartie des catalyseurs nobles, chers et sensibles à l’empoisonnement<sup>3</sup>, notamment par le monoxyde de carbone CO et certains composés soufrés. Dans le secteur des transports, les piles de type SOFC et PEMFC sont les plus prometteuses, du fait de leur électrolyte solide – qui permet d’écarter tout problème de fuites et de faciliter l’industrialisation en grande série - et de leur compacité qui facilite l’intégration aux véhicules. [15]

#### **I.5.4. Les Caractéristiques :**

La puissance d’un PAC est régulée en fonction du débit et de la pression partielle d’hydrogène injecté dans l’anode. La pression d’air de l’air fourni à la cathode est liée à la demande de courant électrique sur le PAC; 10 secondes sont nécessaires pour augmenter la pression. La pression peut être diminuée plus rapidement.

La pression de fonctionnement conduit à deux conceptions principales: PAC basse pression et haute pression. Les cellules basses pression ont un temps de réponse lent d’environ 10 s. Les cellules basses pression ne peuvent pas suivre les exigences d’un cycle de conduite typique. L’alimentation en hydrogène et en oxygène est nécessaire. Généralement, 10% de la puissance PAC est consommée par des équipements auxiliaires. Le PAC haute pression a une réponse rapide et peut répondre aux exigences d’un cycle de conduite typique. Cependant, la réponse rapide absorbe 25% de la puissance grâce aux équipements auxiliaires nécessaires. [16]

#### **I.6. Conclusion :**

Nous avons vu, à travers les notions présentées dans ce chapitre que le VE et le VEH rechargeables constituaient la solution actuellement la plus intéressante par rapport aux aspects technique, économiques et écologiques. Aussi, dans la suite de notre projet nous considérons un VE. Ce choix se justifie par l’amélioration de confort du conducteur et de permettre une réduction des gaz à effet de serre et donc la pollution atmosphérique.

# CHAPITRE 02

## ETUDE ET MODELISATION DES VEHICULES ELECTRIQUES

## II.1. Introduction :

Ce chapitre présente la modélisation de la dynamique longitudinale. Ces modèles permettent de prédire le mouvement longitudinal du véhicule. Il faut noter qu'il existe déjà des travaux sur ce thème. La tâche consiste alors à les adapter à notre besoin dans le cas du modèle dynamique longitudinal ou de proposer des nouveaux modèles plus adaptés dans le cas de la modélisation. Dans cette démarche, nous allons proposer des alternatives pour contourner des absences d'information ou d'instrumentation que nous allons préciser tout au long de ce chapitre. L'ensemble des démarches de modélisation peut se résumer alors de façon suivante. L'équation du mouvement longitudinal est obtenue à partir des forces externes appliquées au véhicule et du système de transmission en appliquant les principes de base de la mécanique. La validité du modèle va être illustrée par des graphes et des organigrammes. Ensuite, le modèle de dynamique est construit à partir de données expérimentales acquises avec des véhicules instrumentés. Le modèle utilisé est aussi validé sur deux types de véhicules légers différents. [17]

Avec tous les véhicules, la prévision des performances et de la portée est importante. Les ordinateurs permettent nous faire cela assez facilement. Surtout, les méthodes informatiques nous permettent de rapidement étudier des aspects du véhicule, tels que la puissance du moteur, le type et la taille de la batterie, le poids et ainsi de suite et voyez comment les modifications pourraient affecter les performances et la portée. De plus, nous montrerons comment cela peut être fait sans utiliser aucune connaissance particulière des techniques de programmation, programmes mathématiques et tableurs classiques tels que MATLAB une excellente base pour ces simulations. Nous verrons également qu'il existe certaines caractéristiques de véhicules électriques qui rendent la modélisation mathématique de la performance plus facile que pour autres véhicules.

## II.2. Configurations des véhicules électriques :

Auparavant, l'VE était principalement converti de l'ICVE, remplaçant simplement un moteur à combustion par le moteur électrique tout en conservant tous les autres composants.

Ce véhicule électrique converti s'est estompé en raison de son poids lourd, perte de flexibilité et dégradation des performances. À l'heure actuelle, l'VE moderne est construit à dessein.

Ce véhicule électrique spécialement conçu est basé sur le corps et le cadre d'origine conceptions propres à satisfaire les exigences structurelles propres aux véhicules électriques et à utiliser les plus grandes flexibilités de la propulsion électrique.

La figure II.1. Illustre la configuration générale du véhicule électrique, composé de trois sous-systèmes - propulsion électrique, source d'énergie et auxiliaire. La propulsion électrique Le sous-système comprend le contrôleur électronique, le convertisseur de puissance, les moteurs, transmission mécanique

et roues motrices. Le sous-système source d'énergie concerne la source d'énergie, l'unité de gestion de l'énergie et l'unité de ravitaillement en énergie.

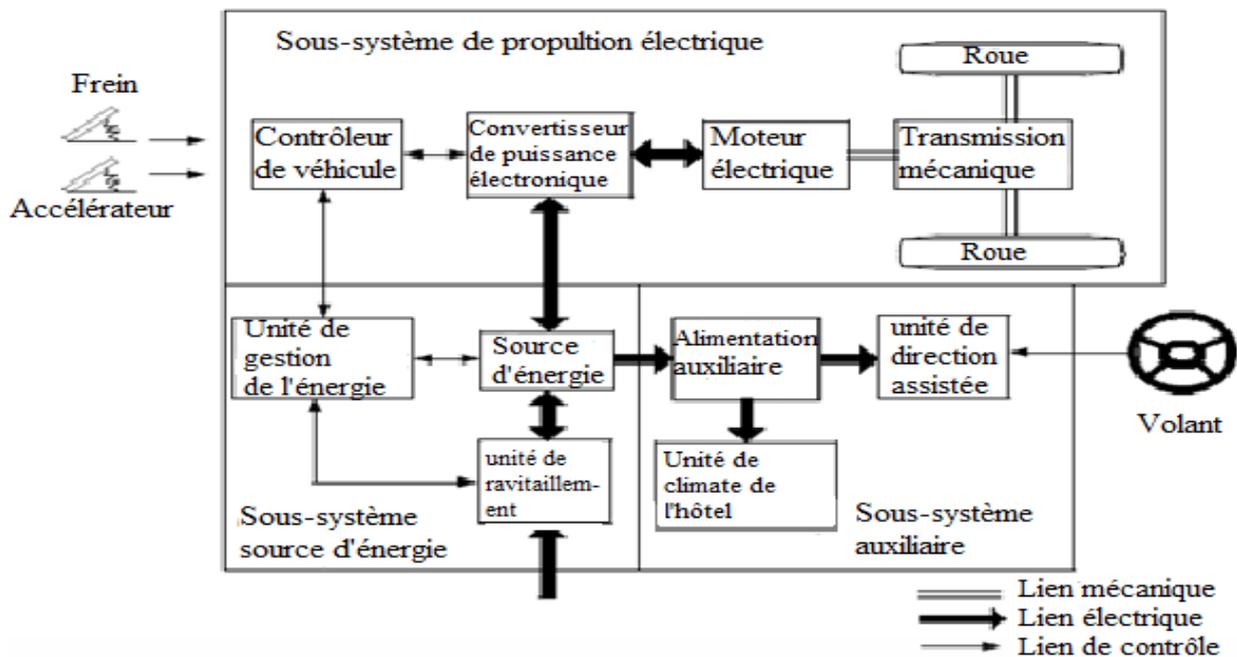
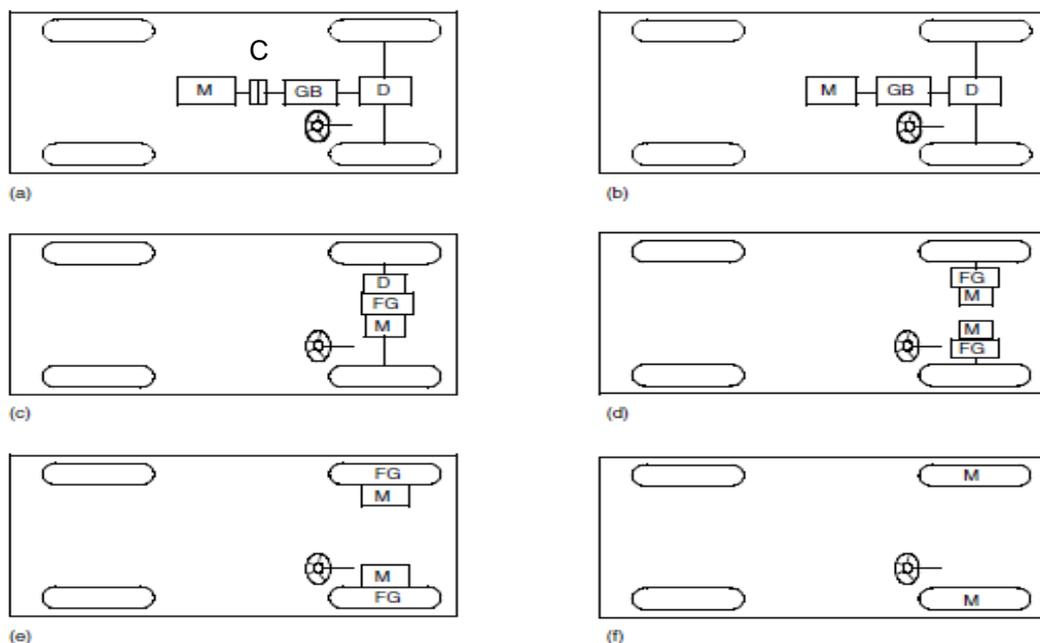


Figure II.1. Illustration conceptuelle de la configuration générale de l'VE

Le sous-système auxiliaire comprend la direction assistée, le contrôle de la température unité et alimentation auxiliaire. Sur la figure, un lien mécanique est représenté par une ligne double, une liaison électrique par une ligne épaisse et une liaison de contrôle par une ligne mince. La flèche sur chaque ligne indique la direction du flux d'énergie électrique ou du contrôle communication d'information. Basé sur les entrées de commande du frein et pédales d'accélérateur, le contrôleur électronique fournit les signaux de commande appropriés allumer ou éteindre les dispositifs d'alimentation du convertisseur d'alimentation qui fonctionne à réguler le flux de puissance entre le moteur électrique et la source d'énergie. L'arrière le flux de puissance est dû au freinage par récupération du VE et à cette énergie de récupération peuvent être stockés à condition que la source d'énergie soit réceptive. Notez que le plus disponible Batteries VE (sauf certaines batteries métal / air) ainsi que condensateurs et volants accepter facilement l'énergie régénératrice. L'unité de gestion de l'énergie coopère avec le contrôleur électronique pour contrôler le freinage par récupération et sa récupération d'énergie. Il travaille également avec l'unité de ravitaillement en énergie pour contrôler le ravitaillement et surveiller la facilité d'utilisation de la source d'énergie. L'alimentation auxiliaire fournit la nécessaire puissance avec différents niveaux de tension pour tous les auxiliaires VE, en particulier la température unités de commande et de direction assistée. Outre le frein et l'accélérateur, le volant est une autre entrée de contrôle clé de l'VE. Basé sur son angle l'unité de direction assistée peut déterminer la force de virage du véhicule.

(1) La figure II.2. Montre la première variante qui est une extension directe de l'ICVE existante adoptant une traction avant longitudinale avec moteur avant. Il consiste d'un moteur électrique, d'un embrayage, d'une boîte de vitesses et d'un différentiel. L'embrayage est un dispositif mécanique qui est utilisé pour connecter ou déconnecter le flux de puissance du moteur électrique aux roues. La boîte de vitesses est un autre dispositif mécanique qui se compose d'un ensemble d'engrenages avec différents rapports d'engrenage. En incorporant les deux embrayages et boîte de vitesses, le conducteur peut changer les rapports de vitesse et donc le couple allé aux roues. Les roues ont un couple élevé à basse vitesse dans les rapports inférieurs et faible couple à haute vitesse dans les vitesses supérieures. Le différentiel est un dispositif mécanique qui permet d'entraîner les roues à des vitesses différentes, dans les virages la roue extérieure couvre une plus grande distance que la roue intérieure.



C: Embrayage  
 D: Différentiel  
 FG: engrenage fixe  
 GB: Boîte de vitesses  
 M: Moteur électrique

Figure II.2. Configuration VE due aux variations de la propulsion électrique

(2) En remplaçant la boîte de vitesses par un engrenage fixe et donc en retirant l'embrayage, le poids et la taille de la transmission mécanique peuvent être grandement réduits. La figure 2 (b) montre cette disposition qui consiste en un moteur, engrenage fixe et un différentiel. Notez que cette configuration VE est ne convient pas à l'ICVE comme moteur par lui-même, sans l'embrayage et boîte de vitesses, ne peut offrir les caractéristiques couple-vitesse souhaitées.

(3) Similaire au concept de traction avant à moteur transversal du moteur ICVE existant, le moteur électrique, la transmission fixe et le différentiel sont intégrés en un seul ensemble, tandis que les deux

essieux sont dirigés vers les deux roues motrices. Figure 2 (c) montrent cette configuration qui est en fait le plus couramment adoptée par VE modernes.

(4) Outre les moyens mécaniques, l'action différentielle d'un véhicule électrique dans les virages peut être fournie électroniquement par deux moteurs électriques fonctionnant à différentes vitesses. La figure 2 (d) montre cette configuration à deux moteurs dans laquelle deux Les moteurs entraînent séparément les roues motrices via un engrenage fixe.

(5) Afin de raccourcir d'avantage le chemin de transmission mécanique de l'électrique moteur à la roue motrice, le moteur électrique peut être placé à l'intérieur d'une roue. Cet arrangement est ce qu'on appelle la traction intégrale. La figure 2 (e) montre cette configuration dans laquelle un engrenage planétaire fixe est utilisé pour réduire la vitesse du moteur à la vitesse de roue désirée. Il convient de noter que planétaire Les engrenages offrent les avantages d'un rapport de réduction de vitesse élevé ainsi que d'une disposition des arbres d'entrée et de sortie.

(6) En abandonnant complètement tout engrenage mécanique, la transmission intégrale peut être réalisé en installant un moteur électrique à rotor extérieur à basse vitesse à l'intérieur d'une roue. La figure 2 (f) montre cet arrangement sans engrenage dans lequel le rotor extérieur est directement monté sur la jante. Ainsi, le contrôle de la vitesse du moteur électrique équivaut au contrôle de la vitesse de la roue et donc de la vitesse du véhicule. [18]

### II.3. Performances des véhicules électriques :

Les performances de conduite d'un véhicule sont généralement évaluées par son temps d'accélération, vitesse maximale et aptitude au déplacement. Dans la conception du groupe motopropulseur des véhicules électriques, un moteur approprié Les paramètres de puissance et de transmission sont les principales considérations à prendre en compte. Répondre aux spécifications de performance. La conception de tous ces paramètres dépend principalement des caractéristiques vitesse-puissance (couple) de la traction motrice et sera discuté dans ce chapitre. [19]

### II.4. Modèle dynamique :

La première étape de la modélisation des performances du véhicule consiste à rédiger un modèle de force électrique. C'est la force transmise au sol par les roues motrices et propulsant le véhicule vers l'avant. Cette force doit surmonter la charge de la route et accélérer le véhicule.

Pour tout profil de mission, un véhicule routier électrique est soumis à des forces que le système de propulsion doit surmonter pour pouvoir propulser ou retarder le véhicule. Ces forces sont comme le montre la figure II.3. [20]

La force qui propulse le véhicule vers l'avant, l'effort de traction, doit accomplir le suivant :

- surmonter la résistance au roulement

- surmonter la traînée aérodynamique
- fournir la force nécessaire pour surmonter la composante du poids du véhicule en agissant

En bas de la pente

- accélérer le véhicule si la vitesse n'est pas constante.

Nous examinerons chacune d'elles à tour de rôle. [21]

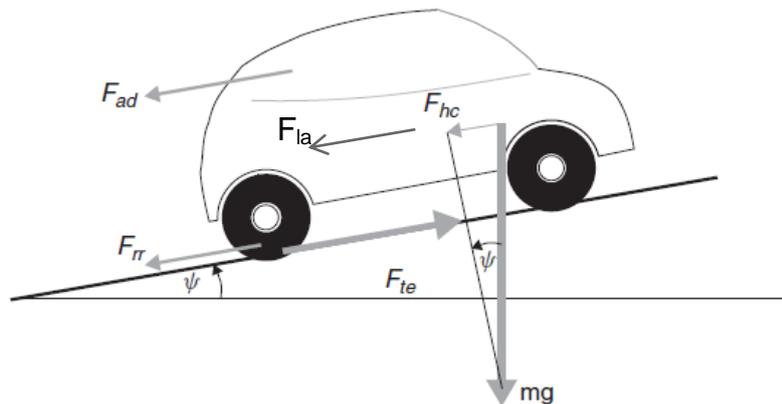


Figure II.3. Schéma illustrant les différentes forces longitudinales agissant sur un Véhicule en mouvement sur une route inclinée

### II.4.1. La force de résistance au roulement :

La force de résistance au roulement est la résistance du véhicule, due au contact des roues avec la chaussée. Elle peut varier en fonction de plusieurs paramètres : la vitesse du véhicule, la pression des roues, l'état et le type de la chaussée (sèche, humide, sablée, etc.) Dans le cas simplifié du modèle, La force de résistance au roulement s'écrit comme suit dans l'équation (II.1) :

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg \dots\dots\dots(II.1)$$

Avec :

$\mu_{rr}$  : Le coefficient de résistance au roulement.

$g$  : l'accélération de la gravité exprimée en  $(m/s^2)$ .

$m$  : la masse totale du véhicule exprimée en  $(kg)$ .

La valeur de  $\mu_{rr}$  peut être facilement trouvée en tirant un véhicule à une vitesse constant faible vitesse et mesure de la force requise.

Les valeurs typiques de  $\mu_{rr}$  sont 0,015 pour un pneu à carcasse radiale, jusqu'à environ 0,005 pour un pneu développé spécialement pour les véhicules électriques. [21]

### II.4.2. La force aérodynamique :

La force aérodynamique est la force exercée par l'air selon l'axe du mouvement sur le véhicule. Elle est proportionnelle à la masse volumique de l'air ( $\rho$ ) exprimée en  $kg/m^3$ , à la surface frontale du

véhicule (A) exprimée en  $m^2$ , au coefficient de la trainée du véhicule ( $C_d$ ) et au carré de la vitesse du véhicule ( $v$ ) (voir l'équation (II.2)). La masse volumique dépend de la pression et de la température atmosphérique. [22]

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \dots\dots\dots(II.2)$$

La densité de l'air varie bien sûr avec la température, l'altitude et l'humidité. Toutefois une valeur de  $1,25 \text{ kg.m}^{-3}$  Est une valeur raisonnable à utiliser dans la plupart des cas. À condition que les unités SI sont utilisés ( $m^2$  pour A,  $m \text{ s}^{-1}$  pour  $v$ ) alors la valeur de  $F_{ad}$  sera donnée en newtons.

**II.4.3. La force d'escalade :**

La force nécessaire pour conduire le véhicule sur une pente est la plus simple à trouver. Il est simplement la composante du poids du véhicule qui agit le long de la pente. Par simple résolution des forces nous voyons que :

$$F_{hc} = mg \cdot \sin(\psi) \dots\dots\dots(II.3)$$

Pour simplifier les calculs,  $\sin(\psi) = p$  est souvent remplacé par la pente « p », pour de faibles valeurs [23]

$$F_{hc} = mg \cdot p \quad \text{pour } \leq 20\% \dots\dots\dots(II.4)$$

La pente en % est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance horizontale de 100 mètres. La pente p (%) est donnée par la relation suivante :

$$P(\%) = \frac{y(m)}{100(m)} \cdot 100(\%) \dots\dots\dots(II.5)$$

Avec y est l'élévation verticale.

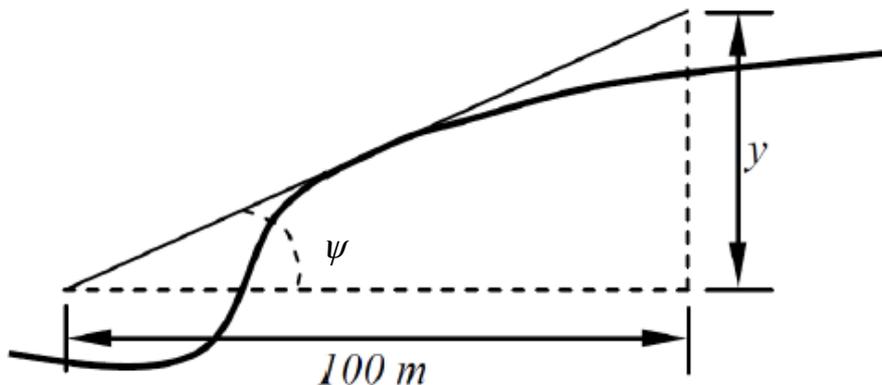


Figure II.4. Pente sur la roue.

### II.4.4. Force d'accélération :

Si la vitesse du véhicule change, il est clair qu'une force doit être exercée. Appliquée en plus des forces ci-dessus. Cette force fournira le linéaire l'accélération du véhicule, et est donnée par : [24]

$$F_{la} = M \cdot \frac{dv}{dt} = M \cdot a \dots\dots\dots (II.6)$$

$a$  : accélération du véhicule.

En se référant à la figure 5, il est clair que le couple d'essieu =  $F_{te}r$ , où  $r$  est le rayon du pneu, et  $F_{te}$  est l'effort de traction fourni par le groupe motopropulseur. Si  $G$  est le rapport de transmission de système reliant le moteur à l'essieu, et  $T$  est le couple moteur, alors nous pouvons dire que :

$$T = \frac{F_{te}r}{G} \quad \text{Et} \quad F_{te} = \frac{G}{r} T \dots\dots\dots (II.7)$$

Nous utiliserons à nouveau cette équation lorsque nous développerons les équations finales pour la performance du véhicule.

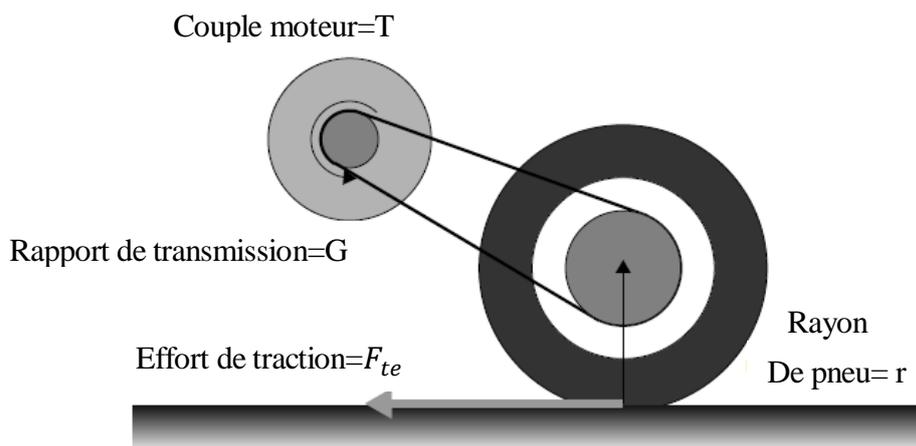


Figure II.5. Un arrangement simple pour connecter un moteur à une roue motrice

Notons également que :

$$\text{vitesse angulaire de l'essieu} = \frac{v}{r} \text{ rad. s}^{-1}$$

Donc, la vitesse angulaire du moteur

$$\omega = G \frac{v}{r} \text{ rad. s}^{-1} \dots\dots\dots (II.8)$$

De même, l'accélération angulaire du moteur

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \text{ rad. s}^{-1}$$

Le couple requis pour cette accélération angulaire est :

$$T = IG \frac{a}{r}$$

Où  $I$  est le moment d'inertie du rotor du moteur. La force aux roues nécessaire pour fournir l'accélération angulaire ( $F_{\omega a}$ ) est trouvé en combinant cette équation Avec l'équation (II.7), donnant :

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} I G \frac{a}{r}$$

Ou 
$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \dots\dots\dots (II.9)$$

Nous devons noter que, dans ces équations simples, nous avons supposé que le système d'engrenage est 100% efficace, il ne cause aucune perte. Comme le système sera généralement très simple, l'efficacité est souvent très élevée. Cependant, il ne sera jamais à 100%, et nous devons donc affiner l'équation en incorporant l'efficacité du système d'engrenage  $\eta_g$ . La force requise sera légèrement plus grand, l'équation (II.9) peut donc être affinée pour :

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \dots\dots\dots (II.10)$$

Les valeurs typiques pour les constantes ici sont 40 pour  $G/r$  et  $0.025 \text{ kg.m}^2$  Pour le moment d'inertie. Ce sont pour un moteur de 30 kW, conduisant une voiture qui atteint 60 km / h avec un moteur vitesse de 7000 tours/ min. Une telle voiture pèserait probablement environ 800 kg. Le terme  $IG^2/r^2$  dans l'équation (II.10) aura dans ce cas une valeur d'environ 40 kg. En d'autres termes, l'angulaire la force d'accélération donnée par l'équation (II.10) sera généralement beaucoup plus petite que la linéaire force d'accélération donnée par l'équation (II.6). Dans ce cas spécifique (mais assez typique),

Il sera plus petit du ratio :

$$\frac{40}{800} = 0.05 = 5\%$$

Il arrivera souvent que le moment d'inertie du moteur ne me soit pas connu. Dans de tels cas, une approximation raisonnable consiste simplement à augmenter la masse de 5% l'équation (4.6), et d'ignorer le terme  $F_{\omega a}$ . [25]

### II.4.5. Effort de traction total :

L'effort de traction total est la somme de toutes ces forces :

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \dots\dots\dots (II.11)$$

$F_{rr}$ : est la force de résistance au roulement donnée par l'équation (II.1)

$F_{ad}$ : est la force aérodynamique, donnée par l'équation (II.2)

$F_{hc}$ : est la force d'escalade, donnée par l'équation (II.3)

$F_{la}$ : est la force nécessaire pour donner une accélération linéaire donnée par l'équation (II.6)

$F_{\omega a}$  : La force nécessaire pour donner une accélération angulaire au moteur en rotation, donnée par l'équation (II.10)

Notons que  $F_{ta}$  et  $F_{\omega a}$  seront négatifs si le véhicule ralentit, et que  $F_{hc}$  sera négatif si ça descend.

[25]

## II.5. Modélisation de l'accélération des véhicules électriques :

### II.5.1. Paramètres de performance d'accélération :

L'accélération d'un véhicule électrique est un indicateur de performance essentiel, même si aucune mesure standard n'est utilisée. En règle générale, le temps nécessaire pour passer de l'arrêt

Au démarrage sera donné. Les normes les plus proches pour les véhicules électriques sont les 0 à 30 km / h, bien que ces durées ne soient pas données pour tous les véhicules. Ces chiffres d'accélération proviennent de la simulation de véhicules électriques réels. Les simulations de performance des véhicules électriques sont effectuées au couple maximal.

Le couple maximal d'un moteur électrique est une fonction assez simple de la vitesse angulaire. Dans la plupart des cas, à faible vitesse, le couple maximal est constant, jusqu'à ce que la vitesse du moteur atteigne une valeur critique  $\omega_c$  après laquelle le couple diminue, mais la puissance reste constante. Dans le même temps, la vitesse angulaire du moteur dépend du rapport de transmission  $G$  et du rayon de la roue motrice  $r$ , de sorte que:

$$v < \frac{r}{G} \omega_c \text{ puis } T = T_{max} \dots\dots\dots(II.12)$$

Après la phase de démarrage est passée, soit le couple est constante, et nous avons le couple est : [26]

$$T = T_{max} \frac{r \cdot \omega_c}{Gv} \dots\dots\dots (II.13)$$

Ou le couple tombe selon l'équation suivante :

$$T = T_0 - K\omega$$

Qui, lorsque l'équation (II.8) est substituée à la vitesse angulaire, donne :

$$T = T_0 - \frac{KG}{r} v \dots\dots\dots(II.14)$$

Cependant, il s'agit du couple de pointe, lorsque la bobine est entièrement dans le flux, ce qui est parfaitement conforme radial. En pratique, cela ne sera pas toujours le cas. En outre, il ne prend pas en compte les faits qu'il peut y avoir plus d'une paire de pôles magnétiques. Alors on utilise une constante  $K_m$ , appelée constante du moteur, pour connecter le couple moyen au courant et le flux magnétique. La valeur de  $K_m$  dépend clairement du nombre de tours dans chaque bobine, mais aussi sur le nombre de paires de pôles, et d'autres aspects de la conception du moteur.

Nous avons donc :

$$T_0 = K_m \Phi i \dots\dots\dots(II.15)$$

Tel que Le courant d'induit ( *i* ) est donc :

$$i = \frac{E_s}{R_a}$$

Cette équation montre que le courant diminue avec l'augmentation de la vitesse angulaire. Nous pouvons substituer dans l'équation (II.15) pour obtenir l'équation reliant le couple et la vitesse de rotation.

$$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a} \omega \dots\dots\dots(II.16)$$

Maintenant que nous avons les équations dont nous avons besoin, nous pouvons les combiner afin de trouver l'accélération d'un véhicule. Pour un véhicule sur un terrain plat, avec une densité de l'air de  $1,25Kg m^{-3}$ , l'équation (II.11) devient

$$F_{te} = \mu_{rr} mg + 0.625AC_d v^2 + ma + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a$$

En substituant l'équation (II.7) pour  $F_{te}$  et en notant que  $a = dv/dt$ , nous avons

$$\frac{G}{r} T = \mu_{rr} mg + 0.625AC_d v^2 + mg \left( m + \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots(II.17)$$

Par exemple, dans la phase d'accélération initiale, lorsque  $T = T_{max}$ , devient l'équation (II.14)

Ou le couple tombe selon l'équation linéaire suivante :

$$\frac{G}{r} T_{max} = \mu_{rr} mg + \frac{1}{2} \rho AC_d v^2 + mg \left( m + \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (II.18)$$

Nous pouvons combiner les équations (II.11), (II.13), (II.14) afin de trouver l'accélération

D'un véhicule électrique est :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\eta_g r^2}{\eta_g r^2 m + IG^2} \left( \frac{GT_{max}}{r} - \mu_{rr} mg - \frac{1}{2} \rho AC_d v^2 \right)$$

Si toutes les constantes sont connues ou peuvent raisonnablement être estimées, il s'agit d'un très équation différentielle de premier ordre simple, dont la solution peut être trouvée en utilisant calculatrices modernes, ainsi qu'un large éventail de programmes informatiques personnels. C'est également possible pour la situation avec les plus gros moteurs. J'espère que deux exemples feront c'est clair.

## II.6. Moteur à courant continu :

Les entraînements à moteur à courant continu étaient largement utilisés pour la propulsion des véhicules électriques. Divers entraînements à moteur à courant continu ont été appliqués à différents véhicules électriques en raison de leurs avantages tels que la maturité technologique et la simplicité de contrôle. Cependant, ils souffrent généralement de problèmes tels qu'une efficacité moindre et une

densité de puissance inférieure à celle leurs homologues de courant alternatif, et la nécessité d'un entretien régulier de leurs balais de charbon et de leur commutateur. Par conséquent, outre ce petit véhicule électrique ou tout-terrain, ils sont remplacés par un moteur à courant alternatif ou sans balai entraîne pour la propulsion du véhicule électrique. [27]

### **II.6.1. Principes fondamentaux du moteur à courant continu :**

Les moteurs à courant continu brossé et sans balai ont différentes structures internes et différentes méthodes de contrôle, mais ils ont quatre caractéristiques communes :

- Le couple est approximativement proportionnel au courant.
- La vitesse est approximativement proportionnelle à la tension.
- Les circuits de commande utilisent des commutateurs électriques pour alimenter le moteur.
- Un contrôleur peut contrôler le fonctionnement du moteur à l'aide de signaux PWM (Pulsed Width Modulation).

Cette section traite de chacun de ces sujets. Les sections suivantes traitent des deux types de moteurs séparément. [28]

### **II.6.2. Description d'un moteur à courant continu :**

Un moteur à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, d'où l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.

Un moteur électrique à courant continu est constitué :

- D'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents à l'arrière du stator, se trouve la partie porte balais et les balais assurant les contacts électriques avec le rotor. Il est aussi appelé inducteur.
- D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément induit. [29]

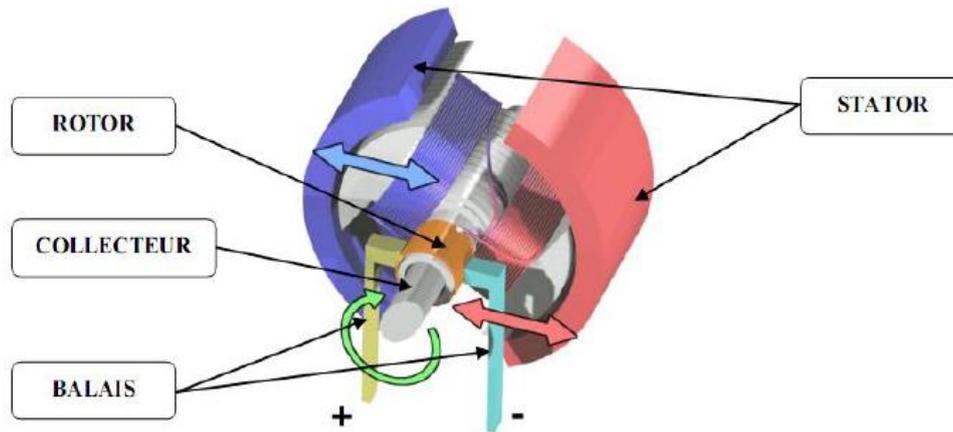


Figure II.6. Schéma d'un moteur à courant continu

### II.6.3. Moteur à excitation séparée :

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes. L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par la suivante [30] :

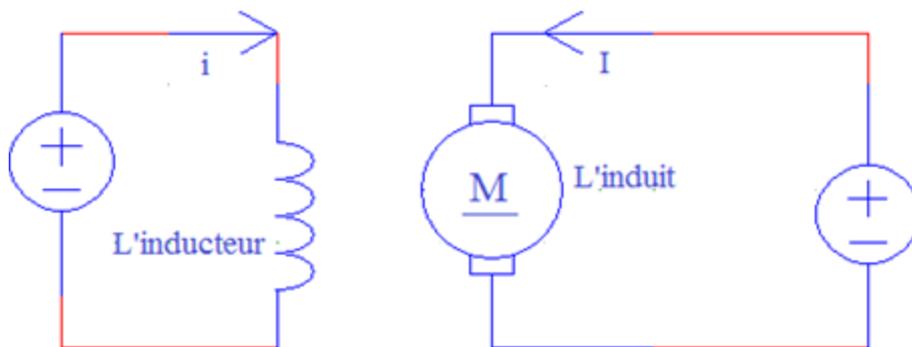


Figure II.7. Moteur à excitation séparée (indépendante)

Domaine d'application :

Particularités	Emplois
Moteur autorégulateur de vitesse. La vitesse Est relativement constante quel que soit la Charge	Entrainement de machines-outils (Remplacé par le moteur asynchrone triphasé)

Tableau II.1. Domaine d'application pour un moteur à excitation séparée

### II.6.4. Force électromagnétique :

La force électromagnétique est la force mécanique  $F$  à laquelle est soumis un conducteur parcouru par un courant électrique d'intensité  $i$  placé dans un champ magnétique d'intensité  $B$ .

Un fil électrique conducteur de longueur  $L$  parcouru par un courant électrique d'intensité  $i$  placé dans un champ magnétique d'intensité  $B$  est soumis à une force électromagnétique  $F$  telle que :

$$F = B \cdot i \cdot L$$

Flux par pôle lorsque le champ est excité par des PM. Sur la base du circuit équivalent du séparément MCC excitée, le fonctionnement de la machine à courant continu :

$$E_b = K_m \Phi \omega \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

$$E_s = E_b + R_a i \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

$$T = K_m \Phi i \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

Où  $E_b$  est la force électromotrice arrière (FEM),  $K_m$  est la constante FEM arrière, le flux de l'entrefer par pôle,  $\omega$  est la vitesse angulaire,  $E_s$  est la tension d'induit,  $R_a$  est la résistance du circuit d'induit,  $i$  est le courant d'induit,  $T$  est le couple développé. Pour ces machines à courant continu à bobines, le flux est généralement proportionnel au courant de champ qui peut être contrôlé indépendamment par la tension à vide, en fonction de la tension d'induit, en fonction de courant d'induit, ou dépendant à la fois de la tension d'induit et du courant d'induit, respectivement, pour les types séparément excités, shunt, série ou composés. En revanche, le flux est essentiellement incontrôlable pour la machine PM DC. [31]

Sans contrôle externe, on peut facilement déduire les caractéristiques couple-vitesse des machines à courant continu.

Pour la machine à courant continu excitée séparément, l'armature et le champ les tensions sont maintenues à la valeur nominale. C'est en fait l'équivalent de la machine shunt DC et de la machine PM DC au flux évalué. En utilisant des équations. (II.19) - (II.21), la caractéristique couple-vitesse correspondante peut être déduite

$$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a} \omega \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Ce qui indique que la vitesse est inversement proportionnelle au couple. Cette caractéristique est particulièrement adaptée pour les applications nécessitant un couple de démarrage élevé et une surcharge importante. Cependant, il souffre du problème de survitesse lorsque vous travaillez à la tension nominale sous charge nulle ou légère. En cas de cumul machine à courant continu composé, la caractéristique couple-vitesse se situe entre celles du shunt et de la série DC machines, en fonction de la force relative du shunt et des champs en série. Le non-chargement correspondant Le comportement dépend

principalement du champ de dérivation, tandis que le comportement en chute libre est dicté par le champ en série.

Cette caractéristique est attrayante pour les applications nécessitant un couple de démarrage élevé et, en même temps, la vitesse à vide peut être limitée à une valeur sûre. Pour la machine à courant continu à composés différentiel, le champ série réduit l'entrefer lorsque le couple augmente, entraînant une augmentation de la vitesse telle qu'utilisée pour compenser la chute de vitesse due à la résistance d'induit. Cependant, en cas de surcharge, cet effet provoque la vitesse à l'instabilité. Ainsi, cette machine est rarement appliquée aux entraînements motorisés. [31]

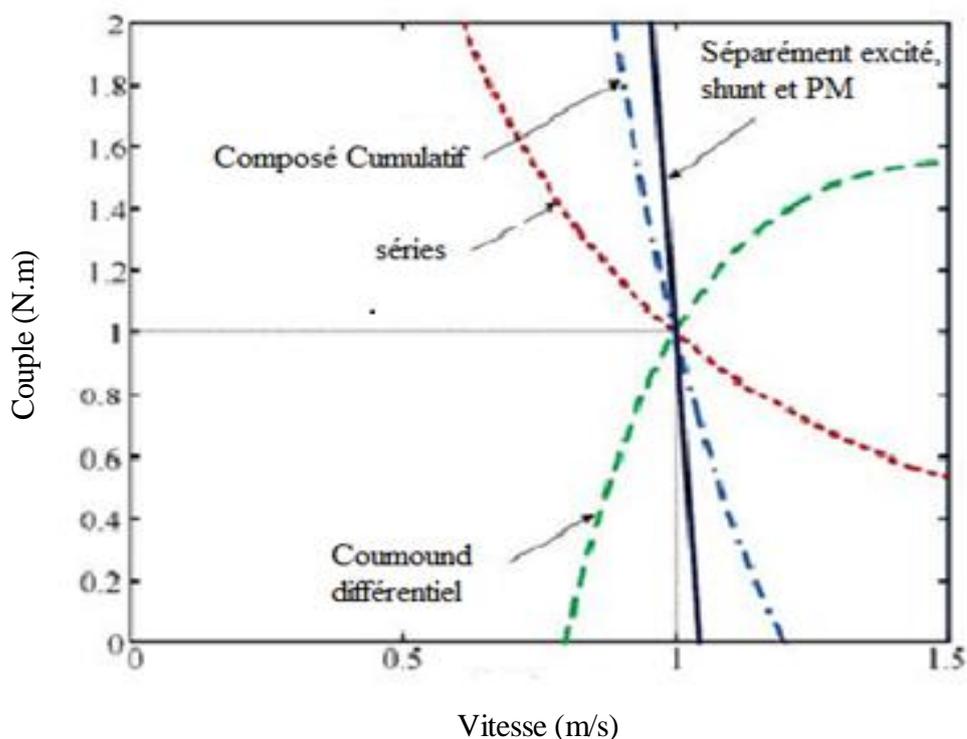


Figure II.8. Caractéristiques couple-vitesse des machines à courant continu

### II.6.5. Contrôle du moteur à courant continu :

La figure II.9 nous montrent que Pour les véhicules conventionnels, la caractéristique de performance idéale d'une centrale électrique est une puissance de sortie immuable sur toute la plage de fonctionnement. À basse vitesse, le couple moteur est obligé de maintenir une valeur constante afin de ne pas dépasser la limite d'adhérence entre la zone de contact pneu-sol.[32]

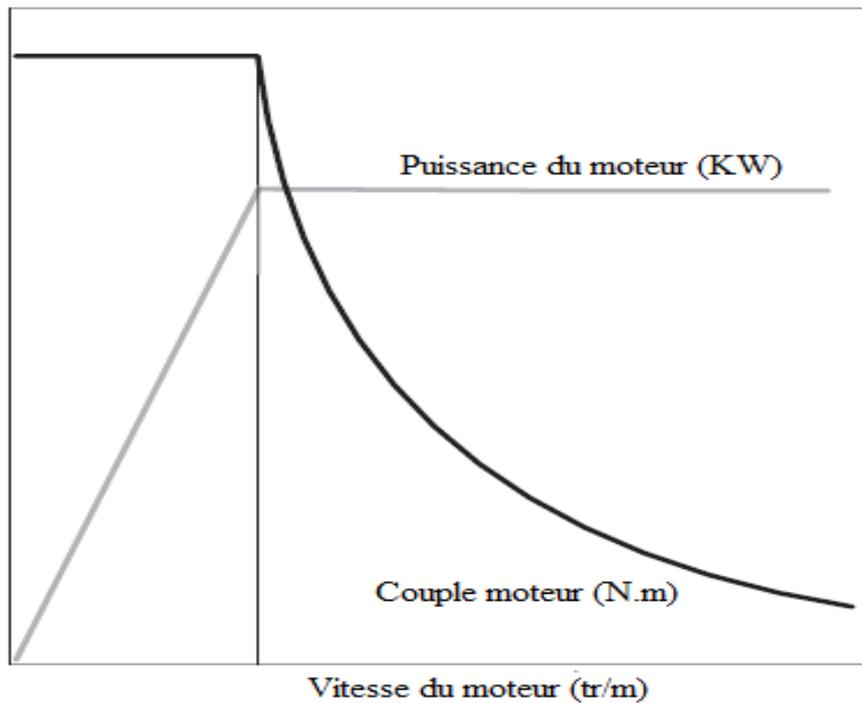


Figure II.9. Caractéristiques de performances idéales pour les centrales de véhicules.

Après le couple varie avec la vitesse, comme indiqué à la figure II.9. Les caractéristiques de puissance constante fournissent aux véhicules classiques un effort de traction élevé à basse vitesse, ce qui améliore les capacités d'accélération, de montée en pente et de remorquage. Le moteur à combustion interne est la centrale électrique standard des véhicules classiques depuis plus d'un siècle en raison de son rapport poids / puissance relativement élevé et de son coût peu élevé, mais ce n'est pas sans inconvénients. En règle générale, un moteur à combustion interne présente des caractéristiques couple-vitesse qui ne sont pas directement corrélées aux performances idéales requises par la traction. [32]

Comparativement à un profil couple-vitesse idéal, comme illustré à la figure II.9, les moteurs à combustion interne classiques ont un profil relativement plat. C'est pourquoi une transmission à plusieurs rapports est généralement utilisée pour le modifier. Lorsqu'un moteur à combustion interne suit ses courbes typiques de couple et de puissance, des caractéristiques représentatives sont développées dans chaque plage de vitesses permettant de prédire les performances du véhicule. Le moteur commence à fonctionner sans à-coups au ralenti et lorsque le régime du moteur se rapproche d'une plage intermédiaire, la qualité de la combustion et le couple moteur sont atteints. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, les pertes croissantes dans le collecteur d'admission d'air et la diminution constante du couple du moteur entraînent une diminution de la pression efficace moyenne. La puissance délivrée continue d'augmenter au

maximum à un régime moteur élevé spécifique. Au-delà de ce pic de puissance, le couple moteur diminue plus rapidement lorsque le régime moteur augmente, ce qui entraîne une diminution de la puissance du moteur.

La figure II.10 et l'équation (II.22) nous montrent que le moteur à courant continu à balais peut être très facilement contrôlé. Si la tension d'alimentation  $E_s$  est réduite, le couple maximal diminue proportionnellement, et la pente du graphique couple / vitesse est inchangée. En d'autres termes, tout couple et la vitesse peut être atteinte en dessous des valeurs maximales. Nous verrons que la tension d'alimentation peut être contrôlée simplement et efficacement, c'est donc un bon moyen de contrôler ce type de moteur.

Cependant, réduire la tension d'alimentation n'est pas le seul moyen de contrôler ce type de moteur. Dans certains cas, nous pouvons également obtenir un contrôle en modifiant le flux magnétique  $\Phi$ . Cela est possible si des bobines plutôt que des aimants permanents fournissent le champ magnétique. Si le flux magnétique est réduit, puis le couple maximal diminue, mais la pente couple / vitesse le graphique devient plus plat. La figure II.10 en est une illustration. Ainsi, le moteur peut être fait pour fonctionner

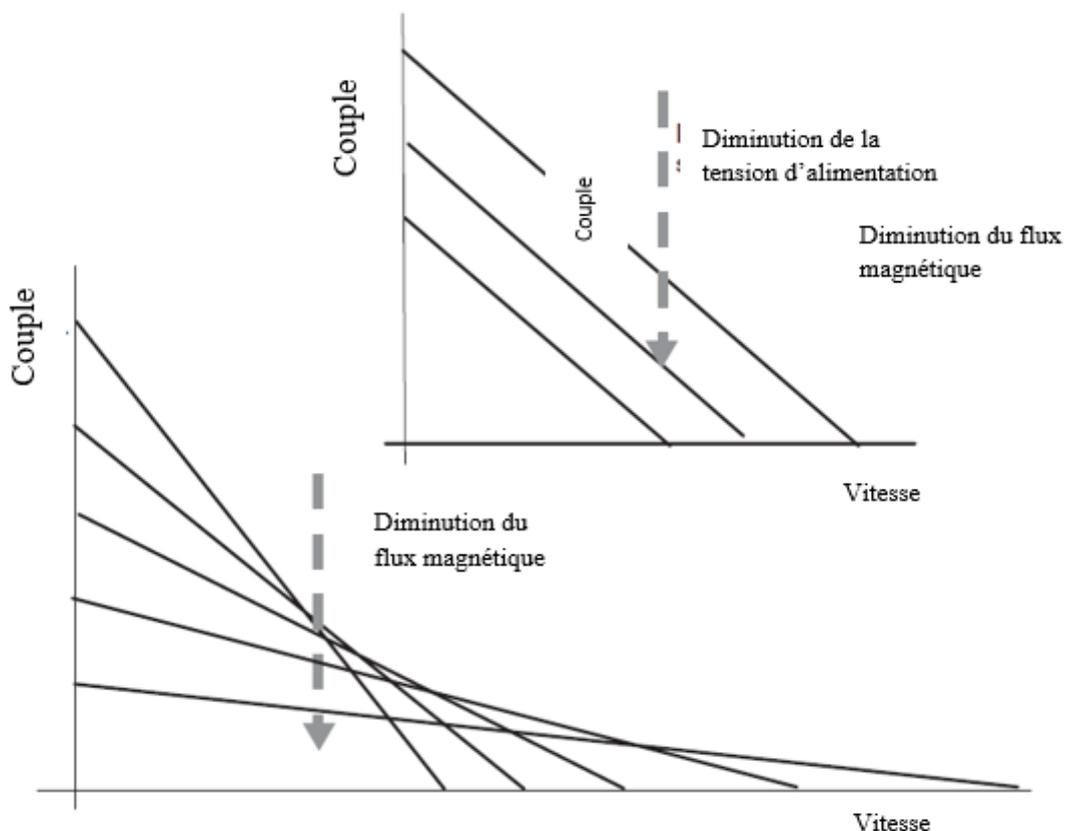


Figure II.10. Caractéristique de la pente Couple / vitesse pour un moteur continu

À une large gamme de couple et de vitesse. Cette méthode est parfois meilleure que de simplement utiliser contrôle de la tension, en particulier lors du fonctionnement à haute vitesse / faible couple, ce qui est assez commun dans véhicules électriques en croisière près de leur vitesse maximale et qui sont associées à des vitesses élevées et des champs magnétiques puissants, peuvent être considérablement réduits.

Ainsi, le moteur à courant continu à balais est très flexible quant à la méthode de contrôle, surtout si le flux magnétique  $\Phi$  peut être varié.

### II.6.6. Avantages et inconvénients :

Le moteur à courant continu est la technologie la plus ancienne utilisée dans le domaine automobile. Elle est classique et peu chère (en tenant compte de l'électronique) car elle bénéficie d'une production importante. Mais ses performances sont limitées.

#### ❖ **Avantage :**

- Il bénéficie d'une grande maturité industrielle
- Sa commande est très simple, tout comme son alimentation
- Son coût est faible par rapport aux autres machines électriques en vitesse variable, du fait de sa production et de la simplicité de son électronique.

#### ❖ **Inconvénient :**

- Les balais nécessitent un entretien régulier (maintenance) ;
- Elle a une inertie importante et est limitée en vitesse maximale, du fait du frottement des balais et du rotor bobiné.
- Elle est limitée en couple (commutation des courants par le collecteur et pertes Joule au rotor)
- Elle peut être dangereuse en milieu explosif, à cause des arcs électriques entre les balais et les lames du collecteur (à proximité d'une batterie Li-Ion par exemple, ou un réservoir d'hydrogène).
- les accélérations réalisables ( $\approx 2500$  tr/min) ne sont pas assez élevées dans certains cas. [33]

## II.7. Modélisation de la batterie

### II.7.1. Le but de la modélisation de batterie

La modélisation (ou la simulation) de systèmes d'ingénierie est toujours importante et utile. C'est fait pour différentes raisons. Parfois, des modèles sont construits pour comprendre l'effet de changer la façon dont quelque chose est fabriqué. Par exemple, nous pourrions construire un modèle de batterie qui nous permettrait de prédire l'effet de la modification de l'épaisseur de la couche d'oxyde de plomb des électrodes négatives d'une batterie plomb-acide scellée. De tels modèles font

largement appel à la physique et à la chimie fondamentales, et la puissance des ordinateurs modernes permettent de réaliser ces modèles avec un très bon pouvoir de prédiction.

D'autres types de modèles sont construits pour prédire avec précision le comportement d'une marque et d'un modèle de batterie particuliers dans différentes circonstances. Ce modèle sera ensuite utilisé pour prédire les performances d'un véhicule équipé de ce type de batterie. Ce type de modèle repose davantage sur une analyse minutieuse des données de performances réelles que sur la physique et la chimie fondamentales. [34]

Dans cette partie, nous ne nous intéresserons qu'à ce dernier type de modélisation de la performance. Cependant, toute modélisation de batteries est notoirement difficile et peu fiable. Les performances d'une batterie dépendent de quantités raisonnablement faciles à mesurer telles que sa température et de caractéristiques de performances telles que la tension. Cependant, cela dépend également de paramètres beaucoup plus difficiles à spécifier avec précision, tels que l'âge et la manière dont la batterie a été utilisée (ou mal utilisée) dans le passé. Les tolérances de fabrication et les variations entre les différentes cellules d'une batterie peuvent également avoir un impact important sur les performances.

Le résultat de ces problèmes est que tout ce que nous pouvons faire ici est de donner une introduction à la tâche de simulation et de modélisation de batterie.

## II.7.2. Circuit équivalent de batterie

La première tâche à effectuer pour simuler les performances d'une batterie consiste à construire un "circuit équivalent". C'est un circuit composé d'éléments, et chaque élément a un comportement prévisible avec précision.

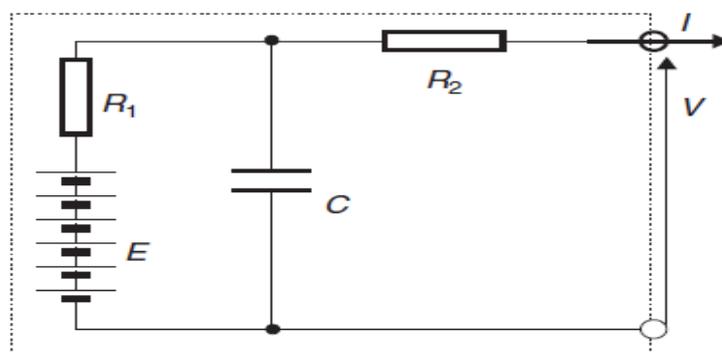


Figure II.11. Exemple d'un modèle de circuit équivalent plus raffiné d'une batterie. Ceci modélise une partie du comportement dynamique d'une batterie

Nous avons présenté un tel circuit équivalent. La figure II.11 montre un circuit équivalent un peu plus raffiné qui simule ou modélise assez bien ces effets dynamiques. Nous pourrions continuer à affiner notre circuit pour donner une prédiction de plus en plus précise des performances. Ces questions sont abordées dans la littérature, par exemple par Johnson, Zolot et Pesaran (2001). [34]

Bien que le circuit équivalent de la figure II.11 soit simple, nous devons comprendre que les valeurs des paramètres du circuit ( $E$  et  $R$ ) ne sont pas constantes. La tension à vide de la batterie  $E$  est la plus importante à établir en premier. Cela change avec l'état de charge de la batterie.

Si nous proposons une variable de batterie DoD, c'est-à-dire la profondeur de décharge d'une batterie, qui est 0 lorsqu'elle est complètement chargée et 1 lorsqu'elle est vide, alors la formule simple pour la tension à vide est :

$$E = n \times [2.15 - DoD \times (2.15 - 2)] \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

Où  $n$  est le nombre de cellules de la batterie. Cette formule donne des résultats assez bons pour ce type de batterie, bien qu'une première amélioration consiste à inclure un terme pour la température, car cela a un impact important.

Dans le cas des batteries à base de nickel, une telle formule simple ne peut être construite. La courbe tension / état de charge est loin d'être linéaire. Pour trouver des équations polynomiales qui correspondent très bien aux résultats. L'un d'entre eux, issu des résultats expérimentaux d'une batterie de traction NiCad, est

$$E = n \times (-82816 DoD^7 + 23.5749DoD^6 - 30DoD^5 + 23.7053DoD^4 - 12.5877DoD^3 + 4.1315DoD^2 - 0.8658 DoD + 1.37) \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

### II.7.3. Capacité de la batterie de modélisation

La capacité d'une batterie est réduite si le courant est consommé plus rapidement. Le dessin 1A pendant 10 h ne prend pas la même charge d'une batterie que si elle fonctionnait à 10A pendant 1 h.

Ce phénomène est particulièrement important pour les véhicules électriques, dans la mesure où, dans cette application, les courants sont généralement plus élevés, de sorte que la capacité peut être inférieure aux prévisions. Il est important de pouvoir prédire l'effet du courant sur la capacité, à la fois lors de la conception de véhicules et lors de la fabrication d'instruments qui mesurent la charge restante d'une batterie - jauge de carburant. Connaître la profondeur de décharge d'une

batterie, La meilleure façon de procéder consiste à utiliser le modèle Peukert de comportement de la batterie. Bien que peu précis avec des courants faibles, il modélise suffisamment le comportement de la batterie pour des courants plus élevés. Le point de départ de ce modèle est qu'il existe une capacité, appelée capacité de Peukert, qui est constante et donnée par l'équation

$$C_p = i^k T \dots\dots\dots (II.25)$$

Où  $k$  est une constante (généralement environ 1,2 pour une batterie au plomb) appelée coefficient de Peukert. Cette équation suppose que la batterie est déchargée à plat,  $i$  à courant constant, et que cela durera  $T$  heures. Notez que la capacité Peukert est équivalente à la capacité en ampère heure normale pour une batterie déchargée à 1 A. En pratique, la capacité Peukert est calculée comme dans l'exemple suivant. [34]

Supposons qu'une batterie ait une capacité nominale de 40 Ah au taux de 5 h. Cela signifie qu'elle a une capacité de 40 Ah si elle est déchargée à un courant de:

$$i = \frac{40}{5} = 8 \text{ A} \dots\dots\dots (II.26)$$

Si le coefficient Peukert est égal à 1,2, la capacité Peukert est égale à

$$C_p = 8^{1.2} \times 5 = 60.6 \text{ Ah} \dots\dots\dots (II.27)$$

Nous pouvons maintenant utiliser l'équation (II.25) (réarrangée) pour trouver le temps que durera la batterie à n'importe quel courant  $i$  :

$$T = \frac{C_p}{i^k} \dots\dots\dots (II.28)$$

En utilisant les méthodes décrites ci-dessous, le coefficient Peukert pour cette batterie s'est révélé être de 1,107. À partir de l'équation (II.25), nous avons

$$C_p = 4.2^{1.107} \times 10 = 49 \text{ Ah}$$

La conclusion tirée des équations (II.25) et (II.28) est que, si un courant  $i$  provient d'une batterie, du point de vue de la capacité de la batterie, le courant qui semble sortir de la batterie est de  $i^k$  ampères. Clairement, tant que  $i$  et  $k$  sont supérieurs à 1,  $i^k$  sera plus grand que  $i$ .

Nous pouvons utiliser cela dans une simulation réelle de la batterie et voir comment la tension change lorsque la batterie est déchargée. Ceci est effectué en effectuant une simulation pas à pas, en calculant la charge supprimée à chaque étape.

Le pas de temps entre les calculs sera appelé  $\delta t$ . Si le courant est de  $i$  ampère, la charge apparente ou effective retirée de la batterie est :

$$Perte\ de\ charge = \delta t \times i^k \dots\dots\dots (II.29)$$

Il y a un problème d'unités ici. Si  $\delta t$  est en secondes, il faudra diviser celui-ci par 3600 pour amener les unités en ampheurs. Si  $CR_n$  est la charge totale retirée de la batterie, alors on peut dire que :

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \times i^k}{3600} Ah \dots\dots\dots (II.30)$$

Il est très important de garder à l'esprit qu'il s'agit de la charge retirée des plaques de la batterie. Ce n'est pas la charge totale réellement fournie par la batterie aux circuits électriques du véhicule.

Ce chiffre, que nous pourrions appeler CF, charge fournie, est donné par la formule

$$CF_{n+1} = CF_n + \frac{\delta t \times i}{3600} Ah \dots\dots\dots (II.31)$$

Cette formule donnera normalement un chiffre inférieur, cette différence est due aux réactions d'autodécharge se produisant dans la batterie.

La profondeur de décharge d'une batterie est le rapport entre la charge retirée et la capacité d'origine. Donc, on peut dire que :

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p} \dots\dots\dots (II.32)$$

Ici,  $C_p$  est la capacité de Peukert, à partir de l'équation (II.25). Cette valeur de profondeur de décharge peut être utilisée pour trouver la tension en circuit ouvert, ce qui peut ensuite conduire à la tension réelle aux bornes à partir de la simple équation déjà donnée sous l'équation (II.24).

## II.8. Conclusion :

Nous avons vu, à travers la modélisation du véhicule électrique un ensemble d'équation qui liée la vitesse du véhicule en fonction du couple de rotor et la puissance de rotor qui nous a permettre de simulée la puissance et le couple en fonction de vitesse pour connaitre l'évolution de ces derniers paramètres et aussi en simule la puissance et la vitesse en fonctions du temps pour détermine le point de fonctionnement et constate la vitesse nominale et la puissance nominale.

# CHAPITRE 03

**Simulation et discussion des résultats**

### III.1. Introduction :

Afin de valider notre étude théorique d'un véhicule électrique, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La vitesse et l'accélération du véhicule électrique a été modélisée et simulée à l'aide des logiciels Matlab-Simulink.

En utilisant le logiciel Matlab-Simulink on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en organigramme et puis construire des programmes qui nous a permettre voir l'évolution de la puissance et le couple en fonction de la vitesse d'un véhicule électrique.

### III.2. Modélisation de l'accélération :

#### III.2.1. Modélisation de l'accélération d'un scooter électrique :

Pour notre premier exemple, nous prendrons un scooter électrique. Aucun modèle particulier n'est en cours considéré, mais le véhicule est similaire aux scooters électriques fabriqués par Peugeot, un exemple est présenté à la figure III.1. [34]



Figure III.1. Scooter électrique

- Le scooter électrique a une masse de 115 kg, avec un passager typique de 70 kg, donc masse totale  $m = 185$  kg.
- Le moment d'inertie du moteur n'est pas connu, nous allons donc augmenter  $m$  de 5% dans l'accélération linéaire terme seulement. Une valeur de 194 kg sera donc utilisée à partir de  $m$  dans le dernier terme de l'équation (II.18).

- Le coefficient de traînée  $C_d$  est estimé à 0,75, valeur raisonnable pour un petit scooter, avec un style de conduite assez «assis».
- La surface frontale du véhicule et du conducteur est de  $0,6 \text{ m}^2$ .
- Les pneus et les roulements de roue donnent un coefficient de résistance au roulement,  $\mu_{rr}=0,007$ .
- Le moteur est connecté à la roue arrière à l'aide d'un système de courroies de rapport 2: 1 et la roue diamètre est de 42 cm. Donc  $G = 2$  et  $r = 0,21 \text{ m}$ .
- Pour notre cas nous étudions un moteur typique « Lynch18 » de ce type<sup>1</sup> pourrait avoir les caractéristiques données dans sa spécification suivante :
  - vitesse du moteur = 70 tr / min
  - résistance à l'induit =  $0.016 \Omega$

L'information sur la vitesse du moteur se connecte à l'équation (II.16) et fait référence à la vitesse à vide. L'équation (II.16) peut être modifiée pour :

$$\omega = \frac{E}{K_m \Phi} \text{ rad. s}^{-1} = \frac{60}{2\pi K_m \Phi} E \text{ tr/min}$$

Donc dans ce cas on peut dire que :

$$\frac{60}{2\pi K_m \Phi} = 70 \Rightarrow K_m \Phi = \frac{60}{2\pi \times 70} = 0.136$$

Si ce moteur devait fonctionner avec une équation d'alimentation fixe de 18 V (II.16), ce serait :

$$T = 153 - 1.16\omega \dots\dots\dots (III.1)$$

Et donc seulement cette résistance d'induit  $R_a$  s'oppose à l'alimentation 18V, et donc le courant serait :

$$i = \frac{E_s}{R_a} = \frac{18}{0.016} = 1125A$$

C'est clairement un courant beaucoup trop grand. La limite de courant indiquée est de 250 A ou 350A jusqu'à 5 s. Nous pouvons utiliser cette information et l'équation (II.16) pour établir le maximum couple en tant que :

$$T_{max} = K_m \Phi i = 0.136 \times 250 = 34 \text{ N.m} \dots\dots\dots (III.2)$$

Le courant maximal est contrôlé par le courant de sécurité maximal, comme dans l'équation (III.2), dans ce cas, le couple maximal  $T_{max}$  est de 34 Nm.

La vitesse critique du moteur, c'est après laquelle le couple diminue conformément à l'équation (III.2), se produit quand :

$$34 = 153 - 1.16\omega$$

$$\omega = \frac{153 - 34}{1.16} = 103 \text{ rad. s}^{-1}$$

Le système d'engrenage est très simple et de faible rapport, nous pouvons donc supposer une bonne efficacité. Une valeur de  $\eta_g$  de 0,98 est estimée. Cela aura pour effet de réduire le couple et donc ce facteur sera appliqué au couple.

Lorsque le couple est constant, comme dans l'équation (II.18), on a

$$\frac{2}{0.21} \times 0.98 \times 34 = 0.007 \times 185 \times 9.8 + 0.625 \times 0.6 \times 0.75 v^2 + 194 \frac{dv}{dt}$$

$$317 = 12.7 + 0.281 v^2 + 194$$

Ainsi  $194 \frac{dv}{dt} = 304 - 0.281v^2$

Et donc  $\frac{dv}{dt} = 157 - 0.00145v^2 \dots\dots\dots(III.3)$

Cette équation est valable jusqu'à ce que le couple commence à baisser lorsque  $\omega = \omega_c = 103 \text{ rad.s}^{-1}$ , qui correspond à  $103 \times 0,21/2 = 10,8 \text{ m s}^{-1}$ . Après ce point, le couple est régi par Équation (III.1). Si nous substituons cela, ainsi que les autres constantes, à l'équation (III.3), nous obtenir :

$$\frac{2}{0.21} \times 0.98 \times \left(153 - 116 \frac{2}{0.21} v\right) = 0.007 \times 185 \times 9.8 + 0.625 \times 0.6 \times 0.75v^2 + 194 \frac{dv}{dt}$$

$$1428 - 103v = 12.7 + 0.281v^2 + 194 \frac{dv}{dt}$$

Ainsi  $\frac{dv}{dt} = 7.30 - 053v - 0.00145v^2 \dots\dots\dots(III.4)$

Il existe de nombreuses manières simples et pratiques de résoudre ces équations différentielles. Beaucoup calculatrices modernes vont résoudre de telles équations, en se rappelant qu'il existe un simple début condition que  $v = 0$  lorsque  $t = 0$ . Cependant, l'étape suivante la plus polyvalente consiste à dériver une solution numérique simple, qui peut ensuite être facilement utilisée dans Excel ou MATLAB®. La dérivée de  $v$  est simplement la différence entre les valeurs consécutives de  $v$  divisées par le pas de temps. L'application de cela à l'équation (III.3) nous donne

$$\frac{v_{n+1} - v_n}{\delta t} = 157 - 0.00145v_n^2$$

Pour un programme tel que Excel ou MATLAB®, nous devons réorganiser cette équation pour obtenir la valeur de la vitesse suivante à partir de la vitesse actuelle. Cela se fait comme suit:

$$v_{n+1} = v_n + \delta t \times (157 - 0.00145v_n^2) \dots\dots\dots(III.5)$$

Cette équation est valable pour les vitesses jusqu'à la vitesse critique de  $10,8 \text{ m s}^{-1}$ , après quoi nous utiliser l'équation (III.4), approximée exactement de la même manière que nous venons de le faire pour l'équation (III.3), qui donne

$$v_{n+1} = v_n + \delta t \times (7.30 + 0.53v - 0.00145v_n^2) \dots\dots\dots(III.6)$$

Le fichier de script MATLAB® ci-dessous montre comment résoudre ces équations à l'aide de Ce programme. La figure III.1. Est un graphique de la solution utilisant un pas de temps  $\delta t$  de 0,1 seconde.

Le résultat de cette simulation est présenté à la figure 1 et montre que la performance est un peu comme on pourrait s'y attendre d'un moteur de faible puissance. L'accélération n'est pas spectaculaire, et la vitesse maximale est d'environ 30 mile/h ou 48 km / h, sur un terrain plat. Cependant, cela est raisonnablement compatible avec une conduite en ville sûre. L'accélération de tels véhicules est parfois donnée en termes de départ arrêté 100 fois et de la puissance de ce type MATLAB® Les fichiers de script sont qu'ils peuvent très facilement être modifiés pour produire de telles informations. Si la ligne de tracé dans le fichier ci-dessus est modifiée comme suit, puis la figure 2 est obtenue.

Bien que nous ne prétendions pas que notre modèle représente exactement un type commercial conceptions, il convient de noter les points suivants de la spécification de la Peugeot Spécification de performance Scooter Electrique :

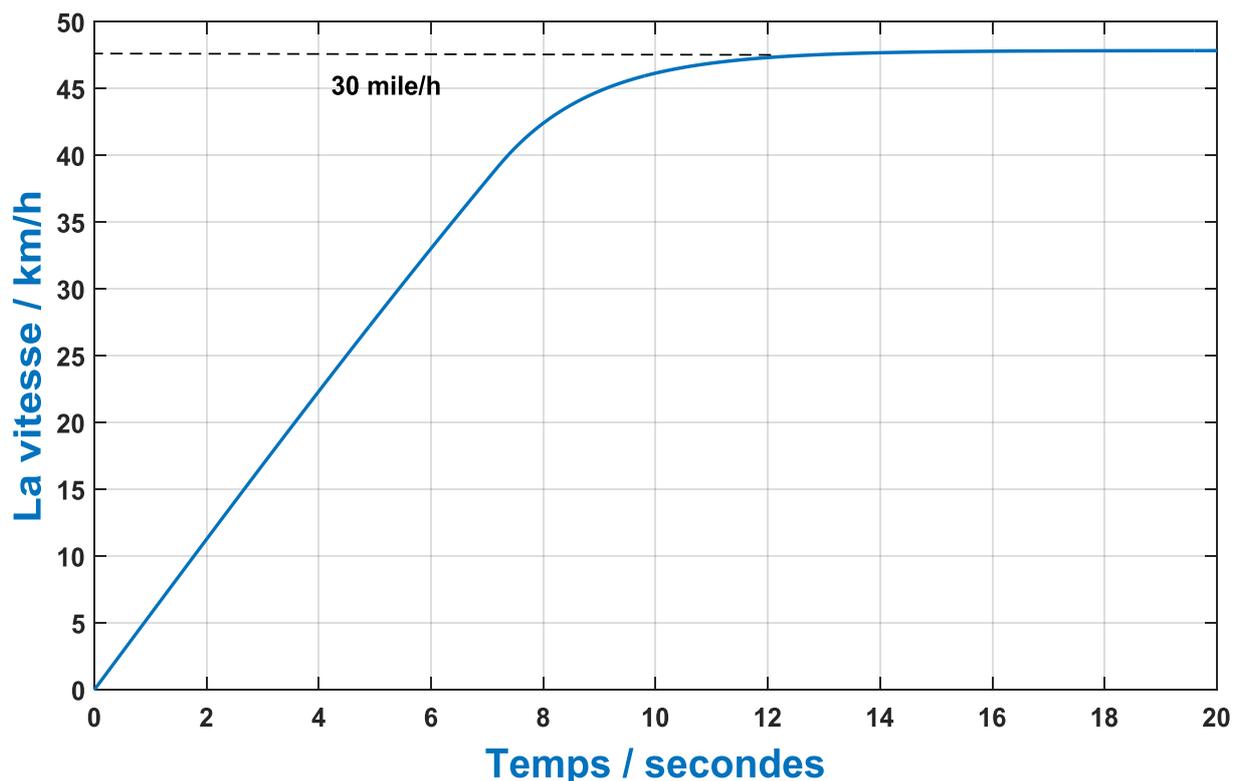


Figure III.2. Accélération maximale du scooter électrique

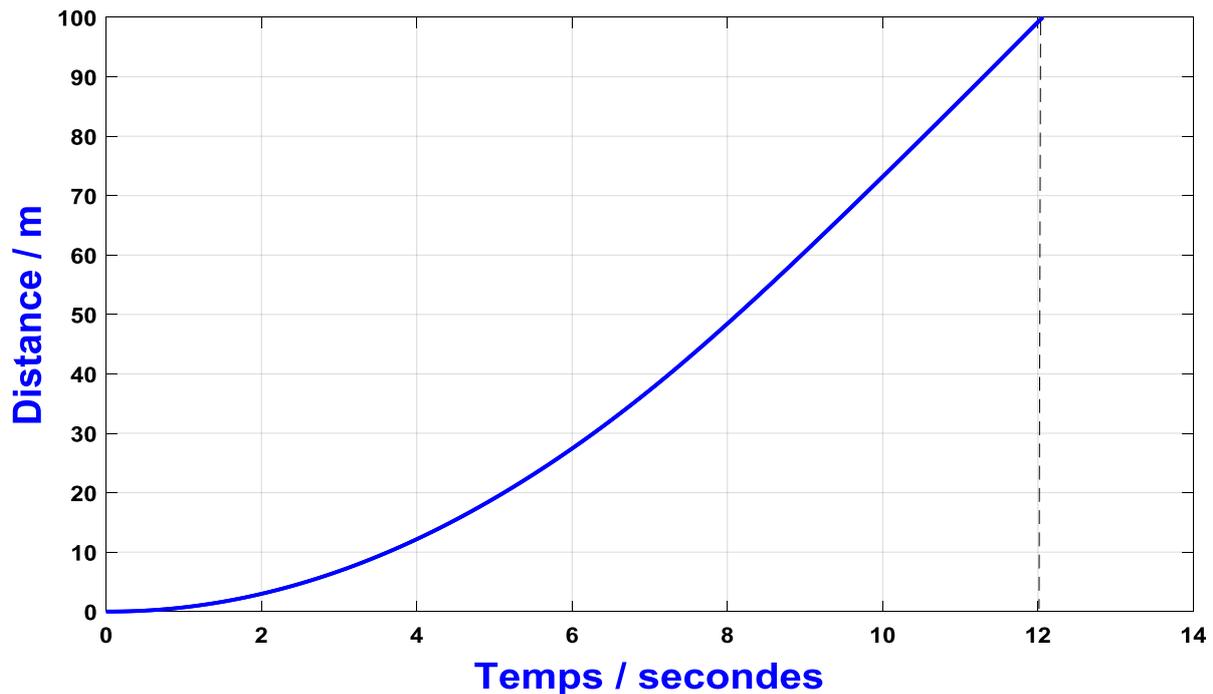


Figure III.3. Graphique de distance / temps pour un scooter électrique

- Vitesse maximale : 45 km / h
- 10m du temps de départ debout : 3,2 secondes
- 100m du départ debout : 12 secondes.

Les figures III.2. Et III.3. Montrent très clairement que la performance de notre véhicule simulé est remarquablement similaire.

### III.2.2. Modélisation de l'accélération d'une petite voiture :

Pour notre deuxième exemple, nous allons utiliser un véhicule qui a eu un impact important sur le récent développement de voitures électriques. La GM VE1 était sans doute la première voiture électrique moderne d'une des très grandes entreprises automobiles. Il incorporait des technologies assez novatrices quand il a été introduit. La figure III.4. Ci-dessus montre plusieurs vues de ce véhicule. [34]



Figure III.4. La voiture électrique révolutionnaire GM EV1 à batterie.

Mais pour autant que ses performances soient simulées, Les principales caractéristiques sont :

- Un coefficient de traînée ultra-faible Cd de 0,19
- un très faible coefficient de résistance au roulement,  $\mu_{rr}$ , de 0,0048
- L'utilisation de moteurs à induction à fréquence variable, fonctionnant à très grande vitesse presque 12000 tours / minute à vitesse maximale.

D'autres données sont extraites des informations de l'entreprise1 sur le véhicule :

- Masse du véhicule = 1400 kg. Ajoutez ensuite un conducteur et un passager pesant chacun

70 kg. Donnant  $m = 1540$  kg.

- Le moment d'inertie du moteur n'est pas connu. Cependant, comparé à la masse d'un tel véhicule lourd ce sera très faible. Les roues sont également très légères. Nous allons se rapprocher de ce terme en augmentant très modestement la masse à 1560 kg en finale terme de l'équation (8.12).
- Le rapport de transmission est : 11, donc  $G = 11$ . Le rayon du pneu est 0,30 m.
- Pour le moteur,  $T_{max} = 140$  N.m et  $\omega_c = 733$  rad.s<sup>-1</sup> (Notez que cela signifie que  $T = T_{max}$  jusqu'à  $v = 19,8$  m.s<sup>-1</sup> (71,3 km / h)).
- Au-dessus de 19,8 m.s<sup>-1</sup>, le moteur fonctionne à une puissance constante de 102 kw, car il s'agit d'un test WOT. Alors :

$$T = \frac{10200}{37 \times v} = \frac{2756}{v}$$

- La zone frontale  $A = 1.8m^2$ .
- L'efficacité du couplage de l'entraînement à une seule vitesse entre le moteur et l'essieu est estimée comme 95%, donc  $\eta_g = 0,95$ . Les valeurs du couple T seront réduites d'un facteur de 0,95.

Ce chiffre légèrement inférieur est dû au fait qu'il existe un entraînement final et une boîte de vitesses à rapport supérieur que dans le dernier exemple.

Ces valeurs peuvent maintenant être placées dans l'équation (II.17), donnant pour la première phase lorsque le couple moteur est constant

$$0.95 \times 0.37 \times 140 = 72.4 + 0.214v^2 + 1560 \frac{dv}{dt}$$

Alors

$$\frac{dv}{dt} = 3.11 - 0.000137v^2 \dots\dots\dots (III.7)$$

Une fois que la vitesse a atteint 19.8 m. s<sup>-1</sup> la vitesse est donnée par l'équation différentielle

$$0.95 \times 0.37 \times \frac{2756}{v} = 72.4 + 0.214v^2 + 1560 \frac{dv}{dt}$$

Alors

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62.1}{v} - 0.046 - 0.000137v^2 \dots\dots\dots(III.8)$$

La procédure de recherche de l'accélération est très similaire à celle du premier exemple. La seule complication supplémentaire est que lorsque la vitesse atteint  $35.8\text{ms}^{-1}$ , il cesse de monter, car à ce stade, le contrôleur de moteur limite toute accélération ultérieure. Avant qu'un programme tel que MATLAB puisse être utilisé, les équations clés, Les équations (III.7) et (III.8) doivent être placées sous la forme « différences finies ». Ceci est fait exactement comme nous l'avons fait pour les équations (III.3) et (III.4). Les deux équations deviennent :

$$v_{n+1} = v_n + \delta t(3.11 - 0.00137v_n^2) \dots\dots\dots(III.9)$$

$$v_{n+1} = v_n + \delta t\left(\frac{62.1}{v_n} - 0.046 - 0.000137v_n^2\right) \dots\dots\dots(III.10)$$

Le fichier script MATLAB pour ces équations est très similaire à celui de l'électrique scooter. Le graphique de la vitesse en fonction du temps est présenté à la figure 3. En regardant la figure 3, nous peut voir que le temps nécessaire pour atteindre 96 km / h, ce qui est de 60 mile/h, est un peu moins de 9 secondes. Ne pas C'est seulement une performance très respectable, mais c'est aussi exactement la même que celle donnée dans le chiffre officiel pour la performance du véhicule réel.

Nous avons donc constaté que cette méthode de modélisation des véhicules, bien que peu complexe, la performance donne des résultats validés par des données réelles. On peut donc avoir confiance dans cette méthode. Cependant, les véhicules doivent faire plus que simplement bien accélérer un départ debout, et dans la section suivante nous abordons la question plus complexe de la gamme la modélisation.

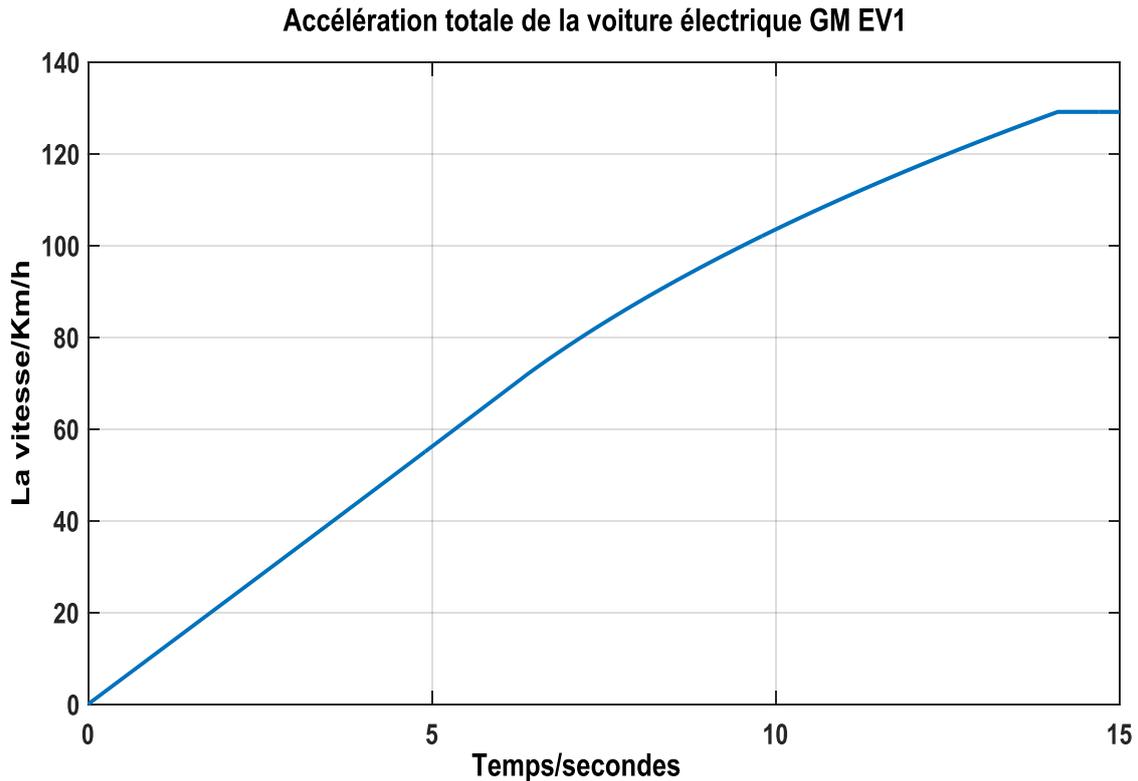


Figure III.5. Accélération totale de la voiture électrique GMEV1.

### III.3. Exemple d'étude des paramètres de la Nissan Leaf 2015 :

Dans cet exemple on étudie des paramètres (vitesse, couple, puissance) concernant le véhicule électrique pure la Nissan Leaf 2015.

D'après la fiche technique de la Nissan Leaf 2015 Model S, la masse du véhicule est  $m = 1645\text{Kg}$ , Le coefficient de traînée  $C_d$  est estimé à 0.28, avec puissance nominale  $P_{r.n} = 80\text{KW}$ , le couple rotorique nominale  $T_{r.n} = 254\text{N.m}$ , le rayon de roue  $r = 0.315\text{m}$ , le rapport de transmission  $G = 8.19$ , la vitesse maximale  $v_{max} = 150\text{Km/h}$ , le coefficient paramétrique de la vitesse sont :  $A = 133.3$ ,  $B = 0.7094$ ,  $C = 0.491$ , le rendement de transmission  $\eta_g = 0.97$  et le moment d'inertie  $I = 3$ , le temps estimé de 0 – 100 Km/h est 11.5s. [35]

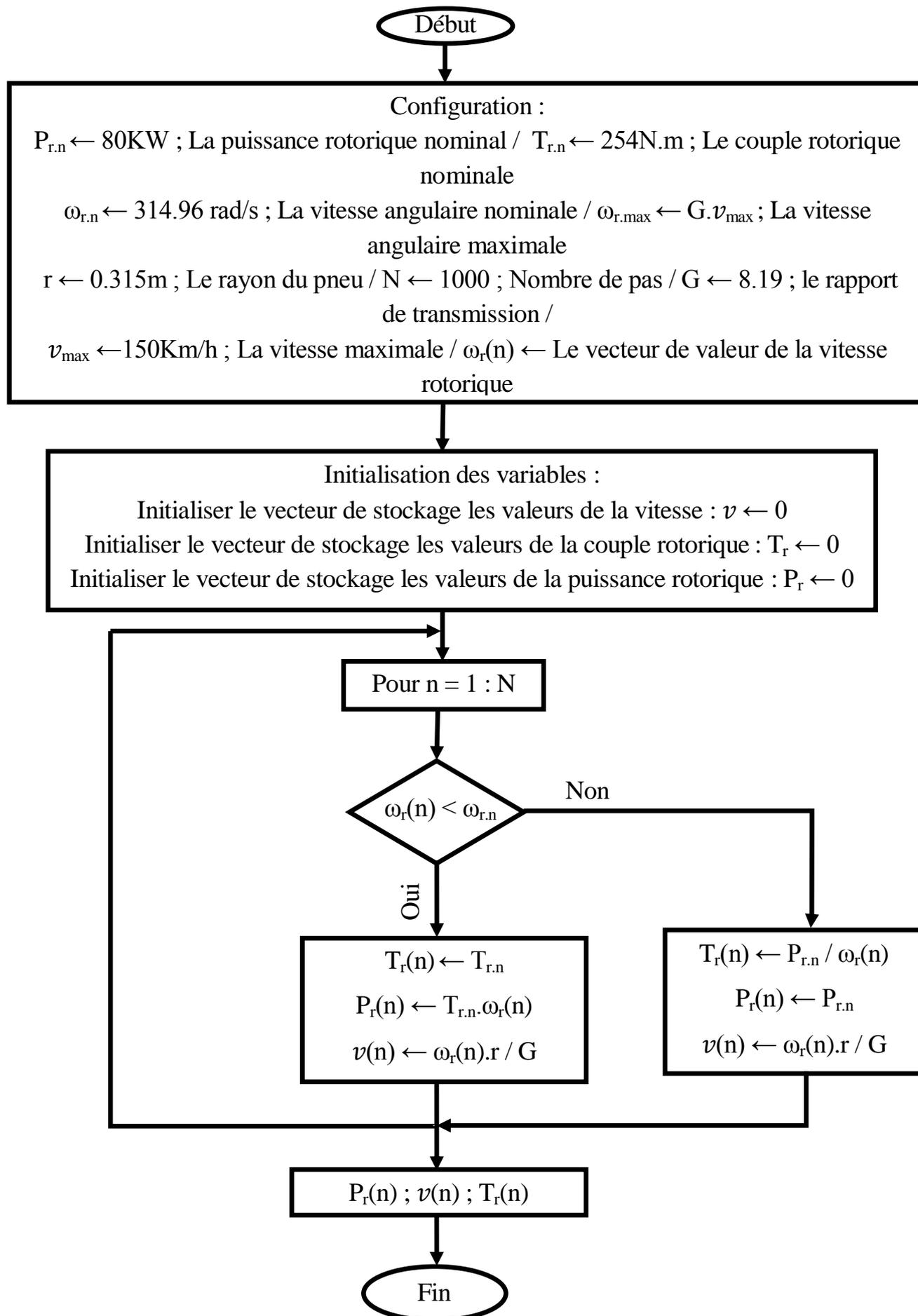
Donc en fait les calculs suivants :

$$\omega_{r.n} = \frac{P_{r.n}}{T_n} = \frac{80000}{254} = 314.96\text{ rad/s}$$

$$v_n = r \times \frac{\omega_{r.n}}{G} = 0.315 \times \frac{314.96}{8.19} = 12.11\text{ ms}^{-1} = 43.61\text{ Km/h}$$

#### III.3.1. Simulation de l'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse :

D'après ces données, on a schématisé cet organigramme suivant :



On a modélisé l'organigramme précédent dans un programme MATLAB fichier script et on a obtenu le résultat suivant :

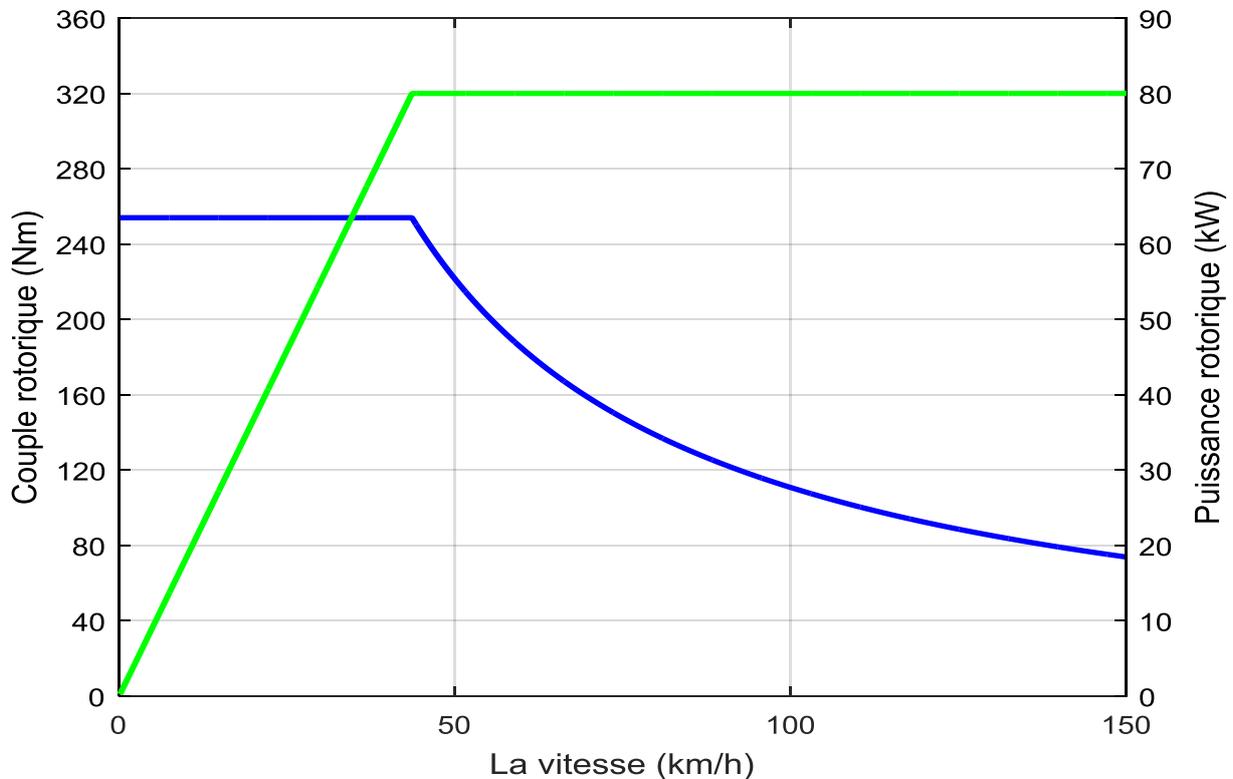


Figure III.6. L'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse.

### III.3.2. Interprétation du résultat :

Dans notre étude on a considérée pour la véhicule Nissan Leaf 2015 a un couple rotorique nominale égale 254 N.m et une puissance rotorique nominale de 80 KW, d'autre part si on fixe la vitesse nominale du véhicule à 150 Km/h on trouve un couple limite de 78 N.m qu'il ne faut pas le dépasser et d'après le graphe on constate que :

Si la vitesse du véhicule inférieure à la vitesse nominale ( $v_n = 43.61 \text{ Km/h}$ ), le couple reste constante et égale à le couple nominale ( $T_n = 254 \text{ N.m}$ ), et la puissance augmente vers la puissance nominale ( $P_n = 80 \text{ KW}$ ) à cause de la vitesse variée proportionnellement avec la puissance si le couple reste constante.

Si la vitesse de véhicule atteindre vitesse nominale ou devient supérieur on remarque l'inverse de ce qu'on a parlé précédemment, la puissance reste constante égale à la puissance nominale et le couple diminue jusqu'à le couple limite ( $T_L = 78 \text{ N.m}$ ).

D'où, on doit conclure que :

Si la vitesse est faible le couple devient nominal est la puissance consommée est faible.

Si la vitesse est grande le couple devient faible est la puissance consommée est grande.

### III.3.3. Simulation de l'évolution la vitesse et puissance par rapport au temps :

Pour deuxième cas, avec même paramètres on a étudié l'évolution la vitesse et puissance par rapport au temps et après l'équation différentielle suivant :

$$\frac{dv}{dt} = \{G\eta_g T_r - r[(A + mg \sin(\theta)) + Bv + Cv^2]\} / \left( rm + \frac{I}{r} \right)$$

où on suppose que le couple d'accélération provient du rotor d'une machine électrique ( $T_t = T_r$ ). Cette équation différentielle est facilement résolue numériquement en calculant la différence changement de vitesse pour un petit pas de temps différentiel  $\Delta t$ . Laisser

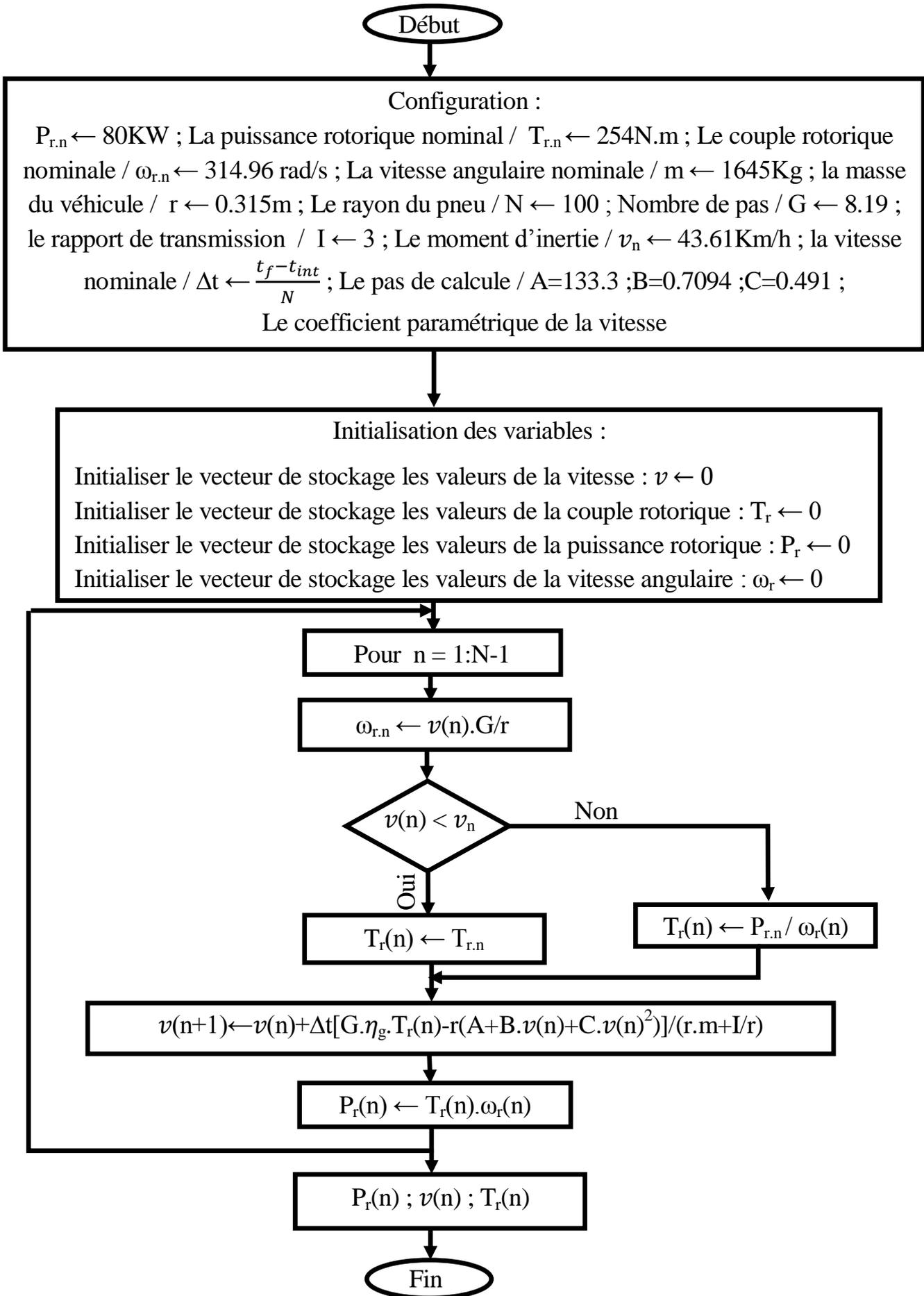
$$\frac{dv}{dt} = \frac{v(n+1) - v(n)}{\Delta t}$$

Où  $v(n)$  et  $v(n+1)$  sont les vitesses du véhicule aux (n) I<sup>ème</sup> et (n+1) I<sup>ème</sup> pas, respectivement.

Ainsi,

$$v(n+1) = v(n) + \Delta t \cdot \{G\eta_g T_r - r[(A + mg \sin(\theta)) + Bv + Cv^2]\} / \left( rm + \frac{I}{r} \right)$$

D'après ces données, on a schématisé cet organigramme suivant :



L'équation ci-dessus est résolue à l'aide du code MATLAB en annexe et de l'accélération. Le profil est généré pour la Nissan Leaf 2015, comme illustré à la figure III.7. De la simulation, le code prédit une valeur d'environ 10,8 s, ce qui est très proche de la valeur publiée valeur d'essai de 11,5s.

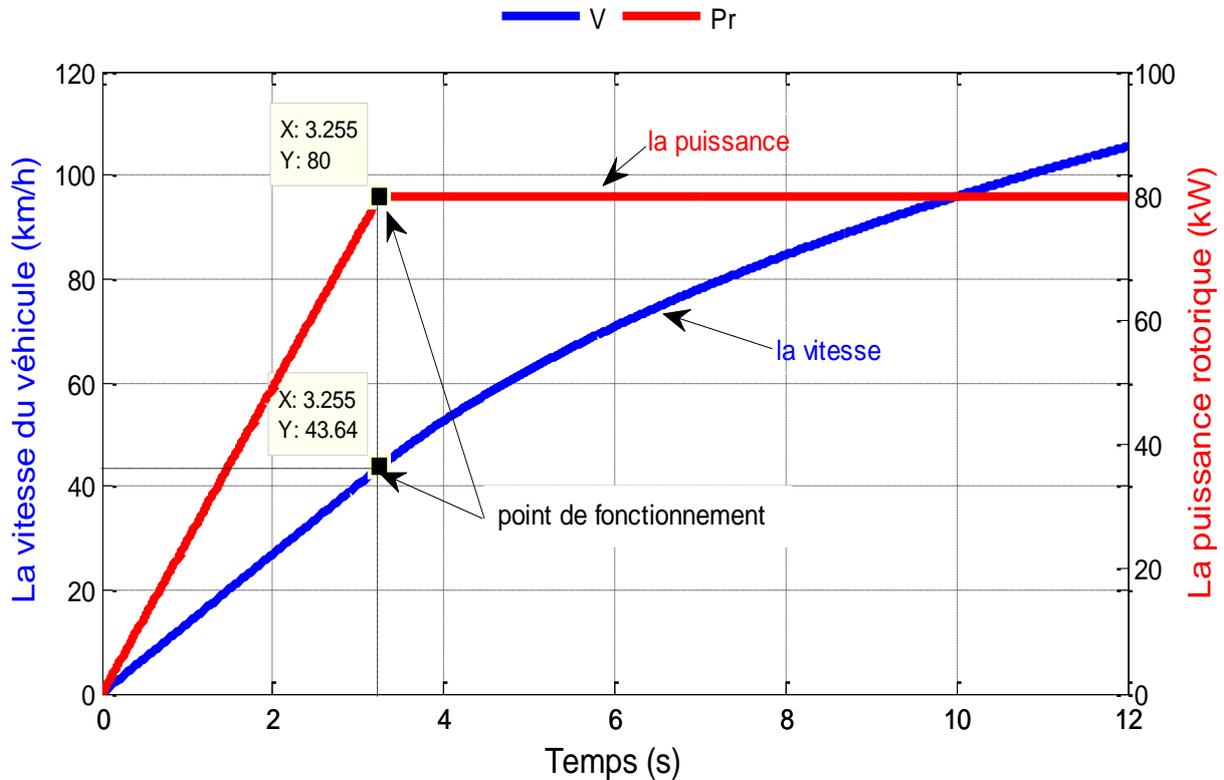


Figure III.7. L'évolution la vitesse et puissance par rapport au temps.

### III.3.4. Interprétation du résultat :

La figure représente l'évolution de la vitesse du véhicule électrique et la puissance rotorique en fonction du temps, on sait que la puissance rotorique lorsque atteindre la puissance nominale ( $P_{r,n} = 80KW$ ) provoque que la vitesse du véhicule égale à la vitesse nominale ( $v_n = 43.61Km/h$ ) et on trouve une résultat satisfaisante dans notre simulation, Car le temps nécessaire pour la puissance rotorique atteindre la puissance nominale est reste constante est 3.255s, et par la projection dans le même temps sur l'axe de vitesse ou trouve la vitesse du véhicule égale à 43.64 Km/h.

D'où : on doit conclure que :

Si le temps varié de 0s à 3.255s : la puissance rotorique évoluée 0KW jusqu'à la puissance nominale 80KW et la vitesse du véhicule évoluée de 0Km/h jusqu'à la vitesse nominale 43.64 Km/h

Si le temps dépasse 3.255s : la puissance rotorique reste constante égale à la puissance nominale 80KW et la vitesse du véhicule reste évoluée jusqu'à la vitesse nominale  $v_{max} = 150km/h$ .

### III.4. Exemple d'étude des paramètres de la Tesla modèle S 2014 :

Dans cet exemple on étudie des paramètres (vitesse, couple, puissance) concernant le véhicule Électrique pure la Tesla modèle S 2014.

D'après la fiche technique du la Tesla modèle S 2014, la masse du véhicule est  $m = 2155 \text{ Kg}$ , Le coefficient de traînée  $C_d$  est estimé à 0.24, avec puissance nominale  $P_{r.n}=270 \text{ KW}$ , le couple rotorique nominale  $T_{r.n} = 440 \text{ N.m}$ , le rayon de roue  $r = 0.352\text{m}$ , le rapport de transmission  $G = 9.73$ , la vitesse maximale  $v_{max} = 224 \text{ Km/h}$ , le coefficient paramétrique du vitesse sont :  $A = 177.2$ ,  $B = 1.445$ ,  $C = 0.354$ , le rendement de transmission  $\eta_g = 0.98$  et le moment d'inertie  $I = 3$ , le temps estimé de 0 – 100 Km/h est 5.4s. [35]

Donc en fait les calculs suivants :

$$\omega_{r.n} = \frac{P_{r.n}}{T_n} = \frac{270000}{440} = 613.63 \text{ rad/s}$$

$$v_n = r \times \frac{\omega_{r.n}}{G} = 0.352 \times \frac{613.63}{9.73} = 22.19 \text{ ms}^{-1} = 79.88 \text{ Km/h}$$

#### III.4.1. Simulation de l'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse :

D'après ces données, on a résolu même organigramme de la Nissan Leaf 2015.

On a modélisé les calculs précédents dans un programme MATLAB fichier script et on a obtenu le résultat suivant :

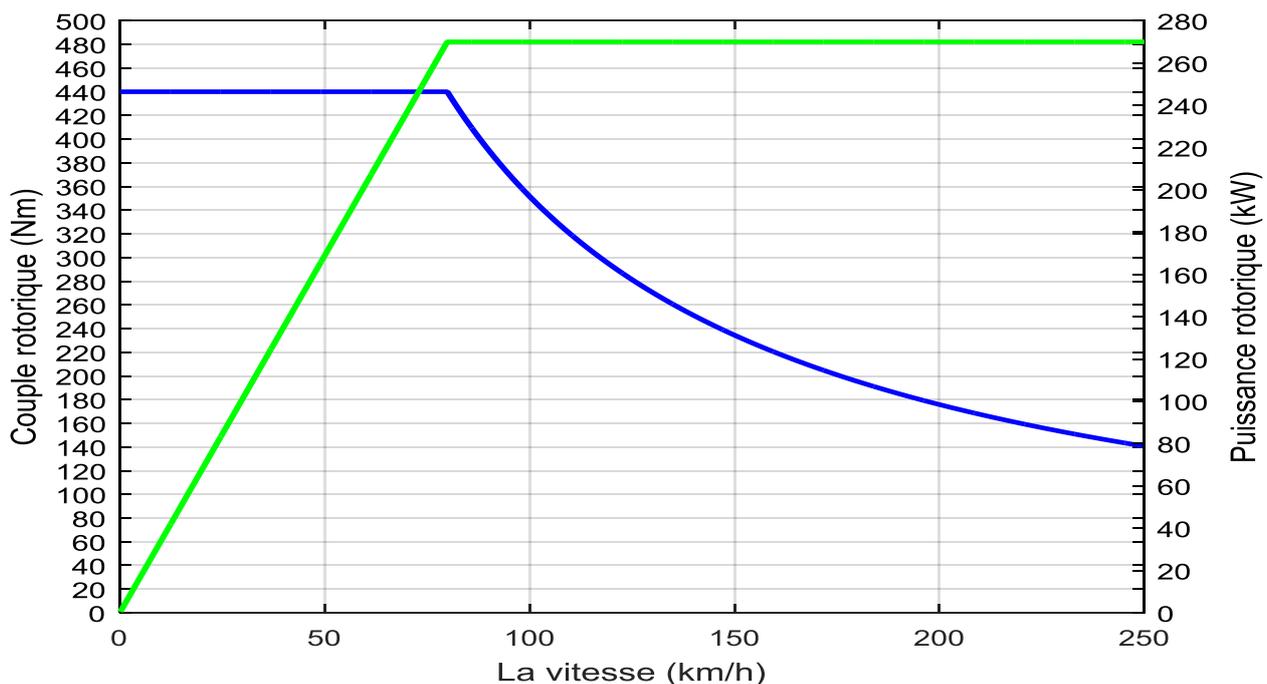


Figure III.8. L'évolution du couple et la puissance par rapport à la vitesse.

### III.4.2. Interprétation du résultat :

Dans notre étude on a considérée pour la véhicule Tesla modèle S 2014 a un couple rotorique nominale égale 440 N.m et une puissance rotorique nominale de 270 KW, d'autre part si on fixe la vitesse nominale du véhicule à 250 Km/h on trouve un couple limite de 140.7 N.m qu'il ne faut pas le dépasser et d'après le graphe on constate que :

Si la vitesse du véhicule inférieure à la vitesse nominale ( $v_n = 79.88 \text{ Km/h}$ ), le couple reste constante et égale à le couple nominale ( $T_n = 440 \text{ N.m}$ ), et la puissance augmente vers la puissance nominale ( $P_n = 270 \text{ KW}$ ) à cause de la vitesse variée proportionnellement avec la puissance si le couple reste constante.

Si la vitesse de véhicule atteindre vitesse nominale ou devient supérieur on remarque l'inverse de ce qu'on a parlé précédemment, la puissance reste constante égale à la puissance nominale et le couple diminuée jusqu'à le couple limite ( $T_L = 140.7 \text{ N.m}$ ).

D'où, on doit conclure que :

Si la vitesse est faible le couple devient nominal et la puissance consommée est faible.

Si la vitesse est grande le couple devient faible et la puissance consommée est grande.

### III.4.3. Simulation de l'évolution de la vitesse et la puissance par rapport au temps :

Dans la deuxième expérience, avec même paramètres on a étudié l'évolution la vitesse et puissance par rapport au temps et après l'équation différentielle suivant :

$$\frac{dv}{dt} = \{G\eta_g T_r - r[(A + mg \sin(\theta)) + Bv + Cv^2]\} / \left( rm + \frac{I}{r} \right)$$

où on suppose que le couple d'accélération provient du rotor d'une machine électrique ( $T_t = T_r$ ). Cette équation différentielle est facilement résolue numériquement en calculant la différence de changement de vitesse pour un petit pas de temps différentiel  $\Delta t$ . Laisser

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v(n+1) - v(n)}{\Delta t}$$

Où  $v(n)$  et  $v(n+1)$  sont les vitesses du véhicule aux  $n$  et  $(n+1)$  pas, respectivement.

Ainsi,

$$v(n+1) = v(n) + \Delta t \cdot \{G\eta_g T_r - r[(A + mg \sin(\theta)) + Bv + Cv^2]\} / \left( rm + \frac{I}{r} \right)$$

**Remarque :** le deuxième organigramme est le même que le cas de Nissan Leaf 2015.

L'équation ci-dessus est résolue à l'aide du code MATLAB en annexe et de l'accélération. Le profil est généré pour la Tesla modèle S 2014, comme illustré à la figure 2.10. De la simulation, le code prédit une valeur d'environ 5.34s, ce qui est très proche de la valeur publiée valeur d'essai de 4.5s.

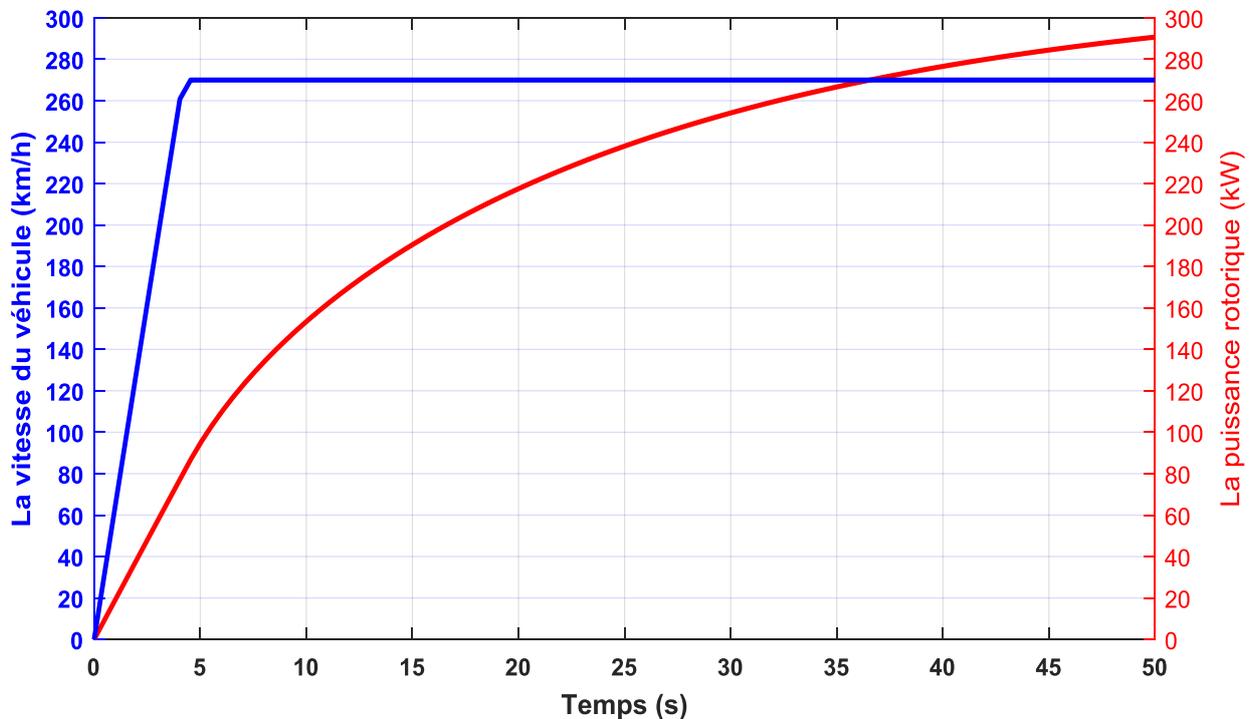


Figure III.9. L'évolution de la vitesse et la puissance par rapport au temps.

#### III.4.4. Interprétation du résultat :

Dans notre étude on a considérée pour la véhicule Tesla modèle S 2014 a un couple rotorique nominale égale 440 N.m et une puissance rotorique nominale de 270 KW, d'autre part si on fixe la vitesse nominale du véhicule à 250 Km/h ou trouve un couple limite de 140.7 N.m qu'il ne faut pas le dépasser et d'après le graphe ou constante que :

Si la vitesse du véhicule inférieure à la vitesse nominale ( $v_n = 79.88 \text{ Km/h}$ ), le couple reste constante et égale à le couple nominale ( $T_n = 440 \text{ N.m}$ ), et la puissance augmente vers la puissance nominale ( $P_n = 270 \text{ KW}$ ) à cause de la vitesse variée proportionnellement avec la puissance si le couple reste constante.

Si la vitesse de véhicule attendre vitesse nominale ou devient supérieur en remarque l'inverse de ce qu'on a parlé précédé, la puissance reste constante égale à la puissance nominale et le couple diminuée jusqu'à le couple limite ( $T_L = 140.7 \text{ N.m}$ ).

D'où, on doit conclure que :

Si la vitesse est faible le couple devient nominal est la puissance consommée est faible.

Si la vitesse est grande le couple devient faible est la puissance consommée est grande.

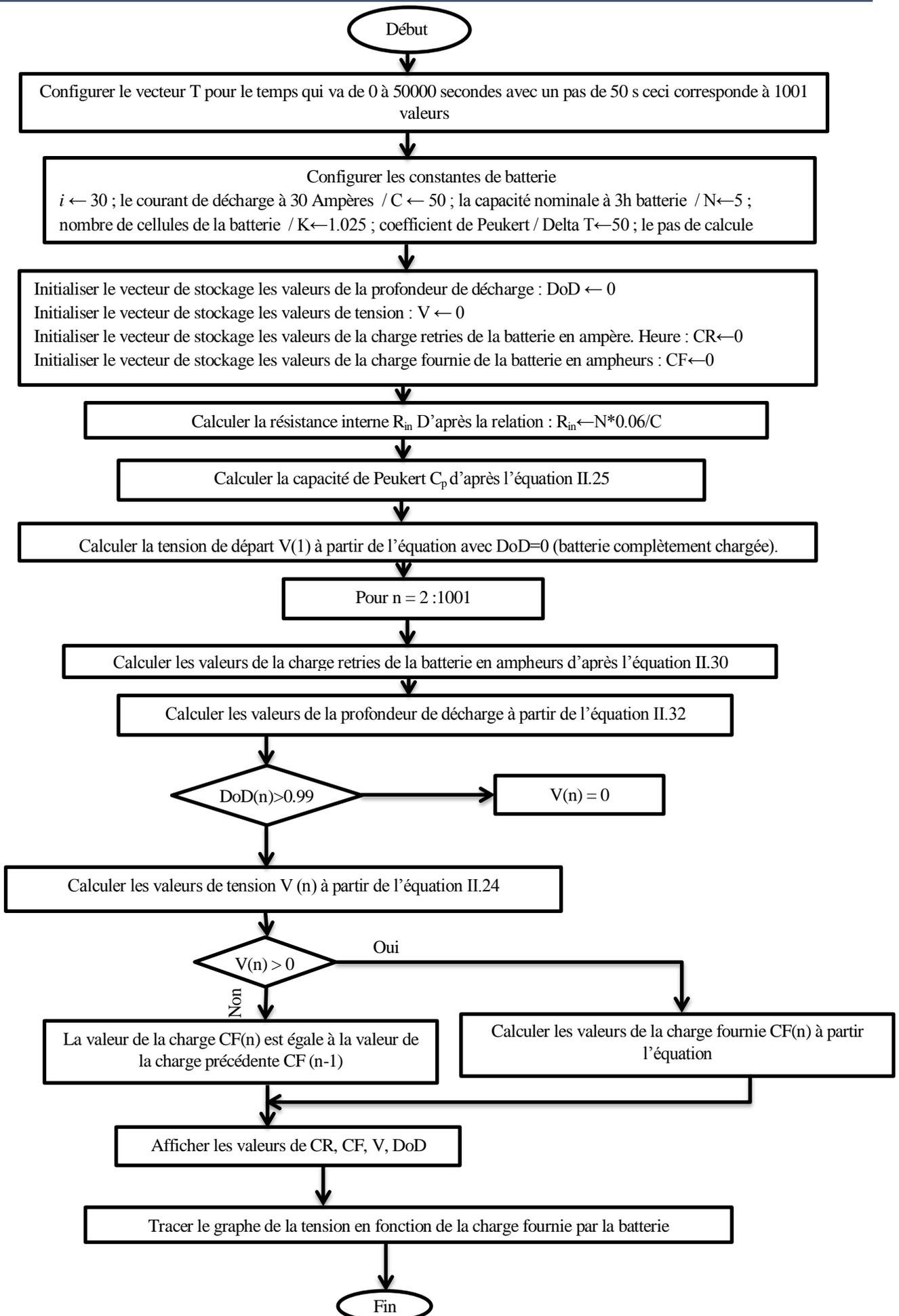
### III.5. Simulation de la batterie :

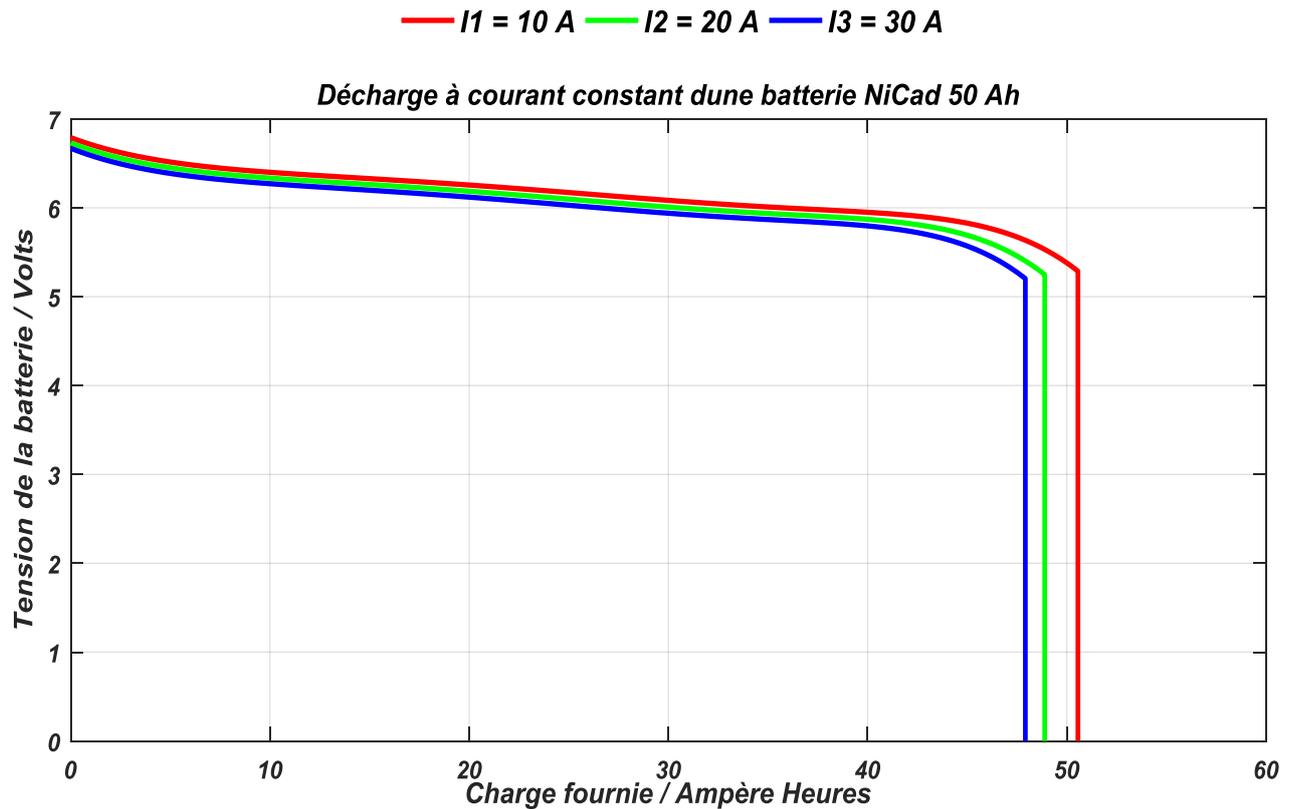
Le but de nos simulations de batterie est de pouvoir prédire les performances des véhicules électriques en termes de distance, d'accélération, de vitesse, etc...

Dans ces simulations, la vitesse des véhicules change assez lentement, et le comportement dynamique de la batterie fait une différence minime par rapport aux autres approximations que nous devons faire en cours de route. Par conséquent, dans cette introduction à la simulation de la batterie, nous utiliserons le circuit équivalent de base de la figure II.11.

Pour simuler la décharge d'une batterie, ces équations sont « parcourues  $\zeta$  »,  $n$  allant de 1, 2, 3, 4, etc. jusqu'à ce que la batterie soit déchargée. Ceci est atteint lorsque la profondeur de décharge est égale à 0, bien qu'il soit plus fréquent de s'arrêter juste avant, disons lorsque  $\text{DoD} = 0,99$ .

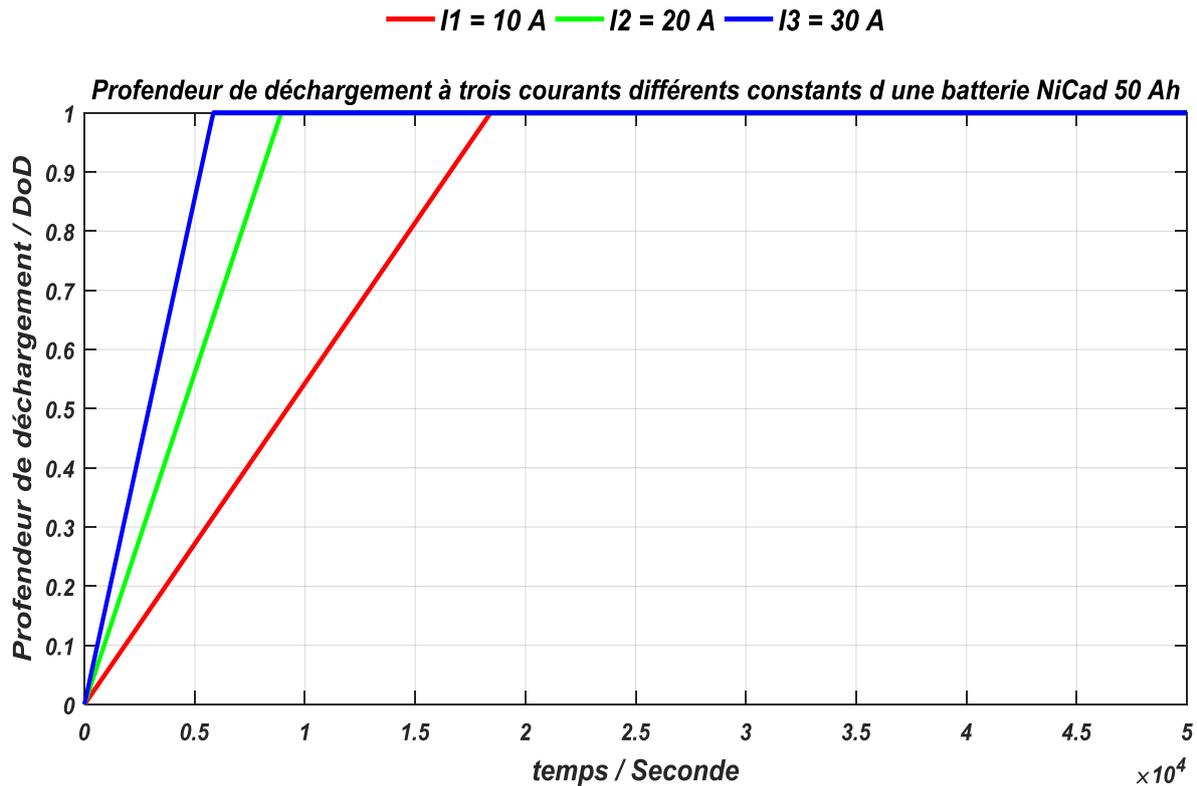
L'organigramme ci-dessous exécute une telle simulation pour une batterie NiCad, avec un courant constant. Les figures III.10 et III.11 montrent les graphiques de tension pour trois courants différents. La tension est représentée en fonction de la CF réelle par la batterie, comme dans l'équation (II.31).





**Figure III.10 :** L'évolution de la tension aux bornes de la batterie en fonction de la charge fournie par la batterie pour trois courants différents.

La figure III.10 montre les graphiques de tension pour trois courants différents. La tension est représentée en fonction de la charge fournie réelle par la batterie, on remarque que lorsque la batterie est complètement chargée ayant une tension de 6.7 V qui va diminuée jusqu'à 5.2 V qui est l'image de 47.92 Ah fournie à partir de la batterie pour un courant  $I_1$  de 30 A, 48.9 Ah fournie à partir de la batterie pour un courant  $I_2$  de 20 A et 50.6 Ah fournie à partir de la batterie pour un courant  $I_3$  de 10 A et le pourcentage de déchargement de la batterie atteint 99 %.



**Figure III.11 : L'évolution de profondeur de déchargement à trois courants différents constants en fonction de temps pour une batterie NiCad 50 Ah**

La figure III.11 montre les graphiques de profondeur de déchargement pour trois courants différents. La profondeur de déchargement DoD est représentée en fonction du temps, on remarque que :

- pour un courant  $I_1$  fournie par la batterie de 10 A on a le temps nécessaire pour que la batterie est complètement déchargée c'est-à-dire (DoD = 1) est : 18300 s
- pour un courant  $I_2$  fournie par la batterie de 20 A on a le temps nécessaire pour que la batterie est complètement déchargée c'est-à-dire (DoD = 1) est : 9000 s
- pour un courant  $I_3$  fournie par la batterie de 30 A on a le temps nécessaire pour que la batterie est complètement déchargée c'est-à-dire (DoD = 1) est : 5900 s

Donc on doit constater que la durée de vie de déchargement de la batterie la plus long correspond à le plus faible courant  $I$  fournie par la batterie.

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé la puissance rotorique et le couple rotorique en fonction de vitesse du véhicule et aussi la puissance et la vitesse en fonction de temps, Ainsi on doit constater que l'évolution de puissance est proportionnelle inverse à l'évolution de couple, et lorsque la puissance rotorique atteind la puissance maximale la vitesse devient égale à la vitesse nominale dans chaque véhicule et le couple rotorique commence descendre et ne jamais dépasse le couple limite qui correspond la vitesse maximale. D'autre part les résultats obtenus aussi permettre de comparer le véhicule électrique Tesla modèle S 2014 et Nissan Leaf 2015. Ainsi que le véhicule Tesla modèle S 2014 admet un couple nominal de 440 N.m et une puissance maximale de 270 KW avec vitesse maximale de 250 km/h qui donne une vitesse nominale de 79.92 km/h. et le véhicule Nissan Leaf 2015 admet un couple nominal de 254 N.m et une puissance maximale de 80 KW avec une vitesse maximale de 150 km/h qui donne une vitesse nominale de 43.61 Km/h. d'où on peut parler que le véhicule Tesla modèle S 2014 plus puissante que le véhicule Nissan Leaf 2015.

# CONCLUSION GENERALE

### Conclusion générale :

Au cours de cette dernière décennie, l'accroissement des émissions polluantes des véhicules génèrent notamment l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui engendre le réchauffement climatique. L'électrification de la chaîne de traction de véhicule semble alors la bonne solution en terme de transport au problème d'émission de gaz à effet de serre et de puisement de ressources fossiles.

La présente thèse a apporté une contribution originale dans le domaine du dimensionnement et de la conception et la modélisation des véhicules électriques et voir une comparaison entre eux.

Nous avons commencé notre travail par un état de l'art des voitures hybrides et électriques. Présentée au premier chapitre, cette étude montre la diversité des machines électriques utilisées dans la motorisation de ces véhicules. Nous avons classé ces machines selon des critères techniques et économiques.

L'optimisation des véhicules électriques était l'un des principaux enjeux de nos recherches. Dans le deuxième chapitre nous avons exposé les différentes méthodes de modélisation analytique.

Le troisième chapitre a été entièrement dédié à notre simulation et leur discussion des résultats obtenues avec la comparaison entre les véhicules électriques simulées. Une introduction aux familles d'organigramme a été également développée dans ce chapitre.

### Bibliographie

- [1] Véhicules électriques En route vers une diffusion massive ? Juin 2016, IAU Île-de-France, Arnaud Bouissou / Terra.
- [2] BENARIBA Hassan. « Contribution à la commande d'un véhicule électrique », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen, 06 Décembre 2018.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric- and Fuel Cell Vehicles », CRC press, USA, 2005.
- [4] Iqbal Husain. « Electric and Hybrid Vehicles: design Fundamentals », CRC Press LLC, 2003, ISBN 0-8493-1466-6.
- [5] Larry E. Erickson, J. Robinson, Brase, J.Cutsor. « Solar Powered Charging Infrastructure for Electric Vehicles a Sustainable Development », CRC Press, 2017, ISBN 13: 978-1-4987-3156-0.
- [6] HOUACINE Karima. « Commande Neuro-Floue D'une Machine Asynchrone Dans Une Chaîne De Propulsion D'un Véhicule Électrique », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 5 juin 2016.
- [7] Coralie Otjacques, Fanny Durbut, Dimytroula Gialetzis. « La voiture électrique, une alternative », Haute Ecole Libre de Bruxelles – HELB Ilya Prigogine – Ecologie Sociale, 2010–2011.
- [8] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric- and Fuel Cell Vehicles », CRC press, USA, 2005.
- [9] DELPART Sébastien. « Evaluation De Stratégies De Commande Pour Véhicule Hybrides Parallèles », Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 2002.
- [10] AMROUCHE Bissam. « Étude et commande des véhicules hybrides parallèles », Mémoire de fin d'études, Université A.MIRA Bejaïa, Juin 2013.
- [11] MEDDAH Salem. « Modélisation et commande d'un véhicule électrique à piles à combustible », diplôme de Magister, Université des Sciences et la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [12] WEI LIU. « Introduction to Hybrid Vehicle system modeling and control », USA, 2013, ISBN 978-1-118-30840-0.
- [13] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric- and Fuel Cell Vehicles », CRC press, USA, 2005.
- [14] James Larminie, John Lowry. « Electric Vehicle Technology Explained », John Wiley, England, 2003, ISBN 0-470-85163-5.
- [15] Nicolas Romani. « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007.

- [16] Allen Fuhs. « Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation », CRC Press LLC, USA, 2009, ISBN-13: 978-1-4200-7534-2.
- [17] Hong Tu Luu. « Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie », Thèse de doctorat, l'Université d'Évry -Val- d'Essonne, juin 2011.
- [18] C.C. Chan, K. T. Chau. « Modern Electric Vehicle Technology », Oxford University Press Inc., New York, 2001, ISBN: 0-19-850416-0.
- [19] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric- and Fuel Cell Vehicles », CRC press, USA, 2005.
- [20] Seref Soylu. « Electric Vehicles- Modelling and Simulations- Croatia, 2011, p. cm: 978-953-307-477-1.
- [21] James Larminie, John Lowry. « Electric Vehicle Technology Explained », John Wiley, England, 2012, ISBN 978-1-119-94273-3.
- [22] Omar Trigut. « Méthode de gestion énergétique d'un véhicule électrique basée sur L'estimation en ligne de la masse et de coefficient de résistance au roulement », diplôme de Magister, L'université du Québec à Trois-Rivières, Mai 2017.
- [23] BENARIBA Hassan. « Contribution à la commande d'un véhicule électrique », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen, 06 Décembre 2018.
- [24] Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. « Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle », Department of Electrical Engineering Amirkabir University of Technology Tehran, Iran, 2010.
- [25] James Larminie, John Lowry. « Electric Vehicle Technology Explained », John Wiley, England, 2012, ISBN 978-1-119-94273-3.
- [26] Article: « Design and Development of Small Electric Vehicle using MATLAB/Simulink », International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 24– No.6, June 2011.
- [27] K. T. Chau. « Electric Vehicle Machines and Drives Design, Analysis and Application », The University of Hong Kong, Singapore Pte. Ltd, 2015, IEEE press, ISBN 978-1-118-75252-4.
- [28] Matthew Scarpino. « **Motor** for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines », December 2015, ISBN-13: 978-0-13-403283-2.
- [29] Mr. BOUCHA ABDELLAH. « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué », diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [30] M. Mohamed Arhoujdam, « Mise en œuvre d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu », Mémoire de projet fin d'études, Université Mohamed V- Soussi, 2012/2013.

- [31] K. T. Chau. « Electric Vehicle Machines and Drives Design, Analysis and Application », The University of Hong Kong, Singapore Pte. Ltd, 2015, IEEE press, ISBN 978-1-118-75252-4.
- [32] Ali Emadi. « Advanced Electric Drive Vehicles », CRC Press LLC, Canada, 2015, ISBN : 978-1-4665-9770-9
- [33] Ahmed Boucherit. « Conception d'un convertisseur de Puissance pour les véhicules électriques multi-sources », Thèse de doctorat, L'université de technologie de Belfort Montbéliard, décembre 2011.
- [34] James Larminie, John Lowry. « Electric Vehicle Technology Explained », John Wiley, England, 2012, ISBN 978-1-119-94273-3.
- [35] John G. Hayes, G. Abas Goodarzi « Electric Powertrain Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles », John Wiley, USA, 2018, ISBN 9781119063667

**الملخص:**

تهدف هذه الرسالة إلى دراسة محاكاة المركبات الكهربائية وهيكل الطاقة المختلفة وأنواع محركات التيار المستمر المستخدمة ، وبعد التذكير بأنواع السيارات الكهربائية المختلفة ، نقدم نموذجًا للسيارات الكهربائية ، لذلك قمنا بتكوين مخططات انسيابية تسمح لنا بدراسة تطور القوة وعزم الدوران بالنسبة لسرعة السيارة ومقارنة بالوقت الذي تسمح بهما لإجراء مقارنات بين السكوتر الكهربائي ، السيارة الكهربائية تسلا موديل S 2014 وسيارة نيسان ليف الكهربائية 2015. وأخيرا تحصلنا على نتائج دقيقة للمحاكاة.

**Résumé**

*Ce mémoire a pour objectif l'étude par simulation des véhicules électriques, les différentes structures d'alimentation et le type de moteurs à courant continu utilisés, Après un rappel des différents types des véhicules électriques, nous présentons la modélisation d'un véhicule électrique, ainsi nous avons formé des organigrammes qui nous à permettre l'étude l'évolution de puissance et le couple par rapport à la vitesse du véhicule et par rapport au temps qu'ils permettent faire la comparaisons entre le scooter, le véhicule électrique Tesla modèle S 2014 et le véhicule électrique Nissan Leaf 2015. Enfin nous avons trouvé des résultats exacts pour la simulation.*

**Abstract**

*This thesis aims at the simulation study of electric vehicles, the various power structures and the types of DC motors used. After a reminder of the different types of electric vehicles, we present the modeling of an electric vehicle, so we have formed flowcharts that allow us to study the evolution of power and torque in relation to the speed of the vehicle and compared to the time they allow to make comparisons between the electric scooter, the electric vehicle Tesla model S 2014 and the 2015 Nissan Leaf electric vehicle.*

*Finally, we found exact results for the simulate*