



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES ELECTRONIQUE



N° d'ordre : M/GE/2019

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRONIQUE

Option: Electrotechnique Industrielle

Par

Guessouri Noureddine

Hammadi rachid

Étude comparative entre influence des différent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation

Soutenu le 10 / 07 / 2019 devant le jury composé de :

Président :	Mr. Resfa Abbas	MCB	Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Examineur :	Mr. BENDAHA.M	MAA	Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Examineur :	Mr. Younes Abdellah	MCB	Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Encadreur:	Mr. Chaouch Abdellah	MCA	Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

Nous remercions vivement Monsieur Mr. Resfa Abbas, professeur à la Faculté des Sciences et Technologie Abd El Hamid Ibn Badis, pour avoir accepté de présider le jury, Je remercie également Mr. BENDAHAM Mr. Younes Abdellah pour avoir accepté de siéger en qualité d'examineur. Nous tiens à remercier vivement les professeur CHAOUCH ABDELLAH d'avoir accepté du notre encadrement, Prodigé de précieux conseils et pour nous nous avoir laissé une guider.

Nous avoir énormément appris grâce à leurs compétence technique et à leurs avis toujours sincères. Et je remerciement à tous le personnel du laboratoire pédagogique n° 8 d'électrotechnique. Merci pour son professionnalisme, son engagement, son sens de la gratitude et sa gentillesse.

Dédicace

Je dédie cet humble travail:

A mes chers parents pour les encourager

Les sacrifices que vous avez faits.

À mes frères et sœurs.

À mes chers amis qui se soucient de moi et de tous mes amis.

À tous les membres de ma famille de près ou de loin.

Dans la promotion du Master Électrotechnique industrielle 2018-2019

Pour tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Guessouri Noureddine

Dédicace

Je dédie cet humble travail:

A mes chers parents pour les encourager

Les sacrifices que vous avez faits.

À mes frères et sœurs.

À mes chers amis qui se soucient de moi et de tous mes amis.

À tous les membres de ma famille de près ou de loin.

Dans la promotion du Master Électrotechnique industrielle 2018-2019

Pour tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Hammadi Rachid

SOMMAIRE

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	3
Nomenclature.....	4
Introduction Générale.....	7
Chapitre 1 : Historique et fonctionnement de véhicule électrique	
I.1 Introduction.....	8
I.2 Historique.....	8
I.3 Véhicules Electriques.....	17
I.3.1 Fonctionnement d'un véhicule électrique.....	17
I.3.2 Architecture d'une chaine de traction d'un VE.....	18
I.4 Description générale de la chaîne de traction.....	20
I.4.1 Le Moteur Electrique d'Entrainement.....	21
I.4.1.1 Moteur à courant continu à excitation séparée (MCCES).....	22
I.4.1.2 Moteurs à courant continu à aimant permanent (MCCAP).....	22
I.4.1.3 Moteurs asynchrones.....	23
I.4.1.3.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil.....	23
a. Structure de la machine à double alimentation (MADA).....	24
b. Différents modes de fonctionnement de la MADA.....	24
I.4.1.4 Moteurs synchrones.....	25
a. Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....	26
b. Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	26
I.4.1.5 Moteur à réluctance variable (MRV).....	26

I.4.2	Convertisseur statique.....	27
I.4.2.1	Les redresseurs (AC-DC).....	28
I.4.2.1	Les hacheurs (DC-DC).....	28
I.4.2.1	Les onduleurs (DC-AC).....	28
I.4.3	Le type de véhicule électrique.....	29
I.4.3.1	Véhicule électrique monomoteur (machine à courant continu).....	29
I.4.3.2	Véhicule électrique bimoteur (machine à courant alternatif).....	29
I.4.4	Batterie.....	30
I.5	Structure du véhicule électrique.....	34
I.5.1	Critères de choix des roues motrices.....	34
I.5.2	Critères de choix des roues libres.....	35
I.5.3	Choix des actionneurs.....	35
I.6	Conclusion.....	35
Chapitre 2 : Modèle dynamique du véhicule électrique		
II.1	Introduction.....	36
II.2	Modélisation dynamique du véhicule.....	36
II.2.1	Contraintes dynamiques sur le véhicule.....	36
a)	Contraintes d'accélération « accélération et freinage »	36
b)	Contrainte de vitesse maximale.....	36
c)	Contrainte de non-glissement.....	37
d)	Force d'entraînement.....	37
II.2.2	Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale.....	37
II.2.3	Couple résistant déplacement.....	38
II.2.4	Roulement uniforme sur sol plat.....	39
a)	Résistance au roulement R_r	39

b) Résistance aérodynamique Ra.....	39
II.2.5 Franchissement de pente.....	40
II.2.6 Franchissement d'obstacles.....	41
II.2.7 Accélération.....	41
II.2.8 Résistance au glissement (adhérence).....	41
II.3 Batterie.....	42
II.4 Modéliser un véhicule électrique dans Matlab / Simulink.....	43
II.4.1 Dynamique du véhicule.....	45
II.4.2 Efficacité de la transmission.....	46
II.5 Conclusion.....	47

Chapitre 3 : Résultats de simulation

III.1 Introduction.....	48
III.2 Méthodologie de simulation.....	48
III.3 Les résultats de simulation.....	49
1. Influence de cycle de conduction.....	49
2. Influence de la masse du véhicule.....	50
3. Influence d'ascension (l'inclinaison de la route).....	51
i. La route droite ($\alpha=0$).....	51
ii. La route montante ($\alpha=30^\circ$).....	51
iii. La route est descendante ($\alpha=-30^\circ$).....	52
III.4 Choix du type batterie.....	52
III.5 Conclusion.....	53
Conclusion Générale	54
Bibliographie.....	56

Liste des figures

Chapitre 1 : Historique et fonctionnement de véhicule électrique

Figure (I-1): véhicule modèle Toyota 328 rav4-ev 2002

Figure (I-2): schéma simplifié d'une voiture modèle Toyota 328 rav4-ev 2002

Figure (I-3): LA TESLA MODELE S

Figure (I-4): spécification du tesla modèle S

Figure (I-5): Tesla model X

Figure (I-6): Modèles abandonnés

Figure (I-7): Modèles en productions

Figure (I-8): fonctionnement d'un véhicule électrique

Figure (I-9): Caractéristiques force – vitesse du véhicule thermique à 5 rapports et du véhicule électrique à rapport fixe

Figure (I-10): Chaîne de traction électrique

Figure (I-11): Schéma synoptique d'une chaîne de traction

Figure (I-12): Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.

Figure (I-13): Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE [31].

Figure (I-14): Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Figure (I-15): Diagramme représentatif de l'entraînement de VE à l'aide de la MADA

Figure (I-16): Architecture d'un VE mono moteur.

Figure (I-17): Architecture bi moteurs

Figure (I-18): Architecture détaillé d'un VE bi moteurs avec un MAS et deux roues motrices

Figure (I-19): Comparatif des différents types des batteries pour VEs

Figure (I-20): Présentation du véhicule

Chapitre 2 : Modèle dynamique du véhicule électrique

Figure (II-1) : Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α .

Figure (II-2) Franchissement de pente.

Figure (II-3) Franchissement d'obstacles.

Figure (II-4) : circuit équivalent de la batterie. Source, Matlab.

Figure (II-5) : Modèle de chargement et de déchargement dans la source [62].

Figure (II-6) : Vue générale du modèle du véhicule électrique à Simulink

Figure (II-7) : Détail de la dynamique du véhicule électrique dans Simulink

Figure (II-8) : Détail des blocs d'efficacité de la transmission dans Simulink

Chapitre 3 : Résultats de simulation

Figure (III-1) : choix de cycle

Figure (III-2) : choix de masse

Figure (III-3) : choix d'inclinaison

Figure (III-4) : la variation de la vitesse en fonction de temps

Figure (III-5) : la puissance qui nécessite que la voiture se déplace à une certaine vitesse

Figure (III-6) : la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une masse de 1605kg

Figure (III-7) : la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une masse de 2605kg

Figure (III-8) : la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une angle de 0°

Figure (III-9) : la variation de puissance fournie par la batterie avec une angle de 30°

Figure (III-10) : la variation de puissance fournie par la batterie avec une angle de -30°

Figure (III-11) : Décharge de batterie Acide-plomb en fonction de distance

Figure (III-12) : Décharge de batterie Lithium-Ion en fonction de distance

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Historique et fonctionnement de véhicule électrique

Tableau (I-1) : Comparative entre différent model tesla S

Tableau (I-2): Choix de la motorisation en fonction de différents critères+ : avantage;
0 neutre; - : désavantage [42].

Tableau (I-3): Réactions aux électrodes de systèmes électrochimiques en charge et en décharge

Tableau (I-4): Caractéristiques de différents types de batteries de traction [49], [50].

Tableau (I-5): Variations du poids en fonction de la puissance du moteur de traction de la voiture électrique

Chapitre 2 : Modèle dynamique du véhicule électrique

Tableau (II-1) ; Quelques valeurs de coefficient de friction μ

Chapitre 3 : Résultats de simulation

Tableau (III-1) : comparaison entre les deux batteries Acide-plomb et Lithium-ion

Nomenclature

A. Principales abréviations :

VE : Véhicule électrique.

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

MSAP : Moteur synchrone à aimants permanents.

MSRB : Moteur synchrone à rotor bobiné.

MRV : Moteur à réluctance variable.

MCCES: Moteur à courant continu à excitation séparée (MCCES)

MCCAP : moteur à courant continu à aimant permanent.

MI : moteur à induction.

B. Principales notations :

Cd : Un coefficient de traînée.

C_{r roue} : Le couple résistant à la roue

C_r : Résistance au roulement.

C_x : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement).

f_r : Fréquence.

F : Force d'entraînement

γ : Accélération tangentielle du véhicule

V: Vitesse du véhicule en [m/s].

V_x : Vitesse instantanée du véhicule suivant l'axe Xv.

V_y : Vitesse instantanée du véhicule suivant l'axe Yv.

V_v: est la vitesse du vent en [m/s].

ω : Vitesse angulaire du véhicule.

M : Masse de véhicule en [Kg].

ρ : Rayon du virage.

μ : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route

R_r : Résistance au roulement.

R_a : Résistance aérodynamique.

R_p : Résistance due à la pente.

r : rayon d'une roue.

f_r : Coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement

ρ_a : désigne la masse volumique de l'air ($\rho=1.293 \text{ kg/m}^3$).

S : est la surface frontale du véhicule en [m²].

g : l'accélération de pesanteur.

φ : Angle de la pente.

C_{acc} : Couple nécessaire à l'accélération

R_g : Résistance au glissement (adhérence).

R_i : Résistance inertielle

E_{Batt} : tension non linéaire (V).

E_0 : tension constante (V)

$Exp(s)$: Dynamique de la zone exponentielle (V)

$Sel(s)$: Représente le mode batterie.

$Sel(s)$: 0 pendant la décharge de la batterie.

$Sel(s)$: 1 pendant le chargement de la batterie.

K : constante de polarisation (Ah⁻¹) ou résistance de polarisation (ohms)

i * : dynamique de la courante basse fréquence(A)

i : courant de la batterie (A)

it : Capacité extraite (Ah)

Q : capacité maximale de la batterie (Ah)

A : tension exponentielle (V)

B : capacité exponentielle (Ah) ⁻¹

Introduction générale

Dans le contexte énergétique actuel (Pénurie et pollution des énergies fossiles), l'automobile occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores (acoustiques) et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation du carburant en constante augmentation, impliquant de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie. Le véhicule électrique (VE) est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs d'automobiles et les organismes de recherche, pour essayer de remplacer peu à peu les véhicules thermique dans les centres villes où le facteur de pollution est notamment important, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique [1].

Dans ce contexte nous subdivisons notre mémoire en trois chapitres:

Le premier chapitre décrit l'histoire et le fonctionnement du véhicule électrique

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique du véhicule électrique

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation

Enfin nous terminerons par une conclusion générale et nos perspectives.

Chapitre 1 : Historique et fonctionnement de véhicule électrique

I.1 Introduction :

Au début du 20^{ème} siècle la voiture à essence connaît un succès important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. C'est pourquoi jusqu'à nos jours la voiture à essence s'est développée. La voiture électrique ne fait donc pas encore partie de notre entourage mais elle devient de plus en plus sollicitée grâce à la constante hausse du pétrole et la médiatisation de la réduction du rejet de CO₂. Après le grenelle de l'environnement et avant une crise pétrolière, de nombreuses entreprises et d'écologistes veulent développer la voiture électrique au niveau de l'autonomie des batteries et de l'utilisation maximale des énergies propres. Afin que celle-ci deviennent réellement plus propre et plus avantageuse que les voitures à essence. Dans ce chapitre nous présentons une introduction générale sur les véhicules électriques les différents éléments constituent un véhicule électrique et les architectures/configurations, on commence par un bref historique et les progrès actuels sur les VEs, par la suite on présente l'architecture choisi pour notre réalisation [1].

I.2 Historique :

La voiture électrique sera à partir des années 2000, une innovation qui ne rencontrera pas son public. Les ventes ne décollent pas vraiment et restent cloisonnées à des marchés de niche. Les constructeurs ne croient plus aux voitures 100% électriques.

Ainsi, en 2002, Daimler Chrysler et G.M. souhaitent faire annuler la loi californienne Zero Emission Véhicule (ZEV) de 1990. Ils sont soutenus par l'administration Bush. Toyota a présenté son RAV4 EV, conçu en partenariat avec Tesla. Celui-ci est le premier modèle tout électrique commercialisé par le géant japonais [2]. Le Rav4-EV dispose d'un moteur de traction triphasé alternatif couplé à un essieu à entraînement différentiel et direct. Les mouvements de direction avant et arrière sont contrôlés électroniquement sans l'utilisation d'une transmission et le Rav4-EV est un véhicule de taille normale capable de circuler sur une autoroute avec une vitesse régie par 78 mph. Ce véhicule dispose également de deux niveaux de régénération électronique, un bouton «EB» (électronique). Freinage) sur la colonne de changement de vitesse et une position «B» (freinage) sur le mécanisme de changement de vitesse. Le véhicule composants électroniques ont été fabriqués par TMC (Toyota Motor Corporation) et leurs des filiales [3].

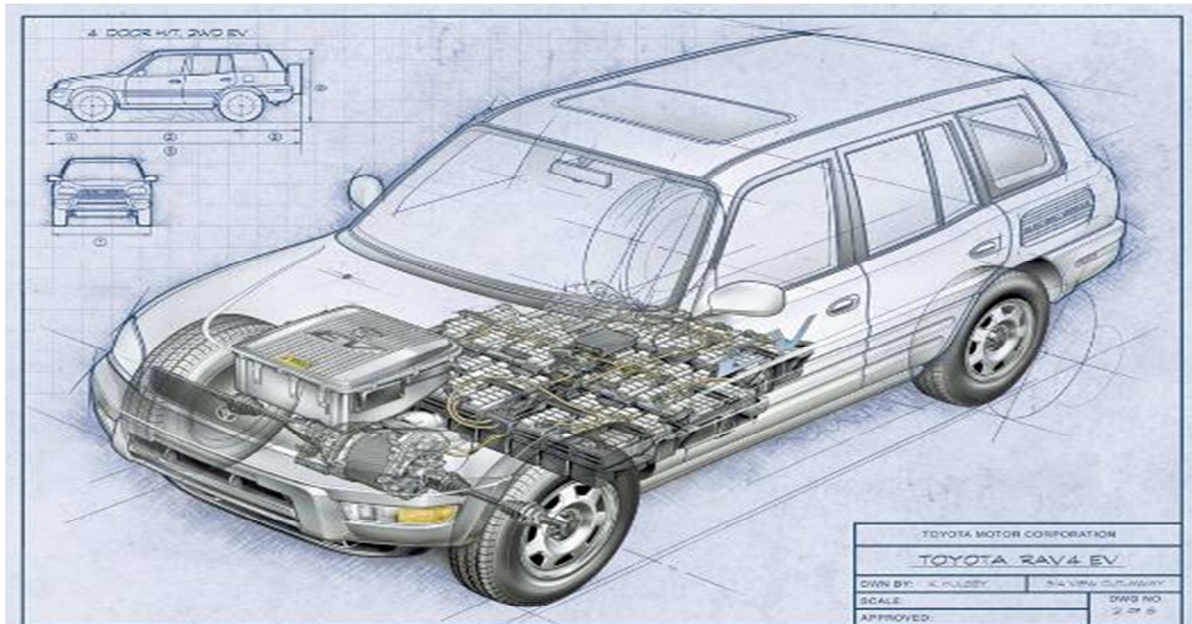


Figure (I-1) : véhicule modèle Toyota 328 rav4-ev 2002

En France, Renault lance en 2003 un Kangoo Elect'road, véhicule hybride. La production sera abandonnée après 500 exemplaires vendus. Outre atlantique, c'est la fin de la voiture électrique. GM reprend tous les modèles de voiture électrique commercialisés pour les détruire. Ces véhicules électriques étaient malheureusement proposés en leasing, une méthode de commercialisation courante des véhicules aux Etats-Unis. Malgré une importante

mobilisation, les conducteurs de voitures électriques ne sont pas parvenus à conserver leurs véhicules. C'est la fin des projets de voiture individuelle totalement électrique [4].

En 2003-2004, c'est la fin de l'EV1. GM va récupérer un par un tous les véhicules pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.

En 2006, Chris Paine sort un documentaire intitulé *Who Killed the Electric Car?* Qui analyse la montée en puissance et la mort de la voiture électrique à la fin des années 90. Il s'attarde principalement à EV1 de GM.

En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.

En 2008, la société de voitures électriques Tesla Motors (maintenant Tesla, Inc.) est commencé de commercialisé La Tesla Roadster.

La Tesla Roadster est une voiture de sport à batterie électrique (BEV), basée sur le châssis Lotus Elise, qui a été produite en Californie de 2008 à 2012. Le Roadster a été la première autoroute autoroutière de série entièrement électrique à utiliser des cellules de batterie au lithium-ion et la première voiture entièrement électrique de série à parcourir plus de 320 km par charge [5]. Il est alimenté par un moteur asynchrone à 4 pôles d'une puissance de 185 kW [6], Son couple maximal de 270 N.m est immédiatement disponible et reste constant de 0 à 6 000 tr / min [7].

À partir de septembre 2008, Tesla a choisi Borg Warner pour la fabrication de boîtes de vitesses et a commencé à équiper tous les Roadsters d'une boîte de vitesses à engrenages fixes à une vitesse (8.2752: 1) d'un mécanisme de cliquet de stationnement et d'une pompe de lubrification mécanique [8].

Le temps d'accélération du Roadster entre 0 et 97 km / h (0 et 60 mi / h) est de 3,9 secondes pour le modèle Standard et de 3,7 secondes pour le V2.5 Sport 2010, ce que MotorTrend a confirmé lors des premiers essais instrumentés indépendants du Sport. Le magazine a également enregistré un temps de 12,6 secondes à une vitesse de 165,1 km / h (102,6 mi / h) [9]. Tesla a déclaré que la vitesse maximale est limitée électroniquement à 201 km / h (125 mph). Tesla affirme avoir un poids de 1 305 kg (2 877 lb), un coefficient de traînée de $C_d = 0,35-0,36$ [10]. et une résistance au roulement de $C_r = 0,011$ [11].

Tesla fait référence au bloc de batterie du Roadster en tant que système de stockage d'énergie ou ESS. L'ESS de 450 kg (992 lb) contient 6 831 cellules à ions lithium disposées en 11 "feuilles" connectées en série; chaque feuille contient 9 "briques" connectées en série; chaque "brique" contient 69 cellules connectées en parallèle (11S 9S 69P). Les cellules sont du facteur de forme 18650 que l'on trouve couramment dans les batteries de portables. Des

sources ne sont pas d'accord sur le type exact de cellules Li-Ion - GreenCar indique que l'oxyde de lithium et de cobalt (LiCo) [12].

	Tesla Roadster	Tesla Roadster ("P1") 1.5 Standard	Tesla Roadster 2.0	Tesla Roadster 2.5 base	Tesla Roadster 2.5 Spor	Tesla Roadster R80 (3.0) upgrade
Introduit	2006	2007	2009	2010	2010	2014
Transmission	2 vitesses avant + arrière (en inversant le moteur) 1ère vitesse: 4.20: 1 2ème vitesse: 2,17: 1 1Réversez en inversant le moteur (vitesse limitée électroniquement) Transmission finale: 3,41: 1	Rapport fixe Borg Warner à une seule vitesse (rapport 8.27: 1)				
Puissance	185 kW	185 kW	215 kW	215 kW	215 kW	215 kW
Couple	240Nm	370Nm	380Nm	380Nm	400Nm	380 ou 400 Nm
Batterie	53kWh	53kWh	53kWh	53kWh	53kWh	80kWh
Intervalle	320 à 400 km	372 km	393 km	393 km	393 km	640 km
Cd	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.31
0-100 km/h	5,7 secondes	4.0 sec	3.9 sec	3.9 sec	3.7 sec	3.7 sec
Poids à vide (kg) / (lb) Tous les fluides, 50% de carburant		1,305 kg	1,237 kg	1,237 kg	1,237 kg	1,237 kg
Vitesse maximal	plus de 201 km/h	201 km/h	201 km/h	201 km/h	201 km/h	201 km/h

Tableau (I-1) : Comparative entre différent model tesla S

En 22 juin 2012, Tesla introduite **La Tesla Model S** qui été une voiture entièrement électrique à cinq portes relevable [13].

Il a été conçu par Franz Von Holzhausen, qui travaillait auparavant pour Mazda North American Operations [14].

Tesla a déclaré qu'après trois ans (en juin 2015), les voitures de la Model S avaient parcouru plus d'1 milliard de kilomètres (1,6 milliard de km), la première voiture électrique rechargeable à atteindre ce total [15].



Figure (I-3) : LA TESLA MODELE S

Le modèle Tesla Model S Performance 2012 dispose d'un moteur électrique asynchrone à l'arrière triphasé, avec une puissance de 310 kW et un poids de 601 N.m avec rotor en cuivre. Le modèle de base utilise un moteur de 270 kW et de 441 Nm. La société a revendiqué un coefficient de traînée de $C_d = 0,24$, inférieur à celui de tout autre wagon de série lors de sa mise en circulation. Des mesures indépendantes effectuées par Car And Driver en mai 2014 ont confirmé les affirmations de Tesla en confirmant exactement un coefficient de traînée de $C_d = 0,24$ [16].

Le modèle S P90D a une vitesse maximale de 249 km / h et peut accélérer de 0 à 97 km / h en 2,8 secondes, malgré la puissance moteur totale plus faible, en partie à cause de l'amélioration de la traction du groupe motopulseur à traction intégrale [17].

En 2012, la plage d'EPA pour le modèle de bloc-piles de 60 kWh était de 335 km et celle de 85 kWh de 425 km. Le bloc-piles de 85 kWh pesait 540 kg [meilleure source nécessaire] et contient 7 104 cellules de batterie lithium-ion dans 16 modules [18].

Historique et fonctionnement de véhicule électrique

	40 kWh	60 kWh	70 kWh		75 kWh	85 kWh					90 kWh			60 kWh	
	Propulsion (40)	Propulsion (60)	Propulsion (70)	T. Intégrale (70D)	Propulsion (75)	Propulsion (85)	T. Intégrale (85D)	Propulsion (P85)	T. Intégrale (P85D)	Ludicrous (P85D)	T. Intégrale (90D)	Ludicrous (P90D)	T. Intégrale (P90D)	Propulsion (60)	T. Intégrale (60D)
Capacité utilisable batterie	58,5 kWh bridée à 40	58,5 kWh	69 kWh	69 kWh	72,5 kWh	77,5 kWh	77,5 kWh	77,5 kWh	77,5 kWh	77,5 kWh	82 kWh	82 kWh	82 kWh	72,5 kWh bridée à 62	72,5 kWh bridée à 62
Autonomie NEDC	260 km	375 km	375 km	442 km	480 km	502 km	528 km	502 km	480 km	480 km	557 km	509 km	509 km	400 km	408 km
Autonomie EPA	225 km	335 km	370 km	386 km	401 km	426 km	435 km	426 km	407 km	407 km	473 km	435 km	435 km	338 km	351 km
Autonomie Autoroute	170 km	250 km	280 km	290 km	290 km	320 km	330 km	320 km	310 km	310 km	350 km	330 km	330 km	260 km	270 km
Masse	1 850 kg	1 950 kg	2 000 kg	2 100 kg	2 000 kg	2 100 kg	2 200 kg	2 200 kg	2 250 kg	2 250 kg	2 200 kg	2 250 kg	2 250 kg	2 000 kg	2 100 kg
Puissance max.	235 ch	302 ch	320 ch	332 ch	320 ch	367 ch	422 ch	420 ch	469 ch	539 ch	422 ch	539 ch	469 ch	320 ch	332 ch
Couple max.	430	430	n/a	490	440	n/a	490	600	930	n/a	660	967	967	440	525
0-100 km/h	6,5 s	5,9 s	5,5 s	5,4 s	4,6 s	5,6 s	4,4 s	4,4 s	3,3 s	3,0 s	4,4 s	3,0 s	3,3 s	5,8 s	5,4 s
Vitesse max (km/h)	177	196	225	225	225	225	250	210	250	250	250	250	250	210	210
Accès Superchargers	Non	En option 2 000 €	Oui												
Disponibilité	juin 2012 avril 2013	juin 2012 avril 2015	juillet 2015 juin 2016	avril 2015 juin 2016	mai 2016 septembre 2017	juin 2012 janvier 2016	nov. 2014 janvier 2016	juin 2012 nov. 2014	nov. 2014 janvier 2016	août 2015 janvier 2016	août 2015 juin 2017	mars 2016 août 2016	mars 2016 décembre 2016	juin 2016 avril 2017	juin 2016 avril 2017

Figure (I-4) : spécification du tesla modèle S

Depuis septembre 2015, Tesla a commencé de commercialisée La Tesla Model X



Figure (I-5) : Tesla model X

Le véhicule est développé sur la même plateforme que la berline Model S et est fabriquée dans la même usine à Fremont, en Californie. Elle peut accueillir jusqu'à sept personnes, sur trois rangées de sièges.

Les deux tableaux ci-dessous présentent les caractéristiques techniques de chaque modèle de la gamme de Tesla Model X.

Le coefficient de traînée du véhicule est de 0,24, un record pour un SUV [19], ce qui contribue à l'autonomie.

Tous les Model X produits depuis sa sortie sont équipés pour accéder aux super-charger.

Pour l'autonomie, trois estimations différentes sont données. En effet, elles résultent de différents tests ou calculs :

- Autonomie NEDC : nouveau cycle européen de conduite, ce test de consommation est très optimiste et non représentatif d'une utilisation normale sur route. Il revient à faire rouler la voiture à environ 70 km/h dans des conditions normales.
- Autonomie EPA : l'Environmental a mis en place aux États-Unis un test beaucoup plus réaliste. Il revient à faire rouler la voiture à environ 100 km/h dans les conditions de circulation les plus fréquentes aux États-Unis.
- Autonomie Autoroute : estimation de l'autonomie en roulant sur voies rapides à 130 km/h dans des conditions réalistes avec une famille à bord du véhicule.

	70 kWh	90 kWh		60 kWh	
	Tr. Intégrale (70D)	Tr. Intégrale (90D)	Ludicrous (P90D)	Tr. Intégrale (P90D)	Tr. Intégrale (60D)
Capacité utilisable batterie	69 kWh	82 kWh		72,5 kWh bridée à 62	
Autonomie NEDC		489 km	467 km	467 km	355 km
Autonomie EPA	354 km	414 km	402 km	402 km	322 km
Autonomie Autoroute	250 km	320 km	300 km	300 km	230 km
Poids	2 250 kg	2 400 kg	2 450 kg	2 450 kg	2 300 kg
Puissance max.	332 ch	422 ch	539 ch	469 ch	332 ch
Couple max.	490	660	967	967	525
0–100 km/h	6,2 s	5,0 s	3,4 s	3,9 s	6,2 s
Vitesse max (km/h)	210	250	250	250	210
Disponibilité	octobre 2015 avril 2016	octobre 2015 juin 2017	octobre 2015 août 2016	octobre 2015 décembre 2016	juillet 2016 octobre 2016

Figure (I-6) : Modèles abandonnés

	75 kWh	100 kWh	
	Tr. Intégrale (75D)	Tr. Intégrale (100D)	Ludicrous (P100D)
Capacité utilisable batterie	72,5 kWh	98 kWh	
Autonomie NEDC	417 km	565 km	542 km
Autonomie EPA	381 km	475 km	465 km
Autonomie Autoroute	260 km	380 km	360 km
Poids	2 300 kg	2 450 kg	2 500 kg
Puissance max.	332 ch	422 ch	598 ch
Couple max. (Nm)	525	660	1 074
0-100 km/h	5,2 s	4,9 s	3,1 s
Vitesse max (km/h)	210	250	250
Disponibilité	avril 2016	janvier 2017	août 2016

Figure (I-7) : Modèles en productions

Les batteries de la Tesla Model X sont composées de milliers de cellules Lithium-Ion de type 18650 fournies par Panasonic depuis le début de sa commercialisation. La batterie se trouve dans le plancher, cela permet d'économiser de l'espace intérieur et d'augmenter le volume du coffre. Pour protéger sa batterie, la Model X possède une plaque de blindage en aluminium de 6 mm d'épaisseur.

Les cellules pèsent entre 47 et 50 grammes et ont toutes une tension nominale de 3,6 V. La composition du pack batterie de la Model X diffère selon la capacité, de plus la capacité des cellules de base a aussi évolué au fil des avancées en la matière. Ainsi, on remarque deux types d'évolutions possibles dans la capacité des batteries :

- Amélioration des cellules : le passage de batterie de 70 à 75 kWh, s'explique par une modification de la chimie des cellules qui permet une augmentation de la capacité qui passe de 3,2 à environ 3,35 Ah. Cela est dû à l'introduction de silicone dans le graphique de l'anode de la cellule.
- Amélioration de l'organisation du pack batterie : le passage de batterie de 90 à 100 kWh s'explique entre autres par une modification du rangement des cellules dans le pack. Le système de refroidissement a été entièrement revu pour réduire ses besoins en place et donc intégrer plus de cellules dans le pack [20].

C'est le 27 juillet 2016 que Tesla annonce que le design final de la Model 3 a été arrêté, plus aucun changement important ne seront donc appliqué à partir de cette date.

En octobre 2016, on apprend que la Model 3 bénéficiera, au même titre que les Model S et X, de l'équipement permettant la conduite totalement autonome.

Le 28 juillet 2017, lors de la présentation des trente premières voitures livrées à ses employés, Elon Musk a déclaré que Tesla comptait plus de 500 000 réservations pour la Model 3. Les livraisons au grand-public sont programmées pour débiter à l'automne 2017.

Début août 2017, on dénombre plus de 60 000 annulations de commande, les raisons seraient simplement comptables du côté de Tesla, cependant la Model 3 continue de séduire, près de 1 800 précommandes sont enregistrées chaque jour d'après Elon Musk.

La Model 3 fait sa première apparition publique en Europe au Salon international de l'automobile de Genève 2018 [21], sur le stand de la société Caresoft. Finalement, après une montée en production tardive, la Model 3 devient disponible en France à la commande le 4 janvier pour des livraisons premier semestre 2019. Le 22 Janvier 2018, l'autorité néerlandaise de la sécurité routière autorise la Model 3 à circuler en Europe

	Propulsion Standard Battery	Propulsion Standard Battery Plus	Propulsion Mid Range Battery	Propulsion Long Range Battery	Tr. intégrale Long Range Battery	Performance Long Range Battery
Autonomie WLTP	~ 400 km	~ 430 km	~ 470 km	~ 580 km	560 km	530 km
Autonomie EPA	355 km	385 km	425 km	525 km	500 km	500 km
Autonomie Autoroute	280 km	310 km	340 km	400 km	380 km	360 km
Poids	1645 kg	1645 kg	1 672 kg	1 726 kg	1 847 kg	1 847 kg
Moteur	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch) 147 kW (200 ch)	202 kW (275 ch) 147 kW (200 ch)
Puissance maximale	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	202 kW (275 ch)	188 kW (256 ch) 147 kW (200 ch) Total : 258 kW (351 ch)	202 kW (275 ch) 147 kW (200 ch) Total : 340 kW (462 ch)
Couple maximum			410 Nm	410 Nm	527 Nm	639 Nm
0-100 km/h	5,8 s	5,5 s	5,4 s	5,2 s	4,7 s	3,5 s
Vitesse max (km/h)	210	225	225	225	235	260
Accès Superchargers	Oui, paiement selon la recharge					
Disponibilité						
États-Unis	mars 2019	mars 2019	novembre 2018	juillet 2017	juillet 2018	juillet 2018
Canada	mars 2019	mars 2019	novembre 2018	mai 2018	juillet 2018	juillet 2018
Europe					février 2019	février 2019
Chine					février 2019	février 2019

Les batteries de la Tesla Model 3 sont composées de milliers de cellules Lithium-Ion de type 21700 produites à la Tesla Gigafactory par Panasonic. Le pack batterie de la Model 3 se trouve comme la Model S dans le plancher, cependant à la différence de celui de la Model S celui-ci n'a pas été conçu pour permettre un échange automatisé.

Chaque cellule a une tension nominale de 3,6 V et pèse environ 67 g, cependant la composition du pack batterie de la Model 3 diffère selon la capacité, en outre celui-ci bénéficie d'une garantie de huit ans ou 160 000 km (100 000 miles).

I.3 Véhicules Electriques :

I.3.1 Fonctionnement d'un véhicule électrique :

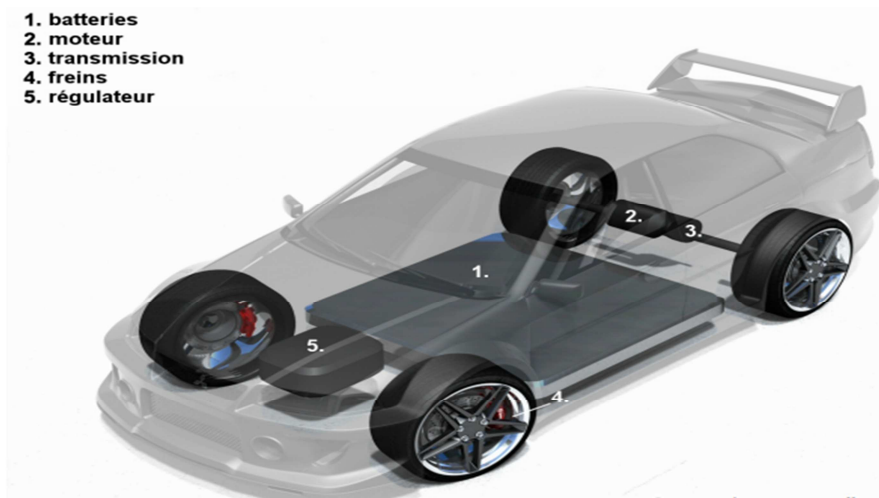


Figure (I-8) : fonctionnement d'un véhicule électrique

La voiture électrique est apparue très tôt dans l'histoire de l'automobile, les premières datent des années 1830 (la date exacte est inconnue). Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la plupart des automobiles étaient électriques. En plus d'être écologiques, elles étaient plus performantes et plus silencieuses que leurs rivales. Ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que la voiture à essence connaît un succès plus important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique.

Du début à la fin du 20^{ème} siècle, l'évolution de la voiture électrique a été très lente. Seules les quinze ou vingt dernières années ont apporté des progrès réels. Ils concernent principalement le stockage de l'énergie, avec l'apparition sur le commerce des premières batteries au Lithium-Ion. On compte quelques autres évolutions minimales, mais pas de révolution technologique. Concentrons-nous donc plutôt sur le fonctionnement des modèles actuels.

Comme vous pouvez le voir sur le schéma ci-dessus, la constitution d'une voiture électrique moderne est nettement plus simple que celle d'une voiture à essence. La transmission et le moteur sont nettement plus petits et les batteries peuvent être placées de façon à obtenir une répartition idéale des masses. Elles peuvent même être intégrées au châssis, abaissant ainsi le centre de gravité du véhicule et améliorant sa tenue de route. La taille réduite et la simplicité des composants permettent d'imaginer des véhicules extrêmement petits et légers, ce qui est un avantage non négligeable lorsque l'on souhaite économiser de l'énergie. De plus, les moteurs électriques sont particulièrement « culpeux », ce qui veut dire qu'ils délivrent une puissance importante à une fréquence de rotation moindre. Cela permet d'accélérer rapidement lorsque l'on part depuis l'arrêt. Voyons comment ces moteurs transforment une énergie électrique en mouvement [22].

I.3.2 Architecture d'une chaîne de traction d'un VE :

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, comme présentée sur la Figure (I-9) rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses [23].

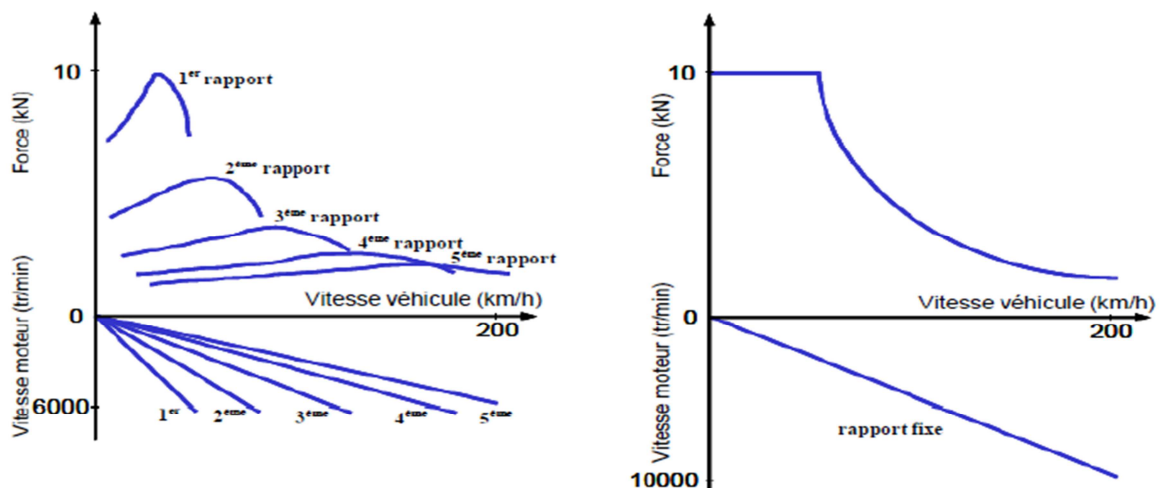


Figure (I-9) : Caractéristiques force – vitesse du véhicule thermique à 5 rapports et du véhicule électrique à rapport fixe

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur

grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la Figure (I-10) [24]

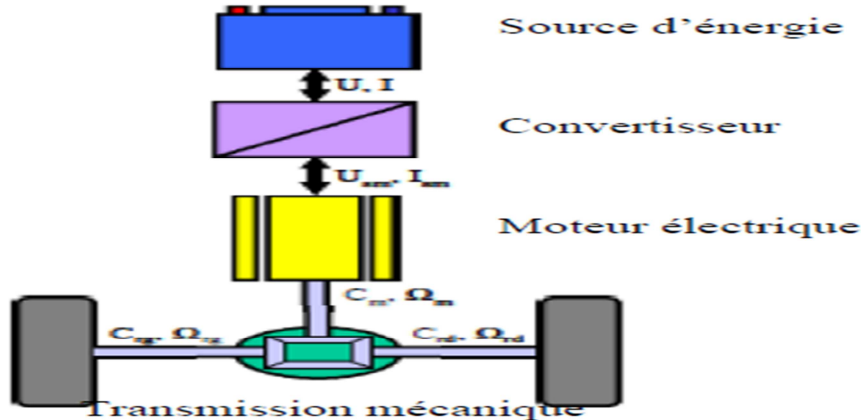


Figure (I-10) : Chaîne de traction électrique

- Système de traction : Ensemble des organes traversés par le flux d'énergie, et qui assurent à un véhicule sa capacité de mouvement. Il est composé d'une chaîne de traction et d'un générateur d'énergie embarquée.
- Chaîne de traction ; Organe du système de traction assurant la transmission mécanique du mouvement. Elle est composée des roues, du différentiel de la transmission ou boîte de vitesse (BV) et d'un moteur convertissant l'énergie sortant du générateur embarqué en énergie mécanique
- Générateur ou source d'énergie embarquée : Organe du système de traction assurant le stockage et l'adaptation de l'énergie. Il est composé d'un système de stockage et d'un système d'adaptation (convertisseur et /ou transformateur).
- Convertisseur d'énergie : Système qui change la nature de l'énergie.
- Transformateur d'énergie : Système qui conserve la nature de l'énergie mais change son typage (boîte de vitesse, convertisseur électrique DC/AC [25]).
- Typage de l'énergie : Caractérise les paramètres d'une énergie de même nature (pour l'électrique : tension, courant, fréquence,...).
- Nature de l'énergie : Caractérise les différentes formes que peut prendre l'énergie (mécanique, électrique ...).

- Un différentiel est un système mécanique qui a pour fonction de distribuer une vitesse de rotation par répartition de l'effort cinématique, de façon adaptative, immédiate et automatique, aux besoins d'un ensemble mécanique.
- Un engrenage est un système mécanique composé de deux roues dentées servant la transmission du mouvement de rotation
- Un réducteur est système d'engrenage dont le rapport de transmission est inférieur à 1, pour augmenter le couple moteur d'une rotation.

Une chaîne de traction se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel).

Son fonctionnement est assez simple : Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) en courant alternatif (si le moteur est de type alternatif) ou en courant continu (si le moteur est de type continu). Le moteur développe sur son arbre un couple moteur, ce qui passe sur les roues. La Figure (I-11) : montre le synoptique d'une chaîne de traction [Hartani, 2007] [26].

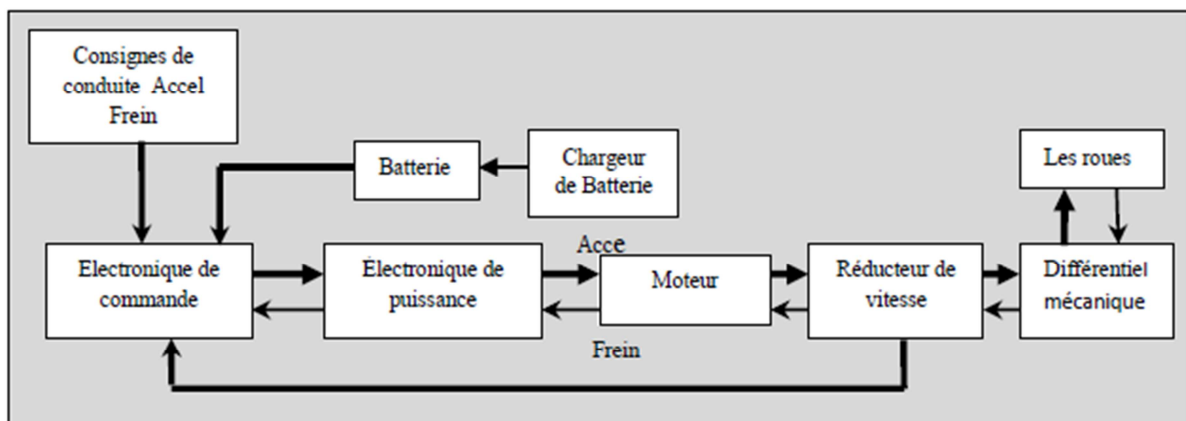


Figure (I-11) : Schéma synoptique d'une chaîne de traction

I.4 Description générale de la chaîne de traction :

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la (Figure (I-12)). Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la

charge à celle du moteur [27]. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique [28].

On s'intéresse ici qu'à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule [29].

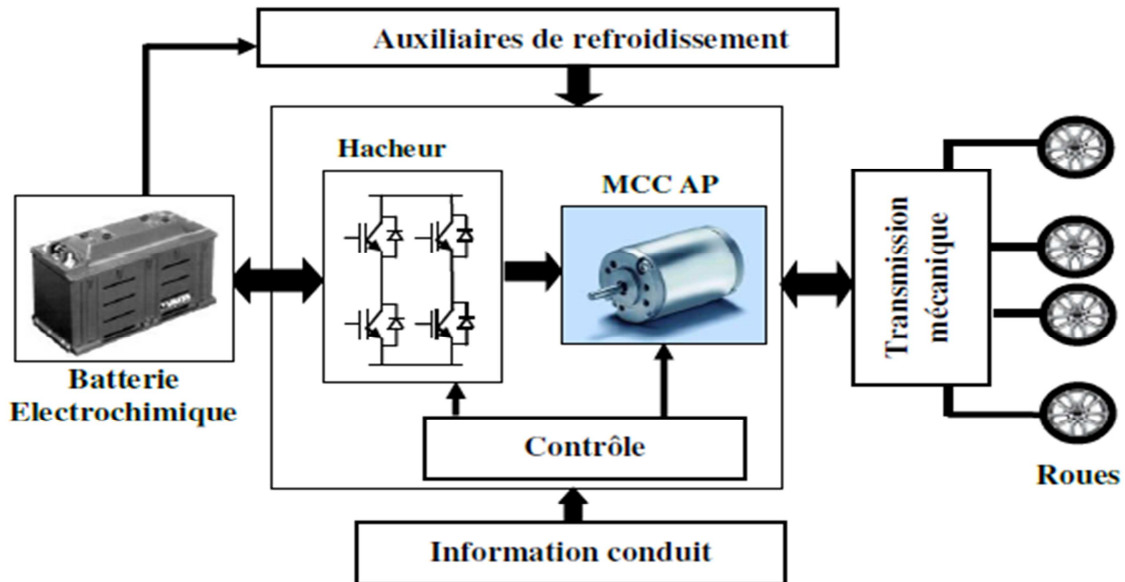


Figure (I-12) : Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.

I.4.1 Le Moteur Electrique d'Entrainement :

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [30].

- Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé),
- Obtenir une vitesse maximale,
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la Figure (I-13) exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse.

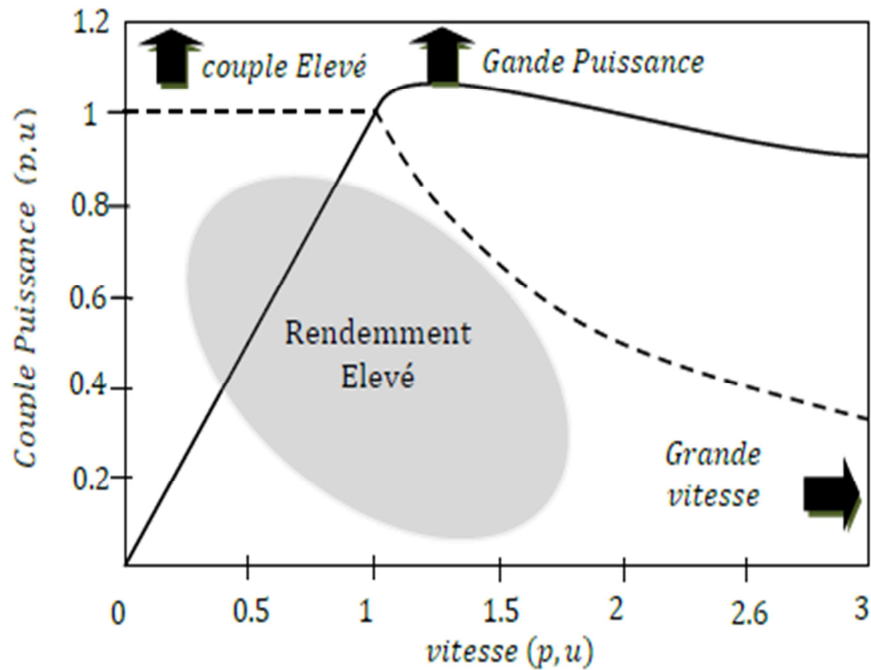


Figure (I-13) : Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE [31].

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entrainements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le Moteur à Courant Continu (MCC), à Induction (MI), Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), à Reluctance Variable (MRV) etc.

En plus des caractéristiques de fonctionnement citées précédemment, d'autres considérations importantes de conception sont à prendre en considération à savoir : coût acceptable et encombrement.

I.4.1.1 Moteur à courant continu à excitation séparée (MCCES) :

Les moteurs à courant continu à excitation séparée, sont commandés par un hacheur de puissance agissant sur l'induit du moteur et un hacheur de plus faible puissance commandant l'excitation ou inducteur. Dans la traction électrique automobile, c'est le système le plus employé. En effet, le moteur de LEROY Sommer [31], qui entraîne la plupart des véhicules électriques en circulation est un moteur à courant continu conçu à partir des modèles destinés à la traction industrielle. L'électronique permet d'optimiser la valeur de consigne du courant d'induit et d'excitation, en fonction de la caractéristique couple/vitesse désirée, grâce à un système de thyristors relativement simple et peu coûteux [32].

I.4.1.2 Moteurs à courant continu à aimant permanent (MCCAP) :

Les moteurs à courant continu à aimant permanent sont actuellement en pleine expansion dans l'industrie. Cette technologie permet d'obtenir des moteurs encore plus légers avec un meilleur

rendement que les précédents. Malheureusement, ces aimants font appel pour leur composition, à des terres rares, dont le coût est très élevé. Ils sont également très sensibles aux montées en température [33].

I.4.1.3 Moteurs asynchrones :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : rotor bobiné, rotor à cage d'écureuil [34]

I.4.1.3.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil :

La machine est constituée d'un stator comportant un bobinage et d'un rotor qui porte la cage cette dernière remplace le bobinage rotorique [35].

La machine asynchrone à rotor bobiné est constituée de deux composants principaux le rotor et le stator, ils sont faits de tôles d'épaisseur très étroite d'acier au silicium pour diminuer les pertes par hystérésis et courant de Foucault. En générale ces tôles sont isolées par oxydation ou par vernis isolant pour les très grosses machines, elles comportent des encoches dans les quelles sont logés des enroulements de fil conducteur, qui peuvent avoir un nombre de phases différent mais le même nombre de paires de pôles.

▪ Stator :

C'est la partie fixe de la machine, il porte à l'intérieur des encoches un bobinage de fils conducteurs triphasés formant p paires de pôles, et il est alimenté par une source de tension ou de courant alternative.

▪ Rotor :

C'est la partie rotative de la machine, il est constitué de tôles rainurées à l'extérieur, concentriques au stator et séparées par un entrefer étroit. Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal, et comportent des fils conducteurs formant ainsi un bobinage polyphasé de même nombre de paires de pôles que le stator. En générale c'est un bobinage triphasé connecté en étoile d'une part et de l'autre part il est relié à trois bagues fixées sur l'arbre sur les quelles frottent des balais fixés sur le stator d'où on branche un convertisseur d'électronique de puissance pour le contrôle de la machine [36].

a. Structure de la machine à double alimentation (MADA) :

Première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures.

Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écurie coulée dans les encoches d'un empilement de tôles ferromagnétique, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La figure (I-14) représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général [37].

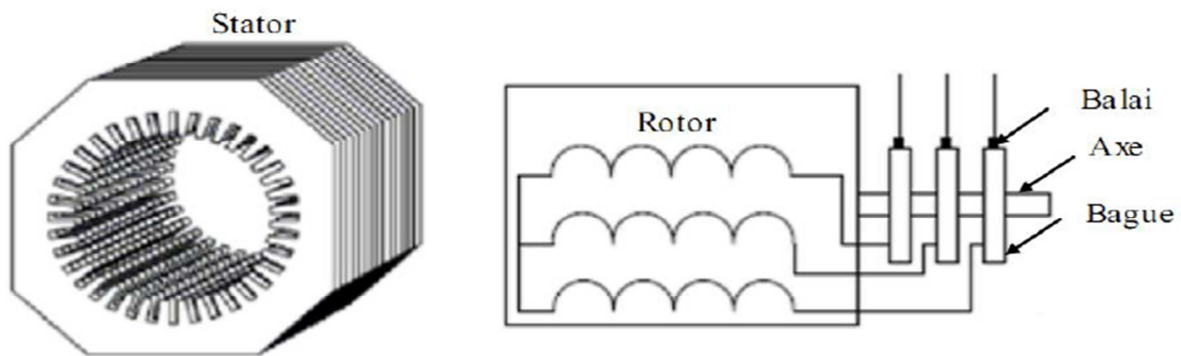


Figure (I-14) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

b. Différents modes de fonctionnement de la MADA :

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement g comme suit :

- **Stationnaire** ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence $[f_s]$ le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence $[f_r]$ égale à celle du stator. Dans ce cas-là la MADA se comporte comme un transformateur.
- **Hypo-synchrone** ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence $[f_r]$ décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.

- Synchrones ($g=0$) : dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence $[fr]$ du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- Hyper-synchrone ($g<0$) : par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence $[fr]$ devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor [37].

Néanmoins cette machine a quelques inconvénients à savoir :

- Elle est volumineuse qu'une machine asynchrone à cage.
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudié et très connue.
- Usure du système (bagues/balais) et jaillissement d'étincelles lors du frottement des balais sur les bagues.

Aujourd'hui, presque toutes les études faites sur les machines électriques doublement alimentés pour leur fonctionnement, surtout, en ce qui concerne les énergies renouvelables, ces derniers optent pour une structure de cette machine ou son stator est directement relié au réseau, et l'alimentation de son rotor est faite à travers un convertisseur d'électronique de puissance [38].

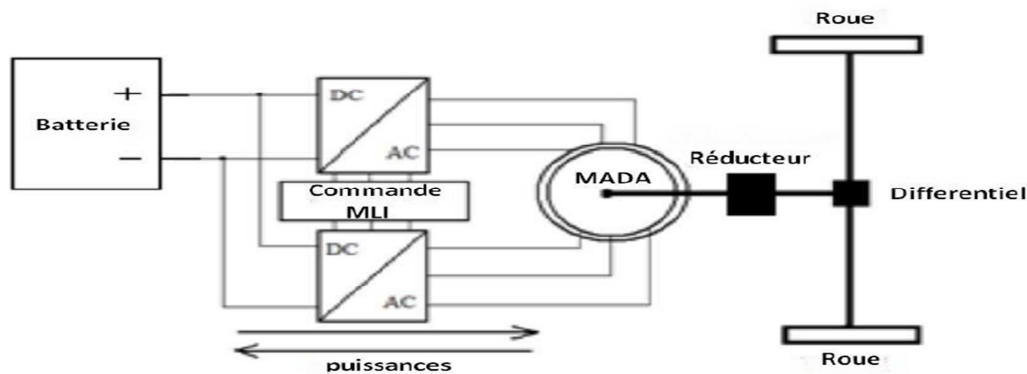


Figure (I-15) : Diagramme représentatif de l'entraînement de VE à l'aide de la MADA

Dans notre cas, on va s'intéresser à la structure, ou l'alimentation du stator et du rotor est faite à travers deux convertisseurs d'électronique de puissance, qui sont alimentés à travers une batterie de stockage d'énergie électrique [38].

I.4.1.4 Moteurs synchrones :

L'induit est dans ce cas au stator et l'inducteur au rotor. Le stator de la machine comporte les enroulements de trois phases dont la commutation par électronique de puissance sur la source à courant continu est assurée par un pont de puissance. Le champ statorique ainsi produit et

judicieusement réparti dans l'entrefer interagit alors avec le champ d'induction produit par le rotor de manière à créer un couple [39].

Il y a deux techniques sont utilisées pour créer le champ inducteur au rotor :

a. Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) :

Les moteurs synchrones à aimants permanents ont une puissance massique et un rendement élevés. Leurs coûts élevés restent le plus gros handicap. Des ferrites peuvent être utilisées mais elles ne présentent pas des performances excellentes. Par contre, les aimants à terres rares, Samarium-Cobalt ou Fer-Néodyme-bore sont plus intéressants. Un des inconvénients de cette machine est l'impossibilité du réglage de l'excitation.

Le champ de l'aimant varie avec le temps et la température mais de manière non significative. Pour atteindre des vitesses élevées, il sera nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes joule statorique [40].

b. Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB) :

Les masses polaires du rotor sont des électroaimants alimentés en courant continu. La valeur de l'induction peut alors varier par action sur le courant d'excitation. Le flux d'excitation est créé par un courant que l'on injecte dans les enroulements rotorique. Dans cette machine, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine. Il donne facilement la possibilité de dé fluxage que l'on peut effectuer par une simple réduction du courant d'excitation. Il est possible d'adapter des lois de commande permettant l'optimisation du rendement.

Les inconvénients :

- Les bobines d'excitation sont difficilement refroidies.
- La densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes.
- Les contacts glissants (balais- bagues) limitant le fonctionnement à très haute vitesse et par conséquent l'usure des balais.
- Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles.

Cette machine est une solution prometteuse pour la traction électrique automobile [41].

I.4.1.5 Moteur à réluctance variable (MRV) :

Ce moteur présente un faible coût. Néanmoins, la principale difficulté reste la commande. En effet, ce moteur produit un couple très pulsatoire à haute vitesse engendrant des problèmes de vibrations mécaniques et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents. Ceci est une des conséquences de son principe de fonctionnement.

D'autres technologies comme les moteurs-roues encore en phase de mise au point, pourraient présenter des avantages spécifiques indéniables qui devraient jouer un rôle décisif dans le développement du véhicule électrique.

Les avantages principaux :

- La possibilité de fonctionnement à vitesse élevé
- Le rendement relativement élevé par rapport à la machine asynchrone

Les inconvénients :

- La délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé
- La faiblesse du facteur de la puissance
- La complexité de l'électronique de commande
- Nécessitant un capteur de position.

Critères	DC moteur	AC asynchrone	AC Synchrones à aimants permanents
Rapport poids / puissance	-	0	+
Vitesse de rotation maximale	-	+	+
Endurance et maintenance	-	+	0
Rendement	80 → 85	85-90	90-95
Taille et poids du système de commande	+	0	0
contrôlabilité	++	+	+
Nombre de semi conducteur pour le contrôle	+	0	0
Fiabilité	0	0	0
Total	-	0	+

Tableau (I-2) : Choix de la motorisation en fonction de différents critères+ : avantage; 0 neutre; - : désavantage [42].

I.4.2 Convertisseur statique :

Le convertisseur statique utilisé dans la chaîne de traction est un hacheur, qui est des convertisseurs directs du type continu-continu. Ils permettent d'obtenir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe contrôlable par des impulsions générées par le circuit de contrôle [40].

De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), on l'appelle redresseurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC-DC), on l'appelle hacheurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC), on l'appelle onduleurs.

I.4.2.1 Les redresseurs (AC-DC) :

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique ; en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques.

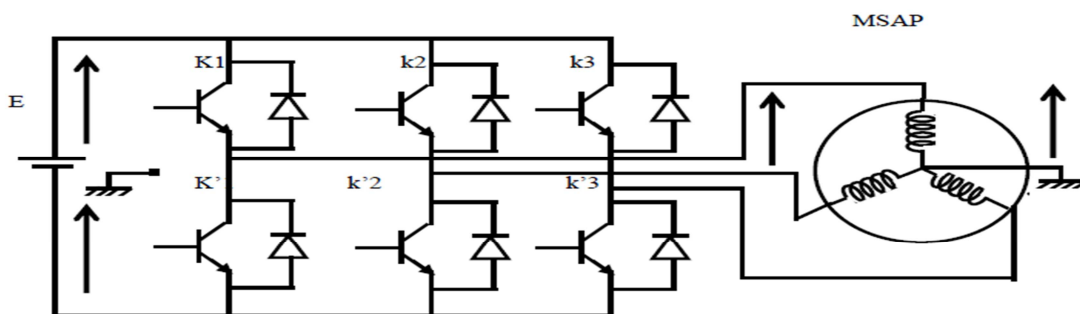
I.4.2.1 Les hacheurs (DC-DC) :

Dans un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant continu, les hacheurs sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu, il est nécessaire pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.)

Le but de l'utilisation de l'hacheur est régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

I.4.2.1 Les onduleurs (DC-AC) :

Dans un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant alternatif on peut utiliser un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique à courant continu à courant alternatif qui permet de contrôler le couple et vitesse de moteur du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.



I.4.3 Le type de véhicule électrique :

I.4.3.1 Véhicule électrique monomoteur (machine à courant continu) :

L'architecture mono moteur qui emploie un moteur à courant continu, une batterie plus un variateur (un hacheur réversible) en série et un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple) comme le montre la figure (I-16) [43].

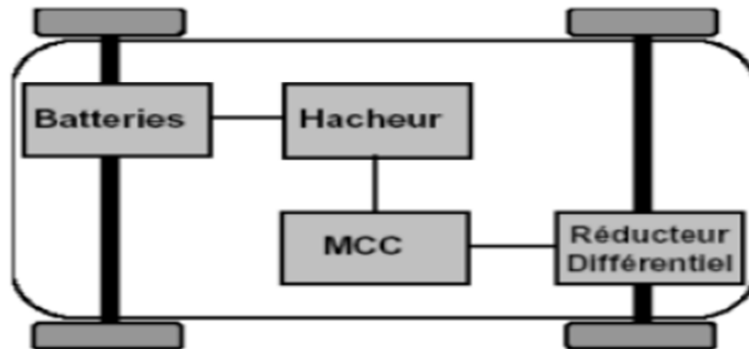


Figure (I-16): Architecture d'un VE mono moteur.

I.4.3.2 Véhicule électrique bimoteur (machine à courant alternatif):

Sur les VE bi moteur on trouve deux grandes architectures, l'une utilise une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu qui permet d'avoir plus de fiabilité côté moteur ²⁴ : l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule ainsi expliquée sur les figures suivantes [44].

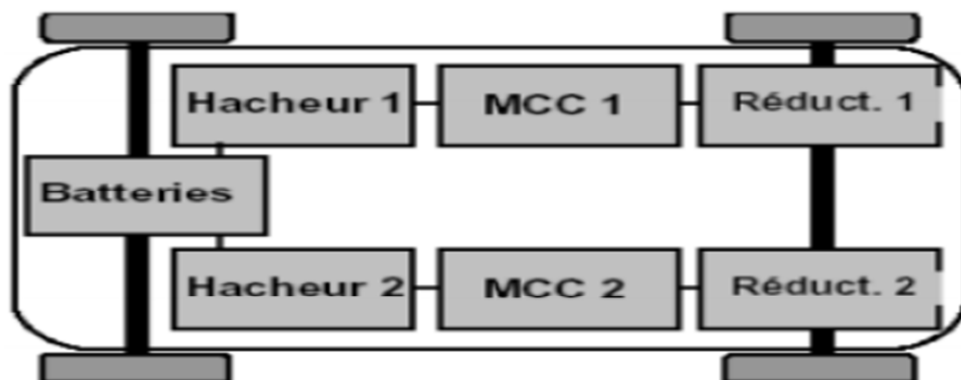


Figure (I-17): Architecture bi moteurs

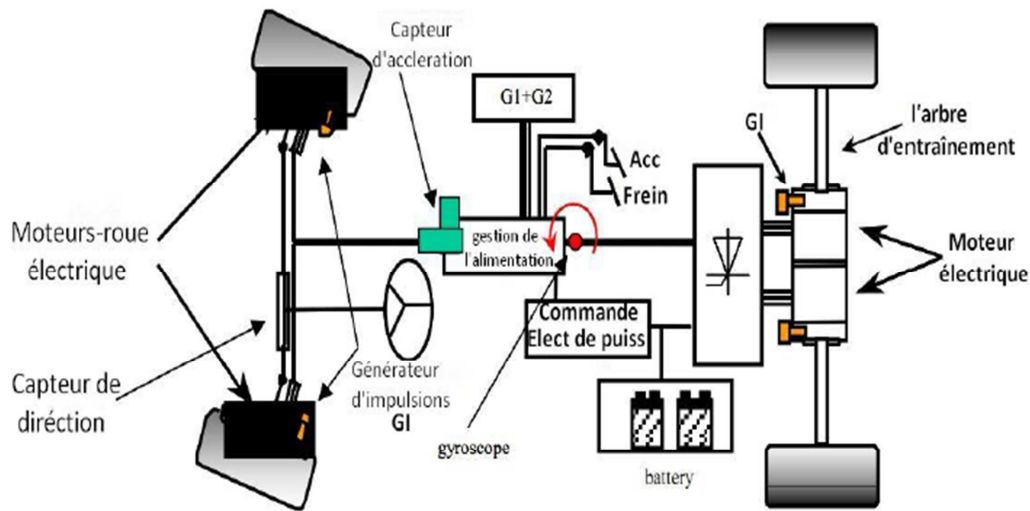


Figure (I-18) : Architecture détaillé d'un VE bi moteurs avec un MAS et deux roues motrices

I.4.4 Batterie :

Ce paragraphe donne des éléments de réponses à des simples questions : qu'est-ce qu'une batterie ? Quelle est le principe de fonctionnement d'une batterie ? Quelle sont les types des batteries idéales pour les voitures électriques ?

Un peu d'histoire : l'année 1800 est l'année de l'invention de l'élément clef de la voiture électrique, dans laquelle Alessandro volta (1745,1827) a inventé la première batterie [45].

Une batterie est le siège d'une réaction chimique réversible au cours de laquelle il peut y avoir soit libération d'énergie soit accumulation (conversion dans un sens ou dans l'autre d'énergie chimique en énergie électrique). La batterie est actuellement composée de plusieurs blocs élémentaires [46].

Pour comprendre le principe de fonctionnement d'une batterie, il suffit de connaître le principe chimique de l'oxydoréduction, selon lequel l'association d'un oxydant et d'un réducteur implique un échange d'électrons. Ainsi, une batterie est composée de deux métaux (une positive, une négative, appelées généralement cathode et anode) reliés par un pont électrolytique.

Pendant la charge, sous l'effet d'une sollicitation extérieure, le système passe d'un état A (de faible énergie) à un état B (d'énergie plus élevée) en suivant un processus réversible (on « force » une réaction chimique). Au cours de la décharge, le système repasse de l'état B à l'état A en libérant, sous forme électrique, l'énergie chimique accumulée au cours de la charge, comme le montre le Tableau (I-2) [47].



	Électrode négative	Électrolyte Conducteur ionique	Électrode positive
Décharge	Oxydation	Ox_1 (cation)  Red_2 (anion)	Réduction
Charge	Réduction	Red_1 (anion)  Ox_2 (cation)	Oxydation

Tableau (I-3) : Réactions aux électrodes de systèmes électrochimiques en charge et en décharge

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

- Une bonne puissance massique (rapport puissance /poids en W/kg) permettant des accélérations importantes.
- une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles charge/ décharge, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Entretien faible et recyclable.

Parmi ces différentes technologies de batteries, certaines batteries peuvent être utilisées sur les véhicules électriques notamment

- La batterie plomb (Pb) utilisée sur la C15 électrique.
- La batterie nickel cadmium (Ni Cd) utilisée sur les 106 et Saxo électriques.
- La batterie nickel métal hydrure (Ni-MH) est utilisée sur les véhicules japonais et américains.
- La batterie lithium-ion (Li-ion) est montée sur le prototype 106 Vedlic qui embarque 25000Wh pour 250 kg de batterie.

Le Tableau (I-3) et la Figure (I-19) résument les principales caractéristiques des batteries utilisées ou à l'étude pour la traction d'un véhicule terrestre. Les couples nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) présentent des énergies massiques et des densités énergétiques très supérieures à celles des batteries traditionnelles plomb ou nickel-

cadmium (Ni-Cd). Ces couples électrochimiques sont très utilisés dans les appareils nomades portatifs (téléphones mobiles, ordinateurs portables...). Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigés pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour. Le type Zebra, qui offre une densité énergétique intéressante, a pour l'instant vu son développement limité à l'équipement d'autobus et de véhicules routiers lourds. Les véhicules électriques de batterie Nickel hydrure de métal sont d'ailleurs déjà commercialisés Certains pensent que les batteries Lithium-ion est l'espoir principal du véhicule électrique pur, Grâce à ses performances massives et volumiques de capacité énergétique, ce système présente la tension élémentaire la plus élevée (4 volt/élément, à comparer à 2V, 1V et 1,2V pour respectivement les technologies plomb, Ni/Cd et Ni/MH). Cette haute tension élémentaire reflète la très haute réactivité du couple électrochimique mis en jeu et illustre un des inconvénients majeurs de cette technologie : la sécurité. Des véhicules ont cependant déjà été produits, avec, en particulier, l'Altra EV de Nissan en 1998 [48].

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	ZEBRA	Lithium phosphate	Li-ion	Lithium polymère
Energie spécifique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
Densité d'énergie (Wh/litre)	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
Puissance en pointe (W/kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycles¹	400-600 ² 1200 ³	2000	1500	800	> 2000	500-1000	200-300
Autodécharge par mois	5 %	20 %	30 %	12% par jour	5 %	10 %	10 %
Tension nominale d'un élément	2 V	1,2 V	1,2 V	2,6 V	3,2 V	3,6V	3,7V
Gamme de température de fonctionnement	- 20°C à 60°C	- 40°C à 60°C	- 20°C à 60°C	- 20°C à 50°C	-0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible coût	Fiabilité, Performance à froid.	Très bonne densité énergétique	bonne densité énergétique, bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie, sécurité, coût, cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Relativement basse énergie, toxicité	Coût des matériaux de base, danger en cas de température élevée	Puissance limitée, autoconsommation	Charge à température positive	Sécurité des gros éléments, coût	Performance à froid, coût
Coûts indicatifs (€/kWh) 3	200 à 250 200	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

Tableau (I-4) : Caractéristiques de différents types de batteries de traction [49], [50].

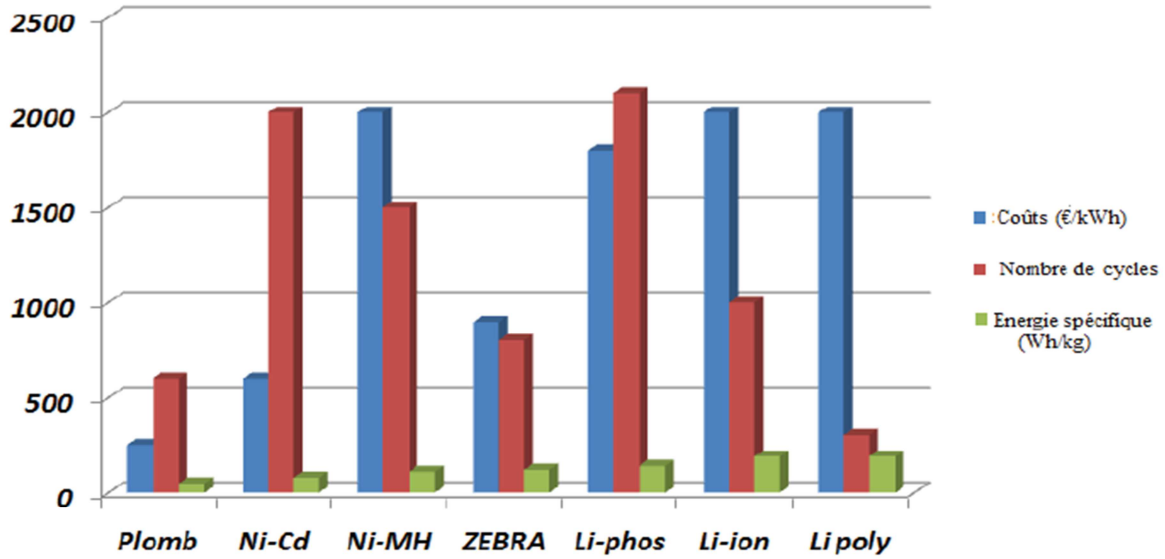


Figure (I-19) : Comparatif des différents types des batteries pour VEs

Logiquement, le poids de la batterie est dimensionné en fonction de la puissance demandée par la voiture (électrique ou hybride électrique). Donc à une puissance demandée correspond une densité massique et une densité massique correspondant à un poids. Le Tableau (I-4) montre les variations de la masse en fonction de la puissance du moteur de traction de la voiture électrique [51]

Batteries			200 Wh/kg			100 Wh/kg			70Wh/kg		
Distance (km)	énergie demandé *kWh	énergie Stockée kWh**	** kg	50 kW kW/kg	70kW kW/kg	kg	50kW kW/kg	70kW kW/kg	kg	50kW kW/kg	70kW kW/kg
16	2.52	3.6	18	2.78	3.89	36	1.39	1.94	51	.98	1.37
24	3.78	5.4	27	1.85	2.59	54	0.92	1.30	77	.65	.91
32	5.04	7.2	36	1.39	1.94	72	0.69	0.97	103	.49	.68
48	7.56	10.8	54	0.93	1.30	108	0.46	0.65	154	.32	.46
64	10.1	14.4	72	0.69	0.97	144	0.35	0.49	206	.24	.34

Tableau (I-5) : Variations du poids en fonction de la puissance du moteur de traction de la voiture électrique

*la consommation d'énergie de véhicule à partir de la batterie.250Wh/1.6km.

**états de charge de la batterie est 70%, le poids c.est juste le poids des cellules sans emballage.

I.5 Structure du véhicule électrique :

Le véhicule sur lequel sera implémentée l'architecture de contrôle est schématisé par une plate-forme rectangulaire montée sur quatre roues. Le véhicule est constitué de deux roues motrices parallèles en arrière [52].

Chacune de ces deux roues est entraînée indépendamment l'une de l'autre par un actionneur à courant continu. L'équilibre de la plate-forme est garanti par deux roues libres en avant. Le changement de direction est obtenu grâce à un actionneur à courant continu en avant et la différence de vitesses de rotation des deux roues motrices. C'est pour cela qu'on désigne ce véhicule par : (voir Figure (I-20))

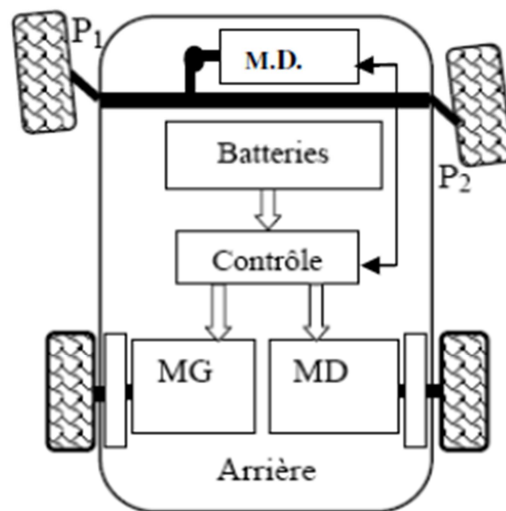


Figure (I-20) : Présentation du véhicule

I.5.1 Critères de choix des roues motrices :

Les roues motrices du véhicule doivent être identifiées très tôt dans un tel projet puisque les performances du véhicule dépendent grandement de leurs dimensions. Le couple fourni par le moteur ainsi que la vitesse maximale du véhicule sont des exemples de paramètres qui varieront en fonction du rayon des roues motrices [53].

Les critères que nous avons considérés pour le choix des roues motrices ont été établis en fonction des performances que nous désirions obtenir. Pour obtenir une accélération intéressante, il est nécessaire de choisir des roues de rayon assez faible puisque l'inertie de rotation vue par le moteur est directement proportionnelle à ce rayon au carré. Par contre, la vitesse maximale étant elle inversement proportionnelle à ce rayon, il est important de ne pas trop le diminuer. D'où un compromis entre ces deux exigences antagonistes.

L'accélération maximale dépendra également de l'adhérence du pneu. L'adhérence latérale dépend aussi de la forme des roues, ainsi que du matériau de la surface de contact avec le sol.

I.5.2 Critères de choix des roues libres :

Les roues libres assurent la stabilité du véhicule pour les différents mouvements possibles. Plus le poids et la friction de ces roues seront importants, plus les perturbations ne seront importantes. Nous cherchons donc à obtenir une roue libre qui offre un roulement à friction très faible. Les deux roues arrière sont libres en rotation et suivent librement les changements de direction du véhicule.

I.5.3 Choix des actionneurs :

Dans notre étude nous avons choisi le moteur à courant continu en raison de se prêtent facilement à un contrôle souple, réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Par ailleurs, la commande de ce moteur dans ce type d'application constitue un domaine de recherche et d'intense activité jusqu'à ce jour [54].

I.4 Conclusion :

A l'issu de ce travail, nous avons fait une présentation générale des différentes types architectures de VE, des divers constituants qui font partie de la chaîne de traction d'un VE, de leurs modes de fonctionnement et les tâches à accomplir par chaque sous-ensemble. Cela nous a guidés dans la définition de notre véhicule en termes d'architectures, moteurs et sources d'énergies. Notre système étudié est un véhicule tout électrique, il est propulsé par un moteur du type asynchrone à double alimentation (MADA), et alimentés par des batteries d'accumulateurs à travers des convertisseurs d'électronique de puissance du côté statorique et du côté rotorique, dans le chapitre qui suivra on fera introduire toute les définitions et modélisation de chaque élément de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

Chapitre 2 : Modèle dynamique du véhicule électrique

II.1 Introduction :

Nous allons discuter dans cette partie la modélisation et l'équation mathématique et dynamique qui introduit le fonctionnement du véhicule électrique, nous allons voir aussi le block de notre programme qui ce fait par simulink (matlab)

II.2 Modélisation dynamique du véhicule :

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif, la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender. La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération. Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui déterminent les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule [40], [52].

II.2.1 Contraintes dynamiques sur le véhicule :

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel, il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage.

a) Contraintes d'accélération « accélération et freinage » :

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération γ qu'il peut fournir. Cela se traduit par:

$$\gamma = \gamma_{\max} \dots \dots \dots (II-1)$$

b) Contrainte de vitesse maximale :

Il semble naturel que le véhicule aura une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes :

$$0 \leq V_x \leq V_{x\max} \dots \dots \dots (II-2)$$

$$-\omega_x \leq \omega \leq \omega_{\max} \dots \dots \dots (II-3)$$

c) Contrainte de non-glissement :

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement μ qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la surface de contact.

Si F tangentielle $\geq \mu F$ normale alors il y aura glissement [55], [56]. Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit : $M_\gamma \geq \mu.M.g.....(II-4)$

Ce qui implique : $V_{2x} + V_{2y} \geq \mu.g.....(II-5)$

Où : M : Masse du véhicule ;

γ : Accélération tangentielle du véhicule ;

g : Accélération de pesanteur.

Donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \leq \mu^2 . g^2(II-6)$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire.

Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés [57] :

F adhérences = f (Poids, Pression des pneus, Température, Etat de revêtement de la route).

d) Force d'entraînement : Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force F qui est parallèle à l'axe X_v . Cette force est contrainte par l'expression : $0 \leq F \leq F_{max}.....(II-7)$

II.2.2 Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale :

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge le pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire.

Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion des

roues au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement. Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent.

Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, figure (II-1), Soit α l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale [58].

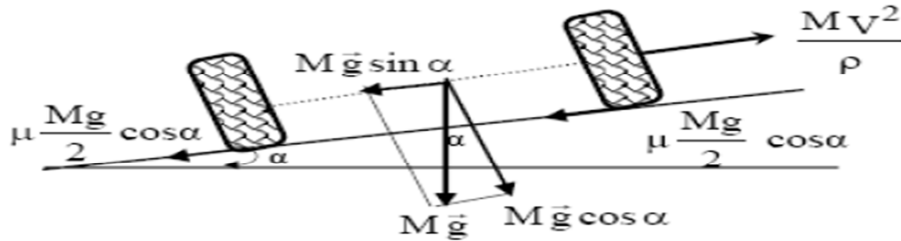


Figure (II-1) : Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α .

La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{M.V^2}{\rho} \leq (M.g.\sin\alpha + \mu.M.g.\cos\alpha) \dots\dots\dots (II-8)$$

Où ρ : Rayon du virage.

V : Vitesse du véhicule.

μ : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

Par suite, la valeur maximale V_{max} de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut: $V_{max} = \sqrt{\mu.g.\rho} \dots\dots\dots (II-9)$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons :

- Diminuer la vitesse du véhicule V .
- Augmenter le rayon de courbure ρ de la trajectoire.
- Augmenter le Coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation [52].

II.2.3 Couples résistant au déplacement :

Le couple résistant à la roue ($C_{r\ roue}$) lié à l'effort résistant total (F_{rt}) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation:

$$C_{r\ roue} = F_{rt}.r = [R_r + R_a + R_p].r \dots\dots\dots (II-10)$$

Ou R_r : Résistance au roulement.

R_a : Résistance aérodynamique.

R_p : Résistance due à la pente.

r : rayon d'une roue.

Nous raisonnerons sur un véhicule de masse M , à deux roues motrices de rayon extérieur r situées à l'avant, son accélération est γ , sa vitesse V . Tous les couples résistants seront exprimés en fonction du facteur $M_{gr}/2$ caractéristique du véhicule.

II.2.4 Roulement uniforme sur sol plat :

Les efforts résistants sont alors:

- La résistance au roulement qui fait intervenir les pertes d'énergie se produisant dans la surface de contact entre la roue et la surface de roulement.
- La résistance aérodynamique.

a) Résistance au roulement R_r :

L'expérience montre que la force qu'il faut appliquer à une roue pour la faire avancer en tournant est égale au produit du poids Mg par le coefficient de frottement de roulement f_r

[52]: $R_r = f_r \cdot M \cdot g \dots \dots \dots (II-11)$

g : accélération due à la gravité (9.81m/s²).

M : masse totale du véhicule (kg)

f_r : Coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement

Nous donnons ci-dessous quelques valeurs indicatives de f_r en fonction de l'état du terrain:

- Pneumatique sur bon terrain : $f_r = 0.015$ à 0.03
- Pneumatique sur mauvais terrain : $f_r = 0.15$
- Pneumatique en tout terrain : $f_r = 0.2$ à 0.3

b) Résistance aérodynamique R_a :

L'expression de la résistance aérodynamique est la suivante [59] :

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a S C_x (V \pm V_v)^2 \dots \dots \dots (II-12)$$

Ou : ρ_a : désigne la masse volumique de l'air ($\rho=1.293 \text{ kg/m}^3$).

S : est la surface frontale du véhicule en [m²].

C_x : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement).

V : est la vitesse du véhicule en [m/s].

V_v : est la vitesse du vent en [m/s].

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de 60Km/h, mais devient rapidement prépondérante ensuite.

Le couple maximum de roulement à plat (hors pertes dans la transmission) sera donc, pour une roue [60]

Croulement = 0.08 Mgr/2 véhicule avec pneumatiques.

Croulement = 0.01 Mgr/2 véhicule avec bandage plein.

II.2.5 Franchissement de pente :

Appliquer le théorème de la résultante dynamique Figure (II-2), dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, conduit à l'équation suivante :

$$R_p = Mg \sin \phi \dots \dots \dots (II-13)$$

Le couple nécessaire au franchissement vaut pour une roue :

$$C_p = R_p r = \frac{1}{2} Mg r \sin \phi \dots \dots \dots (II-14)$$

Ou :

M : masse du véhicule en [Kg].

g : l'accélération de pesanteur.

r : rayon d'une roue.

ϕ : Angle de la pente.

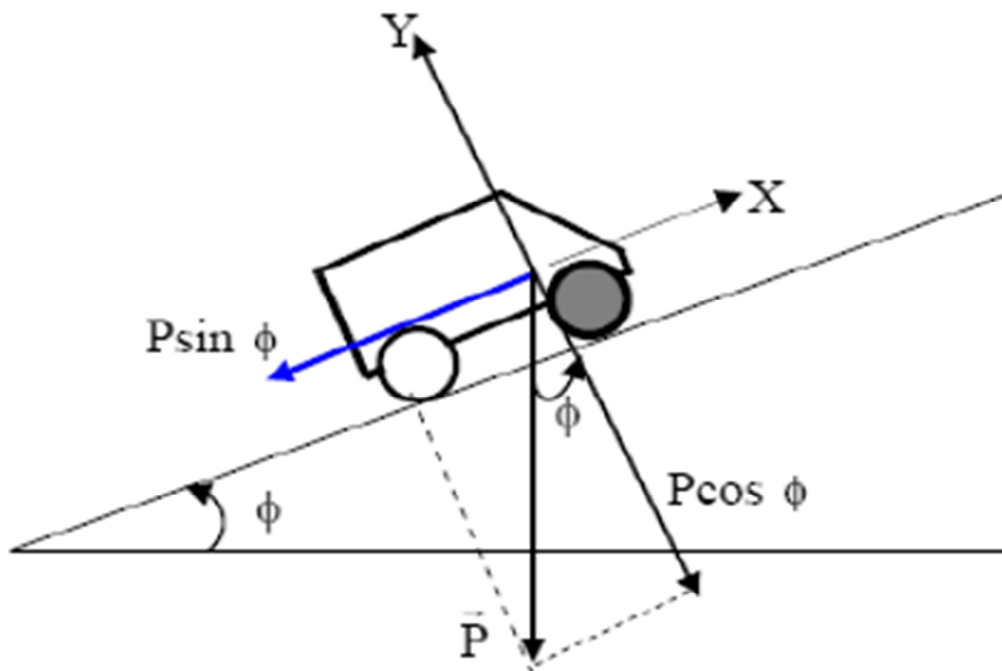


Figure (II-2) Franchissement de pente.

II.2.6 Franchissement d'obstacles :

Le véhicule doit, en principe, pouvoir franchir des obstacles jusqu'à une hauteur h égale au demi rayon de roue $r/2$ (Figure (II-3)).

Le couple nécessaire au franchissement est:

$$C_f = \frac{1}{2} \sin(\varphi) Mg r \text{ avec } \varphi_{\max} = 60^0 \dots\dots\dots(II-15)$$

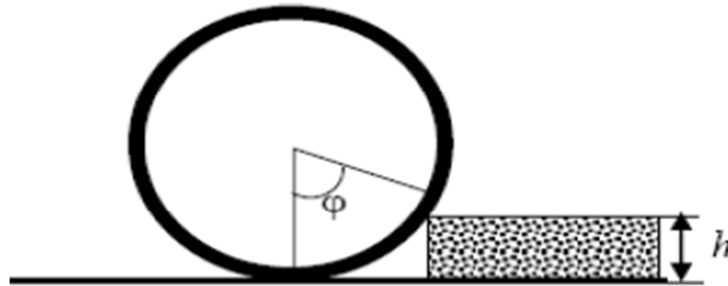


Figure (II-3) Franchissement d'obstacles.

Notons que ce couple estimé est surdimensionné, en effet [55] :

- Un obstacle n'est jamais attaqué à vitesse nulle.
- L'adhérence naturelle de la bande de roulement et/ou l'écrasement du pneumatique facilitent le franchissement.

Le rayon de la roue doit être le plus grand possible, pour faciliter le franchissement des obstacles.

II.2.7 Accélération :

La résistance inertielle totale vaut : $R_i = M.\gamma + \sum J \dots\dots\dots(II-16)$

Au maximum, le deuxième terme est couramment estimé à 15% du premier. Le couple nécessaire à l'accélération du véhicule est donc, pour une roue [61].

$$C_{acc} = 1.15 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot M \cdot g \cdot \frac{r}{2} \dots\dots\dots(II-17)$$

Notons que (γ/g) caractérise la performance du véhicule en accélération.

II.2.8 Résistance au glissement (adhérence) :

Pour qu'une roue tourne effectivement, il faut qu'elle adhère au sol. L'expérience montre que pour déplacer un corps sur une surface, il faut lui appliquer une force égale au produit de son poids par un coefficient de frottement de glissement.

$$R_g = \mu M \cdot g \dots\dots\dots(II-18)$$

Pneu neuf sur	μ
Béton ordinaire (sec)	0.7
Macadam propre et sec	0.6
Asphalte sec	0.5 à 0.75
Asphalte mouillé	0.25 à 0.4
Goudron humide	0.2 à 0.3
Terrain meuble	0.1 à 0.2
Béton rugueux	0.9 à 1

Tableau (II-1) Quelques valeurs de coefficient de friction μ

On voit donc qu'en général R_f est beaucoup inférieure à R_g , il en résulte que si on applique une force suffisante aux roues d'un véhicule il avance, la roue tournant sans glisser.

II.3 Batterie :

La batterie est un élément capable de convertir l'énergie chimique stockée à l'intérieur en énergie électrique. Elle est également capable de voyager dans le sens inverse, c'est-à-dire qu'elle peut prendre de l'énergie électrique externe et la stocker à l'intérieur sous forme d'énergie chimique. Aussi intuitif à penser que la batterie est un élément très important pour les véhicules hybrides, et bien sûr, ceux utilisés dans ce type d'applications sont rechargeables.

J'ai utilisé le bloc batterie Simulink pour ce bloc, car c'est un très bon modèle. Ce bloc implémente un modèle paramétré générique pour représenter les types de piles rechargeables les plus populaires.

Le circuit équivalent de la batterie est:

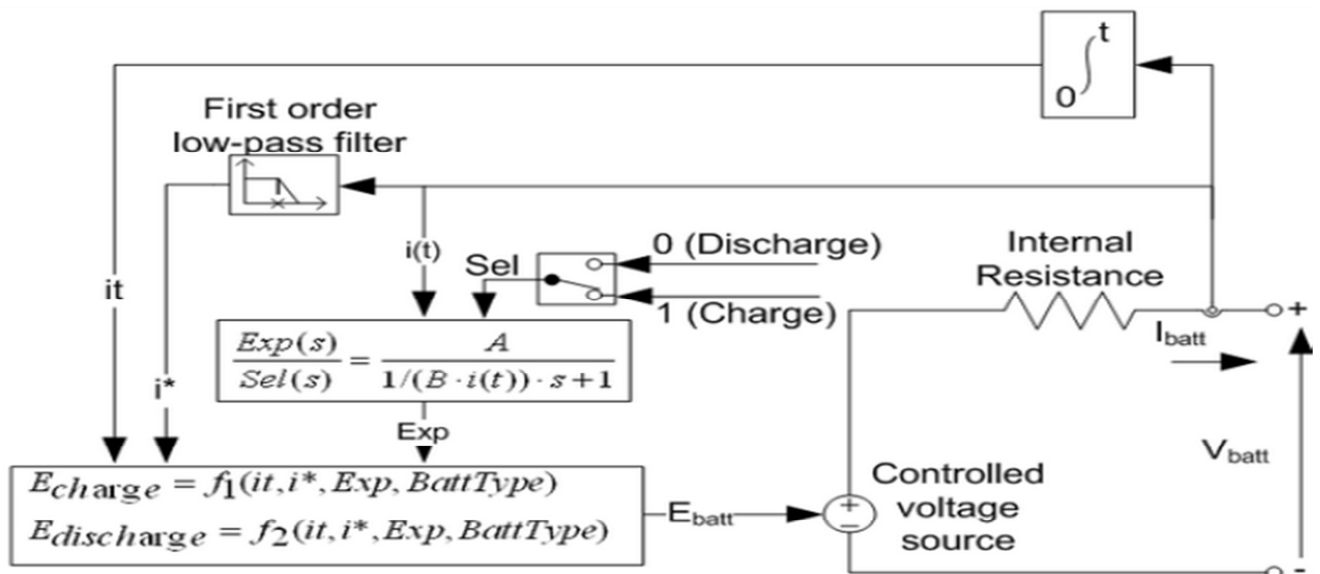


Figure (II-4) : circuit équivalent de la batterie. Source, Matlab.

Pour notre modèle, nous choisirons par exemple l'option batterie lithium-ion, dont le modèle de chargement et de déchargement est:

Décharge :

$$f_1 = (it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B \cdot it)$$

Charge:

$$f_2 = (it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it+Q1.Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B \cdot it)$$

Figure (II-5) : Modèle de chargement et de déchargement dans la source [62].

II.4 Modéliser un véhicule électrique dans Matlab / Simulink :

À partir des relations définies dans les sections précédentes, un modèle est créé qui les englobe de manière à obtenir les paramètres souhaités. En premier lieu, le code dans Matlab est affiché, à partir duquel les valeurs des variables sont obtenues, telles que la masse du véhicule, la surface frontale, le coefficient de frottement, la vitesse en fonction du cycle sélectionné, du type de batterie, etc.

➤ scripte :

```

Velocidad=questdlg('Choisir le cycle de type:', 'type de
cycle', 'Régulier', 'Experimental', 'Régulier');
if strcmp(Velocidad, 'Régulier')
Velocidad=questdlg('Choisir le cycle de type:', 'type de
cycle', 'FTP75', 'UNECE Elementary Urban Cycle', 'Más', 'FTP75');
end
if strcmp(Velocidad, 'Más')
Velocidad=questdlg('Choisir le cycle de type:', 'type de cycle', 'UNECE
Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)', 'UNECE Reg 83 Extra-Urban
Driving Cycle', 'UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)');
end
if strcmp(Velocidad, 'Experimental')
Velocidad=questdlg('Choisir le cycle de type:', 'type de
cycle', 'Circulation fluide', 'Circulation non fluide', 'Circulation fluide');
end
if strcmp(Velocidad, 'FTP75')
v=xlsread('NV.xlsx', 'D1:D87');
end
if strcmp(Velocidad, 'UNECE Elementary Urban Cycle')

```

```

v=xlswread('NV.xlsx','B1:B196');
end
if strcmp(Velocidad,'UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)')
v=xlswread('NV.xlsx','C1:C400');
end
if strcmp(Velocidad,'UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving Cycle')
v=xlswread('NV.xlsx','A1:A400');
end
if strcmp(Velocidad,'Circulation fluide')
v=xlswread('nedccycle.xlsx','I1:I970');
end
if strcmp(Velocidad,'Circulation non fluide')
v=xlswread('nedccycle.xlsx','H1:H1876');
end

```

À partir de là, un modèle est créé dans Simulink Figure (II-6) qui relie graphiquement toutes les variables système. Effectuez la simulation par étapes d'une seconde et répétez la simulation jusqu'à ce que la profondeur de décharge de la batterie soit supérieure à 0,9. Cette valeur a été choisie pour que la batterie ne souffre pas et ne soit pas déchargée complètement.

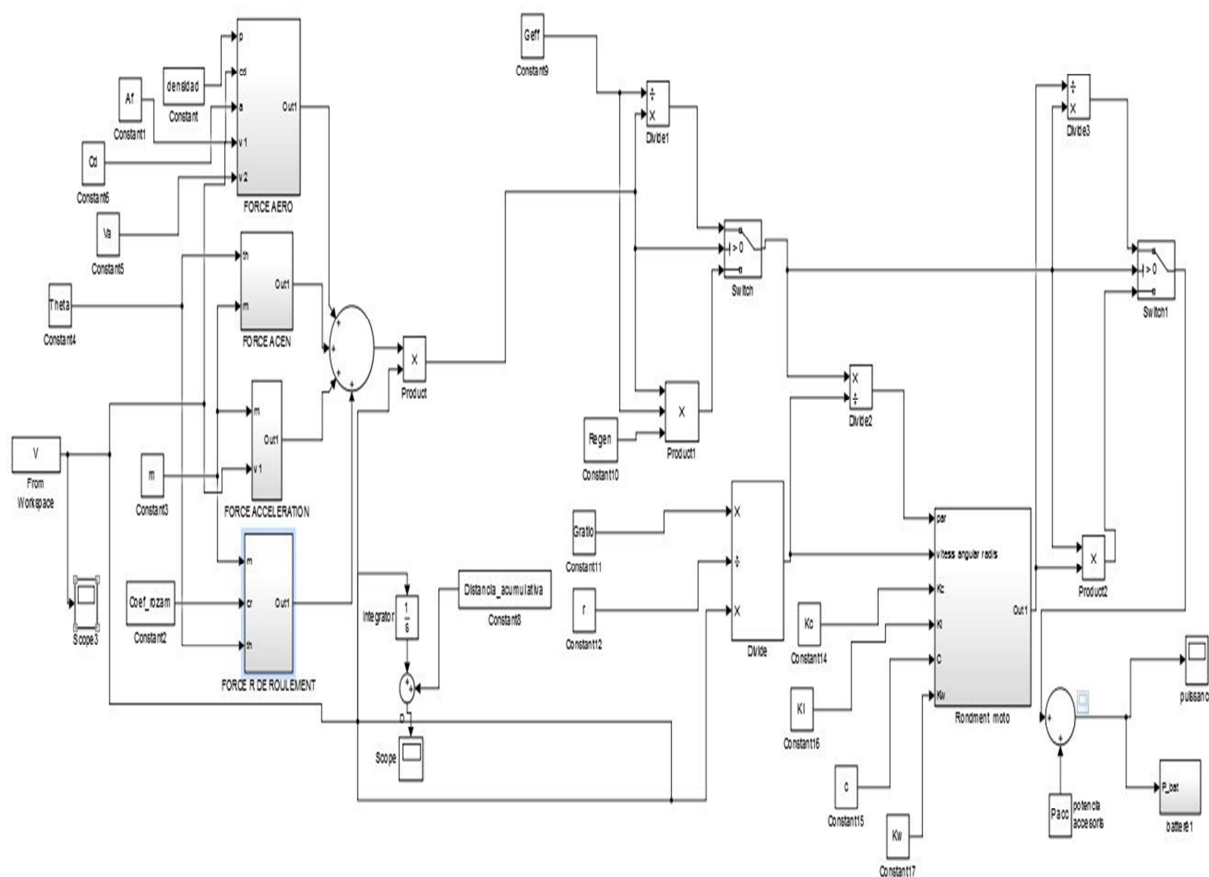


Figure (II-6) : Vue générale du modèle du véhicule électrique à Simulink

II.4.1 Dynamique du véhicule :

Ce bloc est responsable du calcul de la force motrice nécessaire pour répondre aux exigences de la progression du véhicule. Quatre blocs sont situés dans la dynamique du véhicule: force aérodynamique, force d'ascension, force d'accélération et force de frottement, qui fournissent la force de traînée aérodynamique, la force d'ascension en cas de pente, la force d'accélération et la force. De frottement, respectivement. La force motrice est obtenue en combinant la deuxième loi de Newton avec un équilibre des forces dans la direction du mouvement du véhicule. De cette manière, la force motrice, "Fte", doit être égale à la somme des forces mentionnées précédemment

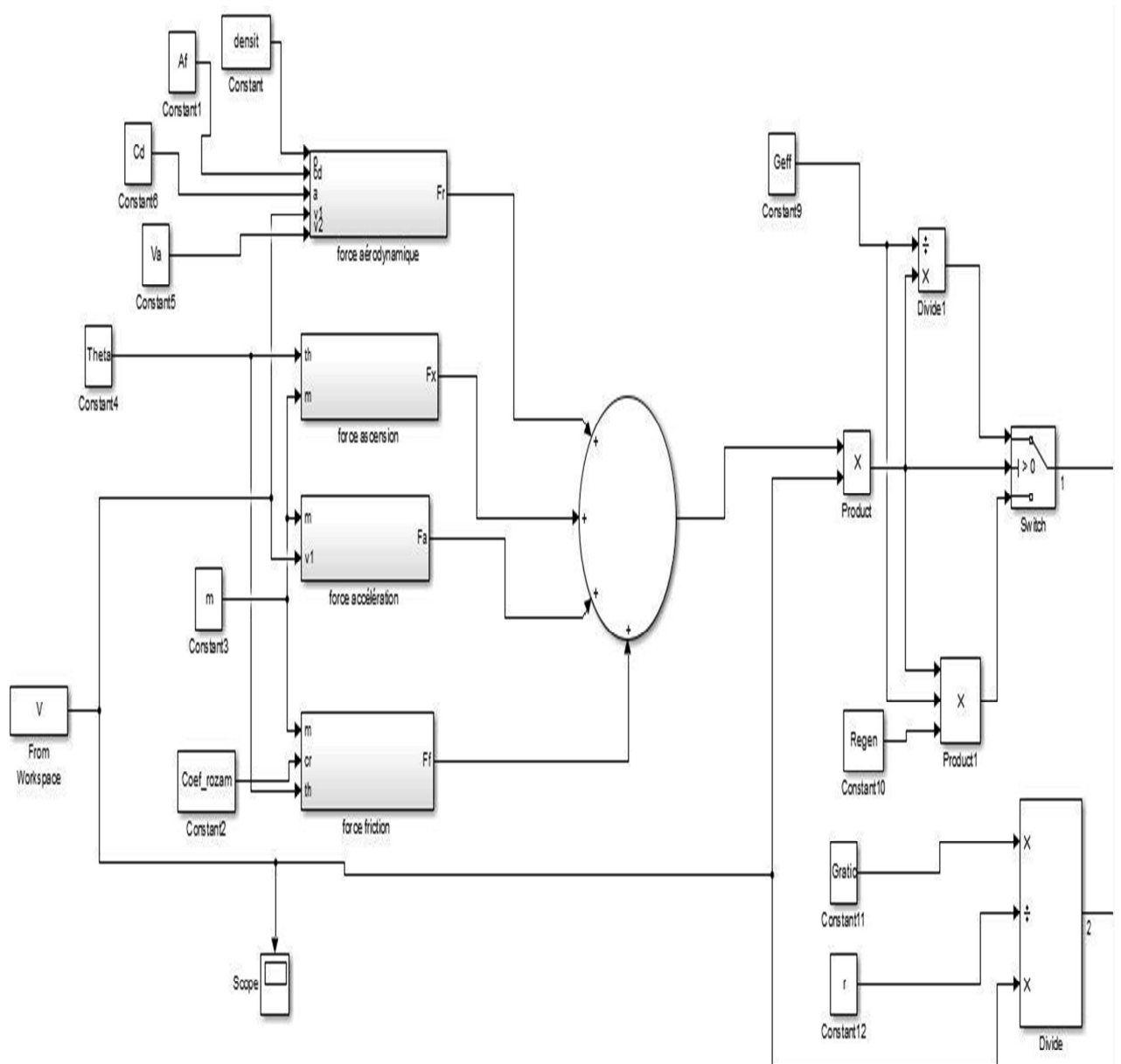


Figure (II-7) : Détail de la dynamique du véhicule électrique dans Simulink

II.4.2 Efficacité de la transmission :

La puissance requise est calculée à partir de la force calculée dans la section précédente "Fte" par la vitesse à laquelle le véhicule roule.

En premier lieu, il est nécessaire de prendre en compte les pertes mécaniques de la boîte de vitesses et du différentiel ainsi que d'autres éléments tels que les joints de cardan. Un coefficient de récupération est appliqué dans le cas du freinage par récupération qui représente le niveau de récupération d'énergie par le moteur et la batterie. Les commutateurs (bloc d'interrupteurs) permettent de sélectionner le chemin qui traverse l'énergie en fonction de l'énergie positive (traction) ou négative (freinage) et d'appliquer ainsi correctement les facteurs de perte.

Dans le bloc Performances du moteur, l'équation des performances du moteur en fonction du couple et de la vitesse angulaire mentionnés au paragraphe 4.2 a été mise en œuvre: - Simulation d'un véhicule électrique .

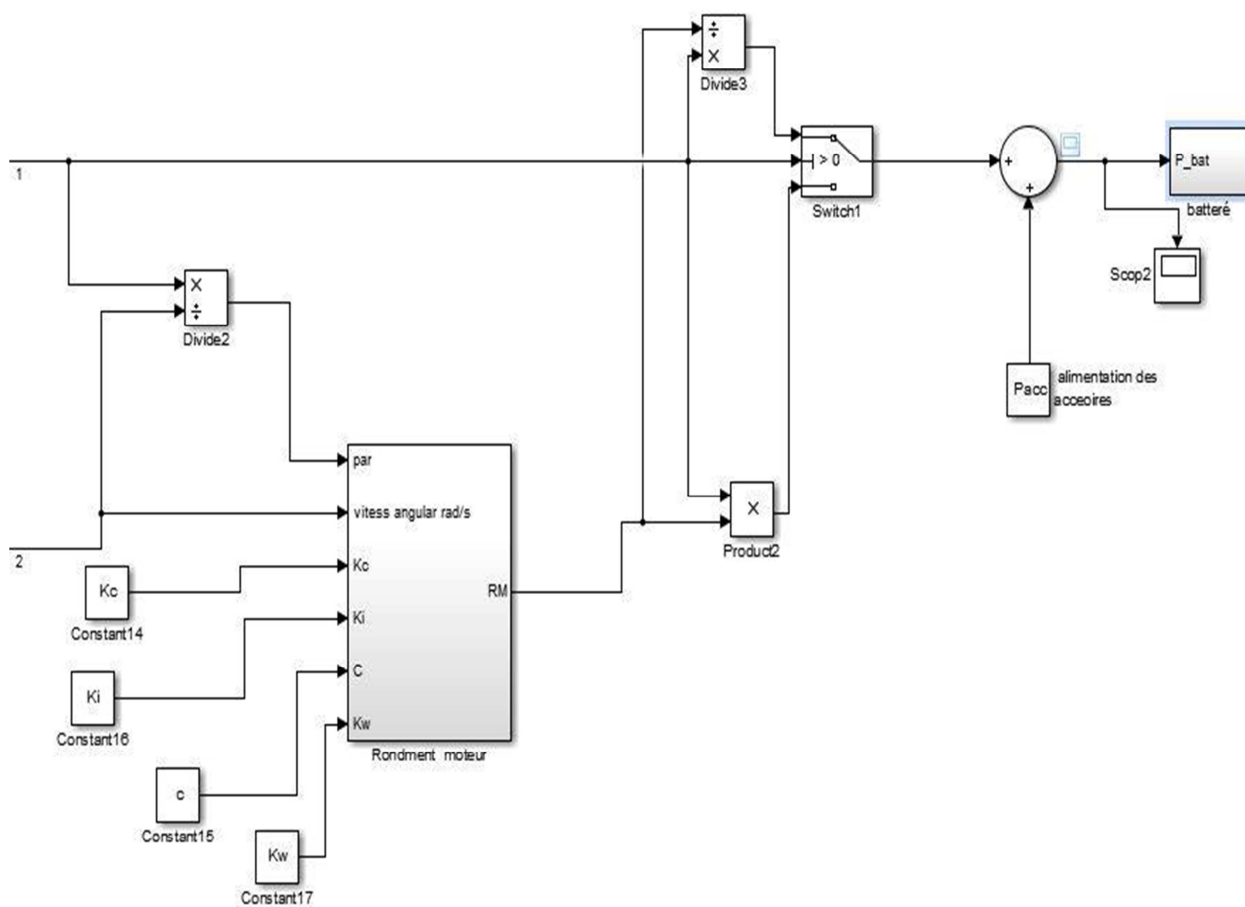


Figure (II-8) : Détail des blocs d'efficacité de la transmission dans Simulink

II.5 Conclusion :

Nous venons de présenter, dans ce chapitre une petite historique sur le véhicule électrique, et un aperçu sur leur actualité récente, ainsi les éléments constitue une chaine de traction ainsi les différents configurations et/ou architectures existant. Par la suite nous avons abordé une modélisation dynamique du véhicule électrique avec études de quelques situations affronte le mouvement du véhicule tel que franchissement d'une pente, d'obstacle, accélération, ...etc.

Chapitre 3 : Résultats de simulation véhicule électrique

III.1 Introduction :

Dans cette partie, nous allons voir les résultats de simulation de notre modèle du véhicule électrique présenté dans le chapitre précédent (chapitre I). Dans cette simulation nous discutons la variation des paramètres de performance du véhicule en fonction du cycle de condition et sur le choix du type de batterie

III.2 Méthodologie de simulation :

1. Nous commençons notre simulation par le choix du type de cycle de conduction soit régulier (normalisé) et expérimentale ((un fichier Excel) figure (III-1))



Figure (III-1) : choix de cycle

2. le script de notre simulation nous permet de voir la variation de la masse du véhicule (Figure (III-2)).



Figure (III-2) : choix de masse

- (Figure III-2) pour le choix de la masse de véhicule en (kg)

3. nous passons au choix de la route sans et avec inclinaison (ascendante, descendente) (figure III-3)

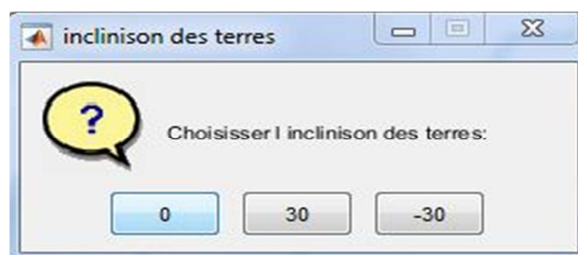


Figure (III-3) : choix d'inclinaison

- (Figure III-3) pour le choix de l'inclinaison de route en (°)

III.3 Les résultats de simulation :

1. Influence de cycle de conduction :

La figure (III-4) représente la variation de la vitesse en fonction du temps, nous constatons à partir de ce cycle, il décrit différent régime dynamique du véhicule.

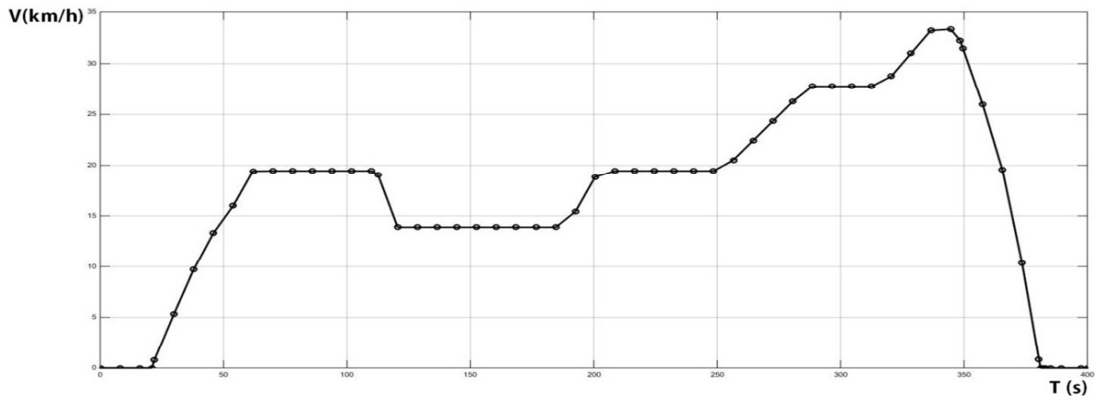


Figure (III-4) : la variation de la vitesse en fonction de temps

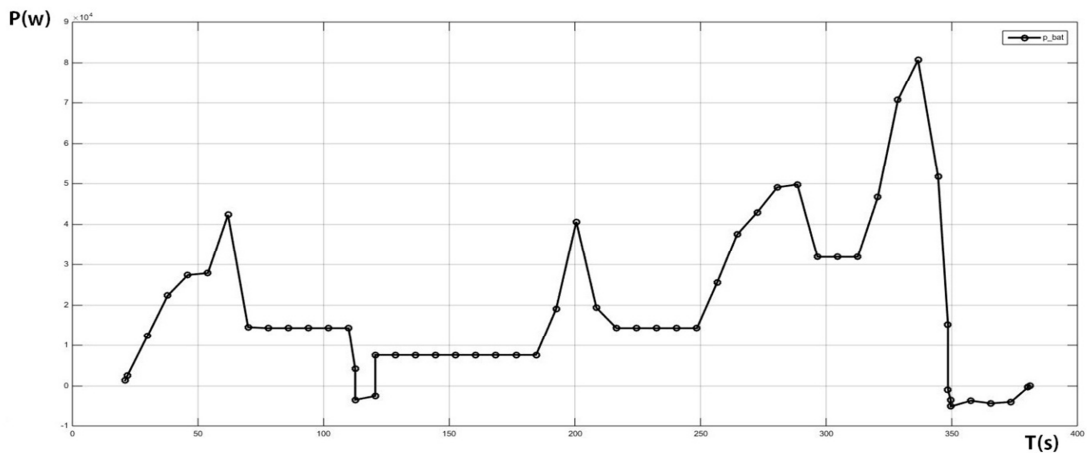


Figure (III-5) : la puissance ce qui nécessite que la voiture se déplace à une certaine vitesse

La figure (III-5) représente la puissance fournie par la batterie en fonction du temps.

A l'accélération la puissance augmente proportionnellement avec la vitesse (figure (III-5)) ce qui démontre la loi dynamique du véhicule selon l'équation (III-1) et (III-2) et lorsque la vitesse devient constante la puissance diminue.

$$P = F * v \dots\dots\dots(III-1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots(III-2)$$

Au freinage (III-4) la puissance diminue directement, jusqu'à une valeur négative puis ils remontent progressivement jusqu'à la valeur nulle (figure (III-5))

2. Influence de la masse du véhicule :

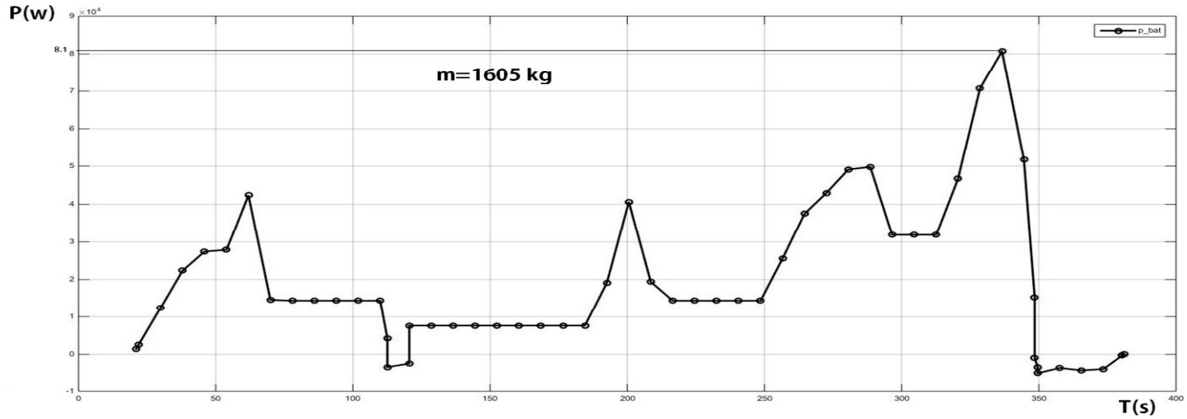


Figure (III-6) : la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une masse de 1605kg

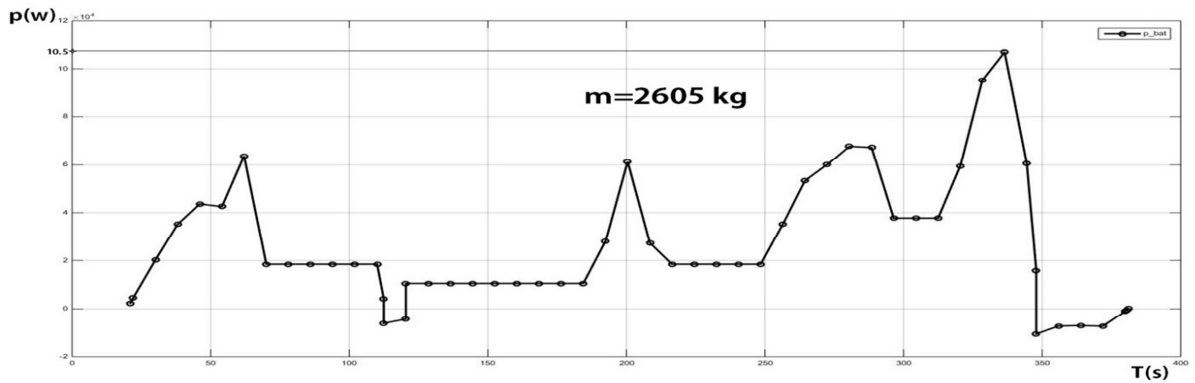


Figure (III-7) la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une masse de 2605kg

Selon la figure9 et la figure10, la puissance change proportionnellement avec la masse parce que lorsque la masse augmente proportionnellement avec la force d'ascension F_x (III- 3), la force de friction F_f (III- 4) et la force d'accélération F_a (équation III- 5) va augmenter aussi.

$$F_x = mg \sin\alpha \dots\dots\dots (3)$$

$$F_f = mgCr \cos\alpha \dots\dots\dots(4)$$

$F_a = ma \dots\dots\dots (5)$

D'après ces résultats nous devons estimer la puissance nécessaire au véhicule doit être supérieure à la somme de la puissance de ces forces.

3. Influence d'ascension (l'inclinaison de la route) :

Nous allons discuter les différents cas :

1. la route droite ($\alpha=0$)
2. la route montante ($\alpha=30^\circ$),
3. la route descendante ($\alpha=-30^\circ$) :

i. La route droite ($\alpha=0$) :

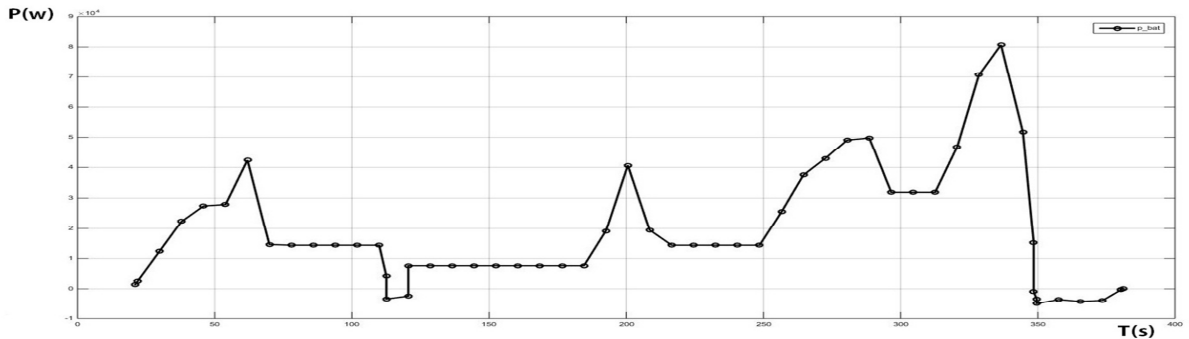


Figure (III-8) : la variation de puissance qui consomme par la batterie avec une angle de 0°

- la puissance est proportionnelle à la vitesse (figure (III-8)) par ce que la force d'ascension est nul $\alpha=0$, $\sin(\alpha) = 0$, $F_x = 0$.Et la friction entre la route et les roues égal à une valeur constante $F_f = mgCr$. ($Cr= 0.01$)

ii. La route montante ($\alpha=30^\circ$) :

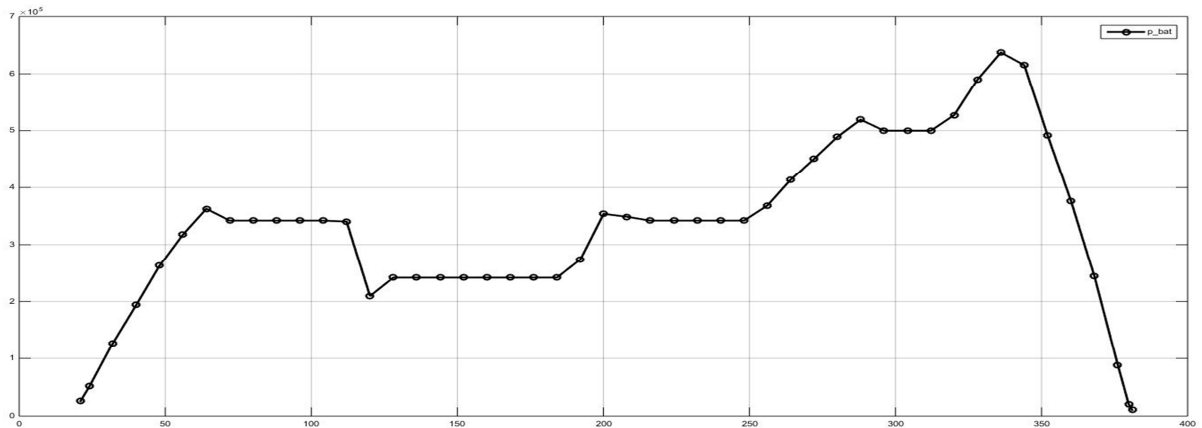


Figure (III-9) la variation de puissance fournie par la batterie avec une angle de 30°

- le moteur consomme plus de puissance pour déplacer la voiture (figure (III-9)) et par conséquent la force devient maximale.

iii. La route est descendante ($\alpha=-30^\circ$) :

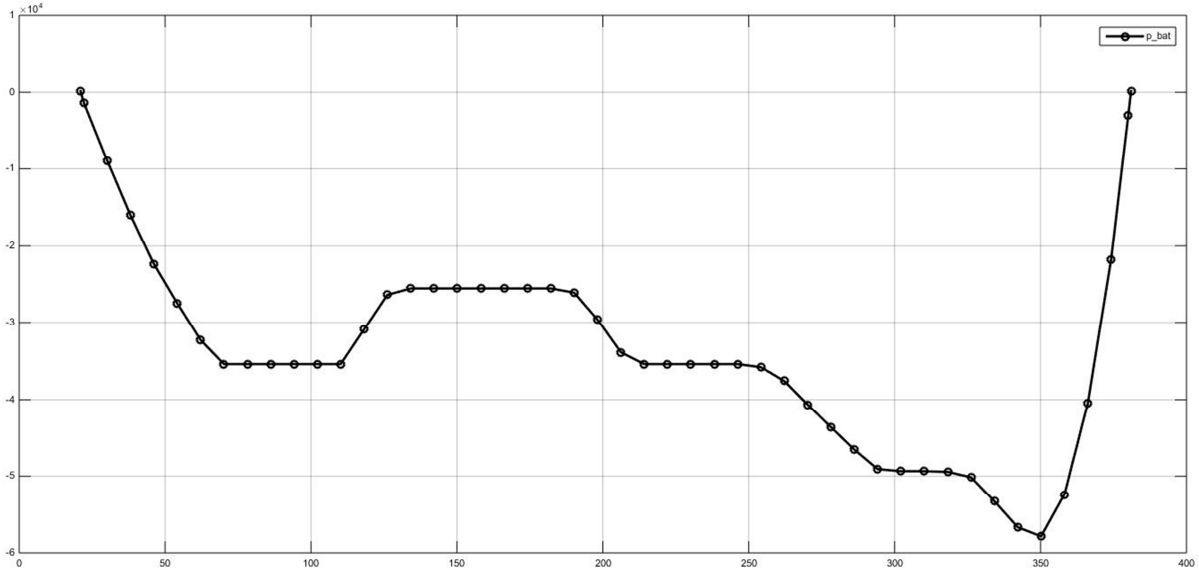


Figure (III-10) la variation de puissance fournie par la batterie avec une angle de -30°

- la puissance devient négative (figure (III-10)) donc la voiture fournie de puissance.

III.4 Choix du type batterie :

Nous avons pris deux types de batterie Acide-Plomb et Lithium-Ion. Pour le choix nous discutons sur la décharge en fonction de la distance parcourue par le véhicule.

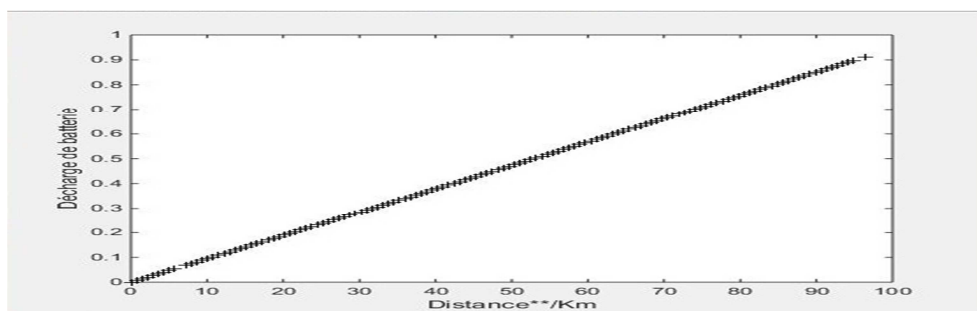


Figure (III-11) : Décharge de batterie Acide-plomb en fonction de distance

- Batterie Acide-plomb (figure (III-11)) avec cette batterie le véhicule peut réduire une distance de 95 km dans ce cycle avec condition normal ($\alpha=0^\circ$)

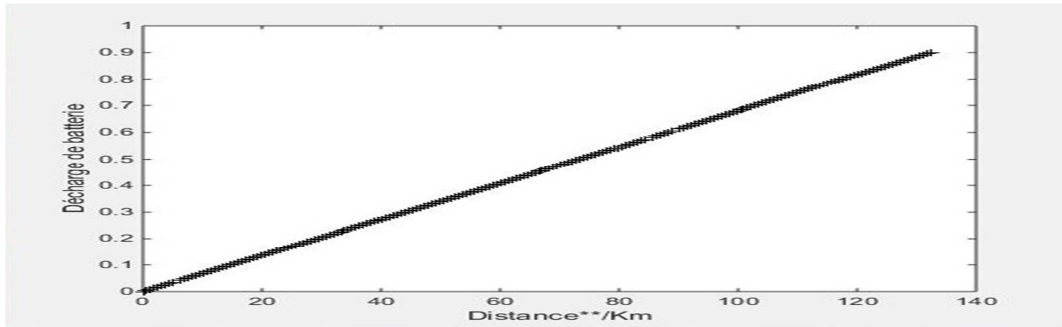


Figure (III-12) Décharge de batterie Lithium-Ion en fonction de distance

- Batterie Lithium-Ion (figure (III-12)) avec cette batterie le véhicule peut parcourir une distance de 135 km dans ce cycle avec condition normal ($\alpha=0^\circ$)

	Acide-plomb	Lithium-ion
Voltage	2	3.2
Cellules	195	192
Coefficient de Peukert	1.2	1.05
Résistance interne	0.022	0.06
Distance raccorder	95km	135km

Tableau (III-1) comparaison entre les deux batteries Acide-plomb et Lithium-ion

Selon le tableau (III-1), nous constatons que la batterie Lithium-ion est préférable pour parcourir une longue distance

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté les paramètres qui influent sur la performance de la véhicule électrique tels que : le cycle de conduction, la masse, et l'inclinaison de la route.

Nous remarquons que ces paramètres ont une grande influence sur la puissance fournie par la batterie. C'est pour cette raison nous avons discuté sur quel type de batterie à choisir.

A la fin de ce chapitre nous avons remarqué que la batterie Lithium-ion donne une autonomie au véhicule plus long que la batterie Acide-plombe.

Conclusion générales et Perspectives

Dans cette mémoire de master, le modèle dynamique et électrique d'un véhicule électrique a été développé.

Le programme Matlab / Simulink a permis de mettre au point un outil permettant d'évaluer les performances du véhicule électrique. Cet outil peut être appliqué à plusieurs cas de transport routier, qu'il s'agisse de personnes, qu'il s'agisse de transports publics ou privés, ainsi que de charges, en modifiant uniquement la valeur des variables dans le fichier d'entrée.

Comparativement à la technologie conventionnelle, moteur à combustion interne, aux véhicules électriques, il faut prendre en compte plusieurs facteurs, tels que les performances, l'autonomie, la consommation, la durée de vie de la batterie, les coûts de maintenance, etc.

Dans la simulation, des facteurs externes et internes ont été pris en compte lors de son exécution, par exemple

- Mode conduite: les différents types de cycles à choisir
- Masse du véhicule: poids du véhicule à vide plus le conducteur et / ou le chargement du coffre et des passagers.
- Type de route: inclinaison et coefficient de frottement
- Technologie: différents types de piles

Une fois que toutes les valeurs d'entrée incluses dans le fichier Matlab, les résultats de simulations ont été présentés. les résultats montrent l'influence de

ces facteurs sur les performances du véhicule et en particulier la puissance demandée par la batterie.

- L'autonomie du véhicule dépend du cycle de conduite choisi, elle est également réduite par le vieillissement de la batterie.
- La variable qui affecte le plus l'autonomie est la masse du véhicule, car la charge transportée augmente l'autonomie du véhicule diminue, quelle que soit la technologie utilisée.

En fin nous proposons pour la poursuite de notre travail est d'étudier différents types de moteur électrique et faire une comparaisons sur les performances du véhicule.

Bibliographie

- [1]. Mr. BOUCHA ABDELLAH « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,
- [2]. Nicolas Meunier. www.challenges.fr, mis à jour le 11.05.2012 à 10h50
https://www.challenges.fr/automobile/nouveautes/le-toyota-rav4-passe-a-l-electrique_291745
- [3]. tzev. 2002 Toyota Rav4-EV - ZEV – BEV. www.tzev.com,
Figure1: tzev. 2002 Toyota Rav4-EV - ZEV – BEV. www.tzev.com
figur2: http://gdat.ortholinc.de/rav4_wiring_diagram.php
- [4]. Voiture électrique populaire. L'Histoire de la Voiture Electrique.www.voiture-electrique-populaire.fr[en ligne]. Dernière mise à jour 8 novembre 2011 .<http://www.voiture-electrique-populaire.fr/vehicule/histoire>
- [5]. Shahan, Zachary (2015-04-26). "Electric Car Evolution". Clean Technica Retrieved 2016-09-08. 2008: The Tesla Roadster becomes the first production electric vehicle to use lithium-ion battery cells as well as the first production electric vehicle to have a range of over 200 miles on a single charge.(anglais)
- [6]. "Tesla Motors introduces Roadster Sport". Tesla Motors. 2008-01-11. Archived from the original on 2009-01-20. Retrieved 2009-01-14.(anglais)
- [7]. "Performance: Acceleration & Torque". Tesla Motors. Archived from the original on 2009-01-09. Retrieved 2014-02-25.(anglais).
- [8]. "Tesla Motors Selects BorgWarner for Production of New Gearbox for Tesla Roadster". Tesla Motors. 2011-02-25.(anglais).
- [9]. Motor Trend First Test: 2010 Tesla Roadster Sport (anglais)
- [10]. Ramsey, Jonathon (2009-03-26). "Tesla Model S: US\$50,000 EV sedan seats seven, 300-mile range, 0–60 in 5.5s (press release)". Autoblog Green. Archived from the original on 2009-03-27. Retrieved 2009-04-12.
- [11]. "Roadster 3.0". teslamotors.com (Press release). Tesla Motors. 2014-12-26. Retrieved 2015-04-08.
- [12]. Voelcker, John (2013-01-18). "Boeing 787 Batteries Same As Those In Electric Cars? Umm, NO". GreenCar. Retrieved 2013-01-18.(anglais).

-
- [13]. Boudreau (2012-06-22). "In a Silicon Valley milestone, Tesla Motors begins delivering Model S electric cars". San Jose Mercury News. Retrieved 2012-06-22.(anglais)
- [14]. Wert, Ray (2007-02-20). "Darryl Siry responds to rumor on Jalopnik forum". Jalopnik.com. Retrieved 2010-11-27.(anglais)
- [15]. "Tesla Model S one billion miles". Western Morning News. 2015-06-23. Archived from the original on 2015-06-24. Retrieved 2015-06-23
- [16]. Model S Specifications". Tesla Motors. Retrieved 2015-12-05.(anglais)
- [17]. "Tesla Model S Performance – Battery". Tesla Motors. Retrieved 2012-06-22.(anglais)
- [18]. Musk, Elon (2013-10-04). "Model S Fire". Tesla Motors. Retrieved 2014-02-20.(anglais), Figure 3 : Google image
- [19]. « Tesla Model X, un SUV électrique de 772 ch » [archive], Autonews, 30 septembre 2015 (consulté le 1er octobre 2015).
- [20]. Wikipédia-Tesla Model X
- [21]. « La Tesla Model 3 à Genève » [archive], sur <http://www.moteurnature.com> [archive], 9 mars 2018
- [22]. La Voiture Electrique, Comme alternative réaliste à la voiture à essence, Juin 2007.
- [23]. Nicolas Romani, « Modélisation et Commande du Système d’Alimentation en Air pour 1 Module de Puissance d’un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007
- [24]. JANIANUD N. «Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l’optimisation de l’autonomie des performances et des couts associes »Thèse de doctorat, école de formation supérieur Supléc, 2011
- [25]. DC/AC = (Direct Current / Alternative Current) Convertisseur Continu / Alternative
- [26]. Le synoptique d'une chaîne de traction [Hartani, 2007] [Chapitre 1 Représentation de la chaîne de traction d’un véhicule électrique].
- [27]. Michel. Kant "La voiture électrique " Technique de l’ingénieur ; D5 560.
- B .GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d’un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.
- [28]. K. Hartani," Commande de roues motrices d'un véhicule électrique", Thèse Magister USTO .Octobre 2003
- [29]. A. Laguidi, "Réalisation, Conception et Commande d’un Véhicule Electrique", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [30]. H.CHENNOUFI "Contribution à l’Etude de la Commande d’un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices",Thèse Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Février 2005.
-

-
- [31]. B .GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.
- [32]. Bernard MULTON, Laurent HIRSINGER " Problème De La Motorisation D'un Véhicule Electrique ", Ecole normale supérieure de Cachan, d1375Revue 3E.I n°5 mars 96 pp.55-64.
- [33]. Mr. BOUCHA ABDELLAH « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué » Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
- [34]. Mr. MEZIANI SIF EDDINE et Mr. BOURENANE ANIS « Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation » Master en électrotechnique Option Commande des systèmes électriques, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA
- [35]. TARAFT S. « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » ; Mémoire de Magister en Electrotechnique à l'Université de Bejaia, 2008.
- [36]. BABOURI R. «Contrôle, commande de la machine asynchrone à double alimentation dans les quatre quadrants couple-vitesse». Université de Bejaia, Travail de fin d'étude 2010.
- [37]. ELBIA Y. «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», Mémoire de Magister , l'Université de Batna, 2009.
- [38]. Mr. MEZIANI SIF EDDINE et Mr. BOURENANE ANIS « Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation » Master en électrotechnique Option Commande des systèmes électriques, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA.
- [39]. Chapitre 1 Représentation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique
- [40]. Mr. BOUCHA ABDELLAH « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [41]. Chapitre : Représentation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, page 14-15.
- [42]. Représentation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, page 15-16.
- [43]. JANIANUD N. «Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie des performances et des couts associés »Thèse de doctorat, école de formation supérieur Supléc, 2011

-
- [44]. TRICHLER. P «Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole» Thèse doctorale le 22-octobre-2010
- [45]. Dr. Ernest H. Wakefield . The electric phoenix an illustrated history of electric cars, motors, controllers and batteries. Vehicular Technology Conference,1978. 28th IEEE Volume: 28 Digital Object Identifier 10.1109/VTC.1978.1622512 Publication Year: 1978, pp: 73. 74
- [46]. Joseph Beretta pp-47, « Le génie électrique automobile (la traction électrique) »
- [47]. MOSDALE Renault, « Transport électrique routier Batteries pour véhicules électriques »Techniques de l'ingénieur Référence D5565 / Date de publication : 10 févr. 2003.pp.3.4.
- [48]. Mr Ahmed BOUCHERIT « Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources », DOCTEUR DE L.UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD, SCIENCES POUR L.INGENIEUR, Université de Technologie de Belfort –Montbéliard, le 16 décembre 2011, page 22-23.
- [49]. Nouh Aiman, « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers ». Thèse doctorat 26 mars 2008.
- [50]. MOSDALE Renault, « Transport électrique routier Batteries pour véhicules électriques »Techniques de l'ingénieur Référence D5565 / Date de publication : 10 févr. 2003.pp.3.4.
- [51]. <http://www.sherpa-eng.com/IMG/gif/pac1.gif>
- [52]. A. Laguidi, "Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [53]. M. PORNIN «Traction électrique automobile routière », Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, juin 1981.
- [54]. 68 Mr. BOUCHA ABDELLAH « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
- [55]. J. BELHADJ, « Commande Direct du Couple d'une Machine Asynchrone : Structures d'observation, Application aux systèmes multi machines multi convertisseurs », Thèse de Doctorat, INPT et ENIT, Tunis, 2001.
- [56]. R. TRIGUI, « Motorisation Asynchrone pour Véhicule Electrique », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Paris, 1997.

[57]. User Manual, "DSP Based Electric Drives Laboratory", Department of Electrical and Computer Engineering University of Minnesota.

[58]. 73 Mustapha KHELIFI, Ahmed SEKOUR, « Etude de la carte DSPACE DS1104 », Projet de Fin d'Etudes, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006

[59]. B. GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.

[60]. "Cours Sur les Hacheur", Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle.

[61]. R. TRIGUI, "Motorisation Asynchrone pour Véhicule Electrique", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Paris, 1997.

Le coefficient μ dépend également de la nature des surfaces en contact 80 (Tableau (II-1))

80 M. PORNIN "Traction électrique automobile routière ", Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, juin 1981.

[62]. Diego Corcoba Fernández « Control y modelado de vehículo híbrido basado en baterías y supercondensador », Dpto. de Sistemas y Automática Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018

[63]. Dr. D. JOSÉ CARPIO IBÁÑEZ, «MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO E HÍBRIDO PARALELO POR MEDIO DE MATLAB/SIMULINK Y PLANIFICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ALGORITMOS GENÉTICOS », DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, CONTROL, TELEMÁTICA Y QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA 2017.