

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيا الصناعية

- عنابة -

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIÈRE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Gestion d'énergie d'une chaîne d'alimentation hybride dans un véhicule électrique

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

BOUMELITA Maroua

FEDDAOUI Maroua

Sous la direction de :

TEGANI Ilyes

Grade

MCB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

HOUABES Mourad

Pr.

ESTI Annaba

Examineurs :

DEKHANE Azzeddine

MCB

ESTI Annaba

DJELLAL Adel

MCB

ESTI Annaba

Résumé

Ce travail de fin d'étude porte sur la gestion d'énergie d'une chaîne d'alimentation hybride dans un véhicule électrique, le premier axe de ce mémoire était orienté à la gestion d'énergie du système de propulsion du véhicule électrique et le second étant la régulation de la tension du bus continu.

La première partie de l'étude a concentré sur la description générale du véhicule électrique ainsi que la modélisation et le dimensionnement des sources d'énergie qui sont les batteries, les cellules photovoltaïques et les supercondensateurs, afin d'alimenter un moteur électrique synchrone à aimant permanent. La deuxième partie était destinée à développer une stratégie de commande basée sur la notion de platitude avec des régulateurs PID classique associés aux différents convertisseurs raccordés aux sources de notre chaîne d'alimentation hybride.

Le système a été simulé par le matlab/simulink et les résultats obtenus durant la simulation ont montrés la bonne gestion d'énergie de notre chaîne d'alimentation hybride et le bon contrôle de la tension du bus continu.

Mots clés:

Gestion d'énergie, véhicule électrique, tension du bus continu, modélisation, dimensionnement, sources d'énergie, notion de platitude, régulateur PID.

Abstract

This study deals with the energy management of a hybrid power supply chain in an electric vehicle. The first axis of this thesis was oriented to the energy management of the propulsion system of the electric vehicle and the second was the regulation of the DC bus voltage.

The first part of the study focused on the general description of the electric vehicle as well as the modeling and dimensioning of the energy sources which are batteries, photovoltaic cells and supercapacitors, in order to supply a permanent magnet synchronous electric motor. The second part was intended to develop a control strategy based on notion of flatness with classical PID regulators associated with the different converters connected to the sources of our hybrid power supply chain.

The system was simulated by the matlab/simulink and the results obtained during the simulation showed the good energy management of our hybrid power supply chain and the good control of the DC bus voltage.

Keywords:

Energy management, electric vehicle, DC bus voltage, modeling, dimensioning, energy sources, flatness notion, PID regulator.

ملخص

يركز عمل نهاية الدراسة هذا على تسيير الطاقة لسلسلة إمداد هجينة في سيارة كهربائية، و كان المحور الأول من هذه الأطروحة موجهًا لتسيير الطاقة لنظام دفع في سيارة كهربائية و الثاني هو تنظيم جهد ناقل التيار المستمر.

ركز الجزء الأول من الدراسة على الوصف العام للسيارة الكهربائية و كذلك نمذجة مصادر الطاقة و تحجيمها و هي البطاريات، الخلايا الكهروضوئية و المكثفات الفائقة من أجل تزويد محرك كهربائي متزامن مغناطيسي دائم. الجزء الثاني كان يهدف إلى تطوير إستراتيجية تحكم تستند إلى مفهوم التسطیح مع المنظمات PID الكلاسيكية المرتبطة بالمحولات المختلفة المتصلة بمصادر سلسلة إمداد الطاقة الهجينة الخاصة بنا. تمت محاكاة النظام بواسطة `matlabsimulink` و أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أثناء المحاكاة التسيير الجيد للطاقة لسلسلة إمداد الهجينة و التحكم الجيد في جهد ناقل التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية:

إدارة الطاقة، السيارة الكهربائية، جهد ناقل التيار المستمر، النمذجة، التحجيم، مصادر الطاقة، مفهوم التسطیح، منظم PID.

Remerciement

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens, tout d'abord, à remercier sincèrement mon directeur de mémoire Monsieur TEGANI Ilyes, pour l'orientation, la confiance, la patience et l'encouragement qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de jury de soutenance.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur HOUABES Mourad, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Je tiens à remercier également Messieurs DEKHLANE Azzeddine et DJELLAL Adél pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail du mémoire.

Je dédie mon travail à ma mère et mon père, qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mon parcours scolaire et universitaire. Je remercie également mes amis et ma famille.

Enfin, Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction Générale	1
1. Principes fondamentaux des véhicules électriques	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Historique du véhicule électrique	4
1.3 Description générale du véhicule.....	7
1.3.1 Force de roulement	8
1.3.2 Force aérodynamique.....	9
1.3.3 Force d'inclinaison.....	10
1.3.4 Force d'accélération.....	10
1.4 La puissance de traction.....	11
1.5 La consommation d'énergie.....	12
1.6 Les véhicules électriques	13
1.7 Les architectures des véhicules électriques.....	14
1.7.1 Véhicules électriques mono-moteur	14
1.7.2 Véhicules électriques multi-moteur	14
1.8 Les véhicules à énergie solaire	15
1.9 Le concept d'hybridation	15
1.10 Le taux d'hybridation.....	16
1.11 Classification des véhicules électriques hybrides	16
1.11.1 Micro Hybrid Electric Vehicles.....	17

1.11.2 Mild Hybrid Electric Vehicles	17
1.11.3 Full Hybrid Electric Vehicles	18
1.11.4 Plug-in Hybrid Electric Vehicles	19
1.12 Les configurations principales des véhicules électriques hybrides.....	19
1.12.1 Configuration hybride série	20
1.12.2 Configuration hybride parallèle	21
1.12.3 Configuration hybride série-parallèle	22
1.13 Conclusion	23
2. Sources d'alimentation des véhicules électriques	24
2.1 Introduction.....	23
2.2 Batterie électrochimique	23
2.2.1 La batterie au plomb	24
2.2.2 La batterie à base de nickel	25
2.2.3 La batterie au lithium	27
2.2.4 Modèle électrique d'une batterie	29
2.3 Supercondensateurs.....	30
2.3.1 Principes de base des supercondensateurs	31
2.3.2 Modèle électrique de supercondensateur	31
2.4 Source photovoltaïque	33
2.4.1 La cellule solaire	33
2.4.2 Caractéristique électrique.....	34

2.4.3 Circuit électrique équivalent	34
2.4.4 Le mécanisme de la conversion photovoltaïque	36
2.4.5 Rendement de la cellule photovoltaïque	37
2.4.6 Les caractéristiques : courant- tension et puissance– tension.	38
2.4.7 Les différents types de cellules solaires.....	39
2.4.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	43
2.5 Véhicule en utilisant une source photovoltaïque	44
2.5.1 L'évolution des voitures solaires	44
2.5.2 Le fonctionnement	47
2.5.3 La composition.....	47
2.5.4 Avantages et inconvénients d'un véhicule en utilisant la source PV.....	48
2.6 Hybridation des sources d'énergie embarquées.....	49
2.6.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie	49
2.6.2 Bilan et choix de l'hybridation	50
2.7 Conclusion	51
3. Gestion de l'énergie des sources hybrides.....	52
3.1 Introduction.....	53
3.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride	53
3.2.1 Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost)	53
3.2.2 Modélisation du convertisseur Buck-Boost.....	56
3.3 Régulateur du courant des convertisseurs.....	58

3.3.1 Principe du contrôleur PID (Proportionnel Intégral Dérivé)	58
3.4 Stratégie de commande du système hybride proposé	59
3.4.1 Notion de la commande par platitude	59
3.4.2 Régulation de l'énergie du système hybride	60
3.4.3 Démonstration de la platitude du système hybride proposée	61
3.4.4 Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence	63
3.5 Schéma de commande de système hybride.....	64
3.6 Dimensionnement d'un moteur électrique destiné à une voiture	64
3.6.1 Caractéristiques mécaniques requises pour l'entraînement d'un véhicule roulant	66
3.7 Dimensionnement des sources	67
3.7.1 Dimensionnement de la source PV	68
3.7.2 Dimensionnement des batteries	68
3.7.3 Dimensionnement des supercondonstateurs	69
3.8 Dimensionnement des convertisseurs	71
3.8.1 Cahier de charge	71
3.8.2 Dimensionnement du convertisseur boost (source photovoltaïque)	71
3.8.3 Dimensionnement du convertisseur boost (batteries)	72
3.8.4 Dimensionnement du convertisseur buck-boost (supercondensateurs)	74
3.9 Résultats de simulation	76
3.10 Conclusion	87
4. Conclusion Générale	88

Liste des figures

Figure1.1 Première voiture au monde[2].	5
Figure1.2 La jamais contente[2].	5
Figure1.3 La première voiture hybride [2].	5
Figure1.4 La prius [2].	6
Figure1.5 La Nissan LEAF[2].	7
Figure1.6 Bilan des forces agissant sur le véhicule [2].	7
Figure1.7 La force de roulement sur la roue[2].	8
Figure1.8 Force aérodynamique pour différentes valeurs de C_x [2].	9
Figure1.9 Pente sur la route[2].	10
Figure1.10 Solution monomoteurs[2].	14
Figure1.11 Solution multi-moteurs[2].	15
Figure1.12 Classification des véhicules suivant le taux d'hybridation[9].	16
Figure1.13 Schéma de principe de l'architecture hybride série[10].	20
Figure1.14 Schéma de principe de l'architecture hybride parallèle[10].	21
Figure1.15 Schéma de principe de l'architecture hybride série-parallèle[10].	22
Figure2.1 Une cellule typique d'une batterie électrochimique[11].	24
Figure2.2 Le circuit équivalent de la batterie[4].	29
Figure2.3 Principe de construction d'un supercondensateur[13].	31
Figure2.4 Modèle d'un élément supercondensateur[13].	32
Figure2.5 Circuit équivalent du module de supercondensateurs[13].	32
Figure2.6 Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire[16].	34
Figure2.7 Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement[14].	34
Figure2.8 Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle[14].	36
Figure2.9 Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairement[18].	37
Figure2.10 Caractéristique courant-tension.	39

Figure2.11 Caractéristique puissance-tension.....	39
Figure2.12 Cellule monocristallin[14].....	40
Figure2.13 Cellule poly-cristallin[14].....	40
Figure2.14 Cellule amorphe[14].....	41
Figure2.15 Cellule CISG.....	41
Figure2.16 Cellule CdTe.....	42
Figure2.17 Cellule GaAs.....	42
Figure2.18 Cellule organique.....	43
Figure2.19 Le premier véhicule solaire de l’histoire[19].	45
Figure2.20 Le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain[19].	45
Figure2.21 L’IMMORTUS D’EVX [20].....	46
Figure2.22 MÖ DU CONSTRUCTEUR ESPAGNOL EVOVELO (2016)[20].	47
Figure2.23 Diagramme de Ragone[21].....	50
Figure3.1 Architecture d'un convertisseur Boost idéal.	53
Figure3.2 Schéma de principe du convertisseur Buck/Boost	56
Figure3.3 Schéma fonctionnel d’un régulateur PID associé à un convertisseur.....	59
Figure3.4 Schéma de commande de système hybride.	64
Figure3.5 Profil de la charge (scénario 1).	76
Figure3.6 les puissances générées par les deux sources employées.	77
Figure3.7 Profil de la charge (scénario 2).	78
Figure3.8 Tension du bus continu.	78
Figure3.9 Energie du bus continu et sa référence.	79
Figure3.10 Variation de l'énergie électrostatique dans le bus continu.....	79
Figure3.11 Puissance produite par la source primaire (batterie).	80
Figure3.12 Puissance produite par la source (PV).	81
Figure3.13 Puissance des supercondensateurs (SC).	81
Figure3.14 Energie fournit par les supercondensateurs et sa référence.....	82
Figure3.15 les puissances générées par les différentes sources employées.....	82
Figure3.16 Courant des supercondensateurs et le courant demandé par la commande plate.	84
Figure3.17 Tension des supercondensateurs.....	84
Figure3.18 Courant de la batterie et le courant demandé par la commande plate.	85
Figure3.19 Tension de la batterie.....	85

Figure3.20 Courant de la source PV et le courant demandé par la commande plate..86

Figure3.21 Tension de la source PV.86

Liste des tableaux

Tableau2.1 Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[11].	25
Tableau2.2 Avantages et inconvénients de la batterie au plomb[4].	25
Tableau2.3 Avantages et inconvénients de la NiCd[4].	26
Tableau2.4 Avantages et inconvénients de la NiMH[4].	27
Tableau2.5 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium-Polymère[4].	28
Tableau2.6 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium-ion[4].	29
Tableau3.1 Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique[22].	58
Tableau3.2 le cahier de charge.	65
Tableau3.3 les grandeurs nécessaires pour le dimensionnement du moteur électrique	66
Tableau3.4 les caractéristiques du moteur choisi.	67
Tableau3.5 Paramètre de la source photovoltaïque utilisée.	68
Tableau3.6 Paramètre de la batterie utilisée	68
Tableau3.7 Paramètre du supercondensateur utilisé	69
Tableau3.8 Résumé des résultats	76

Introduction Générale

Introduction Générale

Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Ce qui conduit à des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules.

Les véhicules tout électriques ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels, d'où le développement d'un autre concept : les véhicules hybrides.

Un véhicule hybride met en œuvre, par définition au moins deux sources d'énergie différentes pour combiner les avantages de chaque organe et ainsi, améliorer les performances du système en termes d'autonomie, de temps de recharge, de masse, de coûts, et même de durée de vie.

L'hybridation s'avère une des alternatives prometteuses à court et moyen terme. Le fait d'avoir deux types de source permet de récupérer l'énergie et de choisir le point de fonctionnement à meilleur rendement pour la source primaire. Cette dernière est destinée à fournir de l'énergie sur les longs trajets demandant une forte autonomie et à charger l'élément de stockage en cas de besoin.

La présence d'une source d'énergie secondaire introduit des degrés de liberté supplémentaires dans la répartition de la puissance demandée notamment en raison de la réversibilité et de la possibilité de récupérer l'énergie de freinage. Cette répartition doit satisfaire la demande de puissance du moteur électrique et respecter les contraintes énergétiques du système.

Cette combinaison est supposée répondre aux exigences de réduction de la consommation de carburant et d'émission de polluants.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous étudions le problème de gestion d'énergie dans un véhicule électrique et nous proposons de nouvelle approche pour résoudre ce problème.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons aux véhicules électriques hybrides rechargeables (plug-in), avec trois sources d'énergie : la batterie comme

source primaire d'énergie, les cellules photovoltaïques comme source auxiliaire et les super-condensateurs comme source de stockage.

La résolution du problème de gestion d'énergie prend deux dimensions : la première dimension traite le problème de dimensionnement des sources d'énergie, avec la détermination de leurs caractéristiques et de leurs performances.

La deuxième dimension traite le problème des stratégies de gestion qui consiste à trouver la meilleure répartition de la puissance à fournir par les différentes sources d'énergie.

Structure du mémoire

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous mettons l'accent sur les véhicules électriques. Dans un premier temps, nous abordons en détail des généralités sur les véhicules électriques : leurs définitions, histoires, descriptions, avantages et inconvénients et architectures. Dans un deuxième temps, nous abordons les véhicules hybrides, nous définissons le concept d'hybridation, le taux d'hybridation ainsi que les différentes configurations des véhicules hybrides.

Le second chapitre a été consacré à la présentation des sources d'alimentations des véhicules électriques. Nous débutons par une définition de chaque type des sources. Puis nous abordons leur principe de fonctionnement, les types de chaque sources, leurs modélisations électriques et leurs avantages et inconvénients. Ensuite le principe d'hybridation est détaillé. Enfin les paramètres clés pour le choix de l'hybridation sont présentés.

Le dernier chapitre traite la gestion d'énergie entre les différentes sources constituant notre chaîne d'alimentation hybride. D'abord, nous abordons la modélisation et la commande des convertisseurs associés aux sources d'énergie. Ensuite une stratégie de commande qui se base sur la notion de platitude est présentée. Après avoir dimensionné le moteur destiné à notre voiture électrique, nous faisons le dimensionnement des sources dont le but est de satisfaire la puissance demandée par la charge. Enfin les résultats de simulation par Matlab/Simulink de la stratégie de commande pour la gestion du flux d'énergie seront donnés et discutés.

Chapitre 1

Principes fondamentaux des véhicules

électriques

Introduction

L'objet de ce premier chapitre est de présenter les véhicules à traction électrique. Après un rappel historique sur l'évolution chronologique du véhicule électrique, nous présenterons une description générale du véhicule. Nous aborderons aussi les notions de la puissance de traction et la consommation d'énergie dans un véhicule électrique. Ensuite, nous définirons les véhicules électriques ainsi que leurs architectures principales. En outre, nous aborderons les véhicules à énergie solaire. Après, nous définirons le concept d'hybridation et le taux d'hybridation. Ainsi, une classification des véhicules électriques hybrides aura été faite. Finalement, nous présenterons les différentes configurations des véhicules hybrides.

1.1 Historique du véhicule électrique

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la voiture électrique n'est pas une nouveauté. En réalité, elle était déjà présente aux débuts de l'automobile à la fin du XIXe siècle. Cependant, même si le marché de la voiture électrique semble décoller enfin aujourd'hui (le nombre d'immatriculations a augmenté de 20% en 2014), il a connu des années difficiles. Retour sur une histoire mouvementée [1] :

- Dans les années 1830 (1832-1839), le premier véhicule électrique fit son apparition. L'homme d'affaires écossais Robert Anderson fut la première personne à avoir inventé une voiture électrique. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique[2].
- Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique[2].
- Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h[2].
- En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881[2].
- En 1884, Thomas Parker assis dans la première voiture électrique au monde. On voit sur la photo de la figure (1.1)[2].

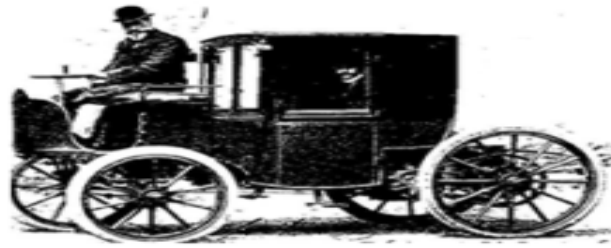


Figure1.1 Première voiture au monde[2].

- En 1899 en Royaume-Uni, « La Jamais Contente », la première voiture électrique qui a dépassé les 100 km/h a été construite[3]. La voiture était pilotée par le Belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille (Figure 1.2)[2].

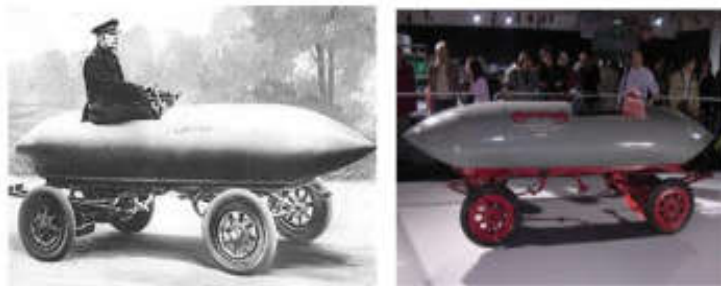


Figure1.2 La jamais contente[2].

- Dès 1900, la voiture électrique a connu ses beaux jours. En circulation, plus que le tiers des voitures sont électriques et le reste étant des voitures à essence et à vapeur[2].
- Dans les années 1920, certains facteurs comme la faible autonomie, la vitesse trop basse, le manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et le prix deux fois plus élevé que celles à essence, ont mené au déclin de la voiture électrique[2].
- En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (Général Motors) (Figure 1.3)[2].



Figure1.3 La première voiture hybride [2].

- En 1976, « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act » a été adopté par le Congrès américain, qui a permis de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides[2].
- Dès 1988, la société automobile Général Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998[2].
- En 1997, Toyota lance la Prius (Figure 1.4), la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride [3].



Figure1.4 La prius [2].

- De 1997 à 2000, de nombreux modèles électriques hybrides ont été lancés : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV[2].
- Cependant à partir de 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1, GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation. Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières[2].
- En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et en Avril 2010 pour les clients individuels, puis on a commencé à la vendre au public Hongkongais en mai 2010[2].
- En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) la voiture électrique à cinq places annoncée qui a été déjà annoncé en 2009, a pu être commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et en arrivant aux marchés européens la fin 2011 (Figure 1.6)[2].



Figure1.5 La Nissan LEAF[2].

Aujourd'hui la plupart des grands constructeurs proposent au moins un modèle de véhicule électrique : BMW, Volkswagen, Kia, Chevrolet, Fiat, Audi... pour en citer que quelques uns. D'après les prévisions des experts, en 2020 le marché de la voiture électrique représentera 0,9 % de la production mondiale [1].

1.2 Description générale 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[2]. Le comportement d'un véhicule en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par toutes les forces qui lui agissent dans cette direction. La figure (1.6) montre les forces agissant sur un véhicule dans une pente[2].

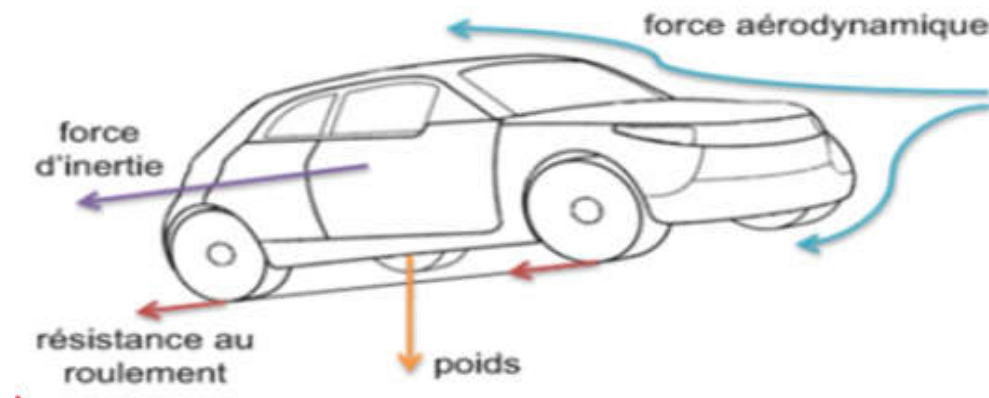


Figure1.6 Bilan des forces agissant sur le véhicule [2].

- L'appliquant de deuxième loi de Newton nous donne :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_{tr} - \sum F_r}{M_v \delta} \quad (1.1)$$

V : la vitesse du véhicule

F_{tr} : l'effort de traction totale du véhicule

F_r : la résistance totale

M_v : la masse totale du véhicule

δ : Facteur de masse

- L'effort total de traction d'un véhicule peut se décomposer en :

$$F_{tot} = F_r + F_a + F_g + F_{acc} \quad (1.2)$$

F_r : force de résistance de roulement des roues

F_a : force aérodynamique

F_g : force d'inclinaison

F_{acc} : force d'accélération

1.2.1 Force de roulement

La force de résistance de roulement F_r est produite par le pneu au contact de la surface de la chaussée, elle est liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement ce coefficient de roulement C_{rr} vaut environ 0.01, il dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier [2].

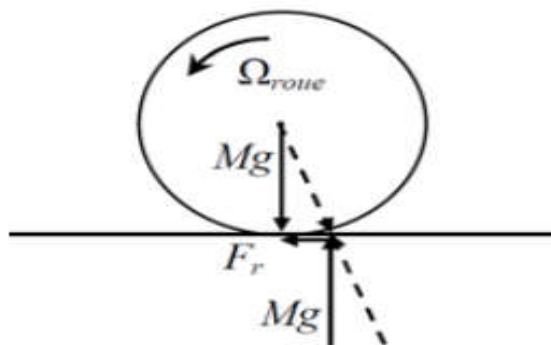


Figure1.7 La force de roulement sur la roue[2].

Si les pneus avant sont différents des pneus arrière, l'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_r = (C_{rr}m_{av} + C_{rr}m_{ar})g = M_v g C_{rr} \quad (1.3)$$

m_{av} et m_{ar} : les masses portées par les roues avant et arrière.

M_v : La masse totale véhicule.

1.2.2 Force aérodynamique

La force aérodynamique est proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air C_x . Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S_f C_x (V - V_{vent})^2 \quad (1.4)$$

ρ : densité volumique de l'air, en générale pris égal à 1,28(kg/m³).

S_f : section frontale du véhicule.

V : vitesse du véhicule.

V_{vent} : vitesse du vent, qui a un signe positif lorsque cette composante est opposée à la vitesse du véhicule et un signe négatif lorsqu'elle est dans le même sens que la vitesse du véhicule [4].

Le coefficient C_x peut être estimé à [2]:

- 0.2 pour un véhicule ayant un très bon profil.
- 0.3 pour un véhicule ayant un bon profil.
- 0.5 pour un véhicule typique.
- 0.7 pour une camionnette.

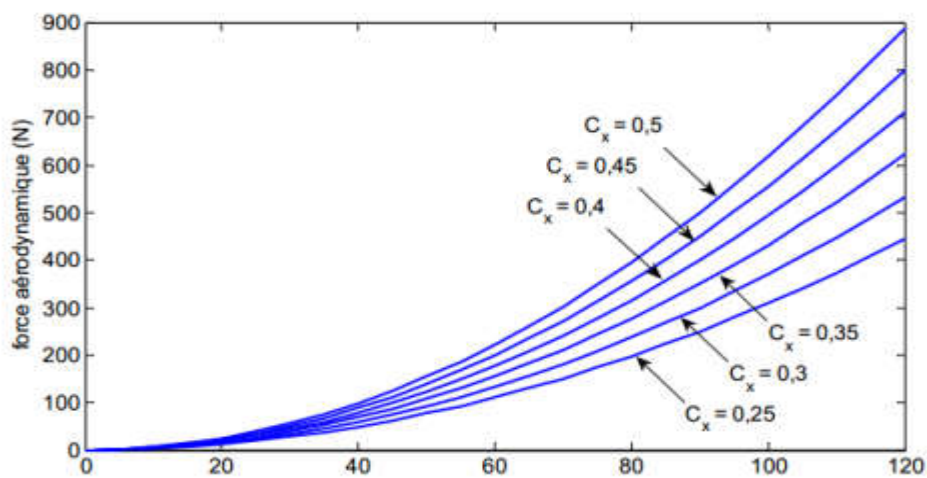


Figure1.8 Force aérodynamique pour différentes valeurs de C_x [2].

1.2.3 Force d'inclinaison

C'est la force de résistance due à la pente d'angle α_p à gravir (force liée au profil de la route). Pour caractériser le profil de la route sur un parcours donné, il faut cartographier la pente en fonction de la distance et déterminer ce qui permet de déduire la pente à chaque instant [2].

$$F_g = M_v g \sin(\alpha_p) \quad (1.5)$$

α_p : L'angle de la pente.

Pour simplifier les calculs, $\sin(\alpha_p)$ est souvent remplacé par la pente « p » pour $p < 20\%$:

$$F_g = M_v g p \quad (1.6)$$

La pente en (%) est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance de 100 mètres :

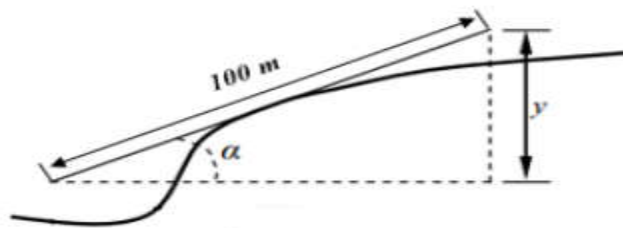


Figure1.9 Pente sur la route[2].

Si y représente l'élévation verticale, la pente (%) est donnée par la relation suivante[5]:

$$p(\%) = \frac{y(m)}{100} 100\% \quad (1.7)$$

1.2.4 Force d'accélération

La force due à l'accélération F_{acc} assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur, cette force est obtenue par le produit entre la masse de véhicule et l'accélération imposée par le conducteur [2].

$$F_{acc} = \delta M_v \frac{dv}{dt} = \delta M_v \gamma \quad (1.8)$$

Avec :

γ : L'accélération de véhicule.

Où δ est appelé "facteur de masse", il est défini par :

$$\delta = 1 + \frac{i_w}{M_v r^2} \quad (1.9)$$

i_w est le moment angulaire total des roues.

À partir de (1.7), le temps d'accélération, t_a , et la distance, S_a , de la vitesse basse V_1 à la vitesse haute V_2 peuvent être écrits, respectivement, comme

$$t_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{M_v \delta V}{(P_t/V) - M_v g f_r - \left(\frac{1}{2}\right) \rho C_x S_f V^2} dV \quad (1.10)$$

$$S_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{M_v \delta}{(T_p i_g i_0 \eta_t / r) - M_v g f_r - \left(\frac{1}{2}\right) \rho C_x S_f V^2} dV \quad (1.11)$$

Il est difficile d'obtenir la solution analytique à partir de (1.9), c'est pourquoi les méthodes numériques sont généralement utilisées. Pour une évaluation de temps l'accélération par rapport à la puissance de traction P_t , on peut ignorer la résistance au roulement et la traînée aérodynamique et obtenir :

$$t_a = \frac{\delta M_v}{2 P_t} (V_2^2 + V_1^2) \quad (1.12)$$

Où le facteur de masse du véhicule (δ) est une constante.

1.3 La puissance de traction

La puissance de traction, P_t , peut alors être exprimée comme :

$$P_t = \frac{\delta M_v}{2 t_a} (V_2^2 + V_1^2) \quad (1.13)$$

Pour déterminer avec précision la puissance de traction nominale, il faut tenir compte de la puissance consommée pour surmonter la résistance au roulement et la traînée dynamique. La puissance de traînée moyenne pendant l'accélération peut être exprimée comme suit :

$$P_{\text{trainée}} = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} (M_v g f_r V + \frac{1}{2} \rho C_x S_f V^2) dV \quad (1.14)$$

La vitesse du véhicule V peut être exprimée en utilisant le temps t , comme suit :

$$V = V_2 \sqrt{\frac{t}{t_a}} \quad (1.15)$$

En substituant (1.14) à (1.13) et en intégrant, on obtient :

$$P_{\text{trainée}} = \frac{2}{3} M_v g f_r V_2 + \frac{1}{5} \rho C_x S_f V_2^3 \quad (1.16)$$

Enfin, la puissance mécanique totale de traction pour l'accélération du véhicule de V_1 à la vitesse V_2 en t secondes peut être obtenue comme suit :

$$P_t = \frac{\delta M_v}{2 t_a} (V_2^2 + V_1^2) + \frac{2}{3} M_v g f_r V_2 + \frac{1}{5} \rho C_x S_f V_2^3 \quad (1.17)$$

1.4 La consommation d'énergie

L'unité d'énergie utilisée dans les transports est généralement le kilowattheure (kWh). La Consommation d'énergie par unité de distance en kWh/km est généralement utilisée pour évaluer la consommation d'énergie du véhicule. Cependant, pour les véhicules à moteur à combustion interne, l'unité couramment utilisée est une unité physique de carburant volume par unité de distance, par exemple litres par 100 km (l/100 km)(miles par gallon (mpg)in USA). En revanche, pour les VE à batterie, la consommation d'énergie initiale en kWh, mesurée aux bornes de la batterie, est plus appropriée.

L'énergie de la batterie « la capacité » est généralement mesurée en kWh et l'autonomie par charge de batterie peut être facile à calculer[6].

La consommation d'énergie est une intégration de la puissance de sortie aux bornes de la batterie. Pour la propulsion, la puissance de sortie de la batterie est égale à la puissance de résistance et à toutes les pertes de puissance dans la transmission et l'entraînement du moteur, y compris les pertes de puissance dans l'électronique. Les pertes de puissance dans la transmission et l'entraînement du moteur sont représentées par leurs rendements η_t et η_m , respectivement[4]. Ainsi, la puissance de sortie de la batterie peut être exprimée comme suit:

$$P_{\text{Bout}} = \frac{V}{\eta_m \eta_t} \left[(M_v g f_r + i) + \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right] \quad (1.18)$$

Dans ce cas, la charge non-tractionnelle (charge auxiliaire) n'est pas incluse. Dans certains cas, les charges auxiliaires peuvent être trop importantes pour être ignorées et doivent être ajoutées à la charge de traction.

Lorsque le freinage par récupération est efficace sur un VE, une partie de cette énergie de freinage (gaspillée dans les véhicules classiques) peut être récupérée en faisant fonctionner le moteur d'entraînement comme un générateur et en le restituant dans les batteries. La puissance de freinage par récupération aux bornes de la batterie peut également être exprimée comme suit[4] :

$$P_{Bin} = \frac{\beta V}{\eta_m \eta_t} \left[(M_v g f_r + i) + \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right] \quad (1.19)$$

Où la pente de la route i ou l'accélération dV/dt ou les deux sont négatives, et β ($0 < \beta < 1$) est le pourcentage de l'énergie de freinage totale qui peut être appliquée par le moteur électrique, appelé facteur de freinage régénératif. Le facteur de freinage régénératif β est fonction de la force de freinage appliquée et de la conception de la chaîne cinématique. La consommation nette d'énergie des batteries est de :

$$E_{out} = \int_{traction} P_{Bout} dt + \int_{freinage} P_{Bin} dt \quad (1.20)$$

1.5 Les véhicules électriques

Les véhicules électriques (VE) fonctionnent uniquement à l'énergie électrique. Actuellement, la plupart des véhicules électriques utilisent des batteries au lithium-ion comme système de stockage de l'énergie, avec une prise pour se connecter au réseau électrique afin de charger la batterie. La capacité du système de stockage d'énergie joue un rôle crucial dans la détermination de l'autonomie du véhicule électrique. Cependant, l'augmentation de la capacité de stockage d'énergie entraînerait une augmentation de la masse et du volume du véhicule, et nécessiterait également un temps de charge assez long de la batterie sans installation de charge rapide. La plupart des véhicules électriques sur le marché ont une autonomie de 80 à 150 miles, alors que dans un avenir proche, une autonomie de 300 à 400 miles pourrait être obtenue avec un système de batterie de pointe ayant une capacité de stockage de plus de 80 kWh. La limitation de l'autonomie est une préoccupation majeure de ces véhicules électriques à batterie (BEV). Parmi les défis techniques qui empêchent actuellement de progresser dans ce domaine, citons la nécessité de réduire considérablement les temps de recharge et de prévoir avec précision l'énergie restant dans la batterie. À

long terme, un véhicule électrique à pile à combustible pourrait être une solution et pourrait émerger sur les marchés automobiles si les obstacles techniques et économiques restants sont surmontés et si une infrastructure hydrogène est mise en place[7].

1.6 Les architectures des véhicules électriques

1.6.1 Véhicules électriques mono-moteur

L'architecture mono moteur (Figure 1.13) 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)[2].

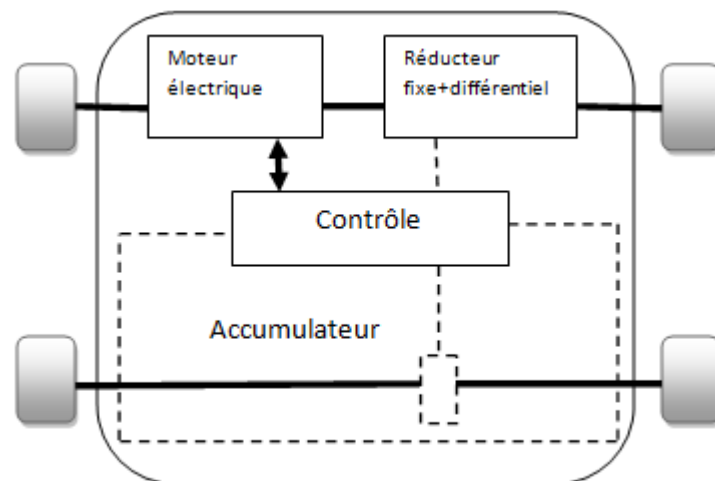


Figure1.10 Solution monomoteurs[2].

1.6.2 Véhicules électriques multi-moteur

Sur les VE multi 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 (Figure 1.14), l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule[2].

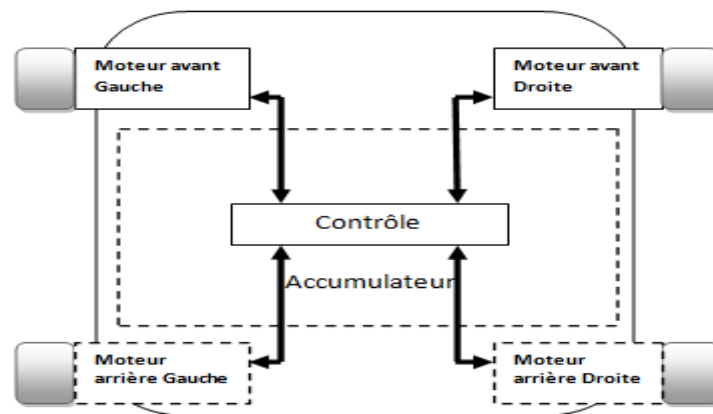


Figure1.11 Solution multi-moteurs[2].

1.7 Les véhicules à énergie solaire

Les véhicules à énergie solaire comme le Honda Dream, qui a remporté le prix mondial de l'énergie solaire en 1996 sont coûteuses et ne fonctionnent efficacement que dans les régions très ensoleillées. La Honda La voiture de Dream Solar a atteint une vitesse moyenne dans toute l'Australie, de Darwin à Adélaïde, de 85 km/h (50 mph). Bien qu'il soit peu probable qu'une voiture de cette nature soit une comme véhicule pour une utilisation quotidienne, les rendements des cellules solaires photovoltaïques sont qui ne cesse d'augmenter alors que leur coût diminue. Le concept d'utilisation de cellules solaires, qui peut être enveloppé à la surface de la voiture pour conserver les batteries d'un véhicule de banlieue est une idée parfaitement réalisable, et à mesure que le coût diminue et que l'efficacité augmente pourrait un jour s'avérer une proposition pratique[8].

1.8 Le concept d'hybridation

Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie différentes. L'hybridation s'avère une des alternatives prometteuses à court et moyen terme. La commission Européenne vise à établir des objectifs nationaux qui se conjugueront pour atteindre un objectif global de 10% de véhicules hybrides en 2020 et 30% en 2030[9].

Actuellement, les véhicules hybrides regroupent le plus souvent un réservoir de carburant et une batterie, associés à des machines de conversion d'énergie telles que

les moteurs à combustion interne et les moteurs électriques. La combinaison de ces deux structures permettra à la fois, d'améliorer le rendement du moteur thermique du véhicule conventionnel, de diminuer sa taille et sa consommation et de limiter la taille de la batterie à bord du véhicule électrique. De plus, le fait d'avoir deux types de source permet de récupérer l'énergie et choisir le point de fonctionnement à meilleur rendement pour la source primaire[9].

1.9 Le taux d'hybridation

Nous appelons Taux d'Hybridation (TH) la part de la puissance que peut fournir la source d'énergie secondaire par rapport à la puissance totale disponible à bord. Pour un véhicule hybride thermique/électrique, le taux d'hybridation est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale exprimée en pourcentage. En allant d'un véhicule thermique (TH=0%), jusqu'au véhicule tout électrique (TH=100%), il existe 3 principales catégories de véhicules électriques hybrides[9].

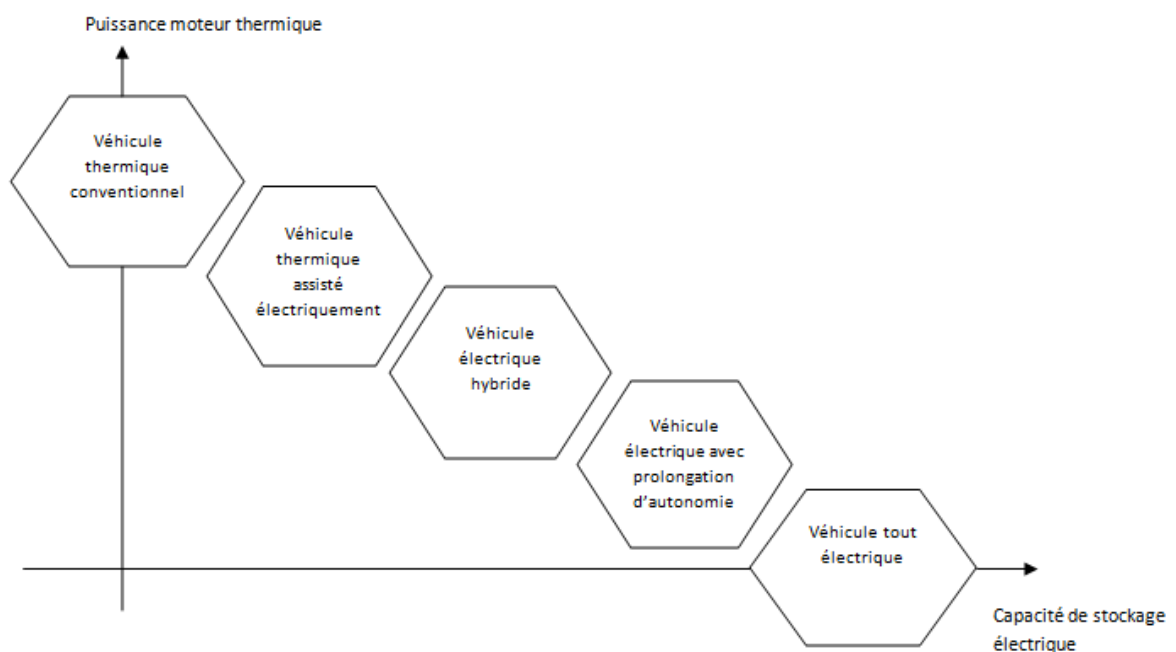


Figure1.12 Classification des véhicules suivant le taux d'hybridation[9].

1.10 Classification des véhicules électriques hybrides

Afin de couvrir les besoins de l'industrie automobile, différents concepts de véhicules électriques hybrides ont été proposés et développés. Selon le degré

d'hybridation, les véhicules électriques hybrides peuvent aujourd'hui être classés en véhicules micro hybrid, mild hybrid, full hybrid et plug-in hybrid electric vehicles[7].

1.10.1 Micro Hybrid Electric Vehicles

Les véhicules électriques micro-hybrides fonctionnent normalement à basse tension, entre 12 V et 48 V. En raison de la faible tension de fonctionnement, la puissance électrique est souvent inférieure à 5 kW, et les véhicules électriques micro-hybrides ont donc principalement une fonction de démarrage et d'arrêt automatique. En cas de freinage et de ralenti, le moteur à combustion interne est automatiquement arrêté, ce qui permet d'améliorer l'économie de carburant de 5 à 10 % en ville. Avec l'augmentation de la capacité de puissance d'une batterie de 12 V, certains véhicules micro hybrides ont même un certain degré de capacité de freinage régénératif et sont capables de stocker l'énergie récupérée dans la batterie.

La plupart des systèmes électriques micro-hybrides sont mis en œuvre grâce à l'amélioration du système alternateur-démarreur, où la disposition conventionnelle des courroies est modifiée et l'alternateur amélioré pour permettre le démarrage du moteur et la recharge de la batterie. Les batteries plomb-acide à régulation par soupapes (VRLA), telles que les batteries à tapis de verre absorbant (AGM) et les batteries au gel, sont largement utilisées dans les véhicules électriques micro-hybrides. Le plus grand avantage du véhicule micro-hybride est son coût réduit, tandis que le principal inconvénient est l'impossibilité de récupérer toute l'énergie de freinage régénérative[7].

1.10.2 Mild Hybrid Electric Vehicles

Par rapport aux véhicules électriques micro-hybrides, les véhicules électriques hybrides doux ont normalement une chaîne de traction électrique indépendante fournissant 5 à 20 kW de puissance de propulsion électrique, et le système de propulsion électrique fonctionne généralement à des tensions comprises entre 48 V et 200 V. Les véhicules électriques hybrides doux peuvent utiliser un moteur électrique pour assister le moteur à combustion interne pendant les phases d'accélération agressives et permettre la récupération de la plupart de l'énergie régénérative pendant les phases de décélération. Les véhicules électriques hybrides doux ont donc une grande liberté pour optimiser l'économie de carburant et les performances du

véhicule, et améliorer le confort de conduite. L'architecture des véhicules électriques hybrides doux est souvent mise en œuvre de plusieurs manières en fonction du degré d'hybridation. Le démarreur-générateur à courroie, couplé mécaniquement via la courroie de l'alternateur de manière similaire aux micro-hybrides, et le démarreur-générateur, couplé mécaniquement via le vilebrequin du moteur, sont des implémentations typiques. Les batteries nickel-hydrure métallique et lithium-ion sont souvent utilisées dans les véhicules électriques hybrides légers. Une caractéristique distinctive des véhicules électriques hybrides doux est que le véhicule ne dispose pas d'un mode de propulsion exclusivement électrique. L'amélioration de l'économie de carburant est principalement obtenue en coupant le moteur lorsque le véhicule s'arrête, en utilisant l'énergie électrique pour démarrer initialement le véhicule, en optimisant les points de fonctionnement du moteur et en minimisant les transitoires du moteur. Les économies de carburant typiques des véhicules utilisant des systèmes de propulsion hybrides légers sont de l'ordre de 15 à 20 %[7].

1.10.3 Full Hybrid Electric Vehicles

Les véhicules électriques entièrement hybrides (HEV) sont également appelés véhicules électriques hybrides puissants. Ici, le système de propulsion électrique a normalement une puissance supérieure à 40 kW et fonctionne à un niveau de tension supérieur à 150 V pour des raisons d'efficacité opérationnelle du système électrique et de taille des composants/câbles. Le groupe motopropulseur électrique d'un véhicule électrique entièrement hybride est capable d'alimenter le véhicule exclusivement pendant de courtes périodes lorsque le moteur à combustion fonctionne avec une efficacité moindre, et le système de stockage d'énergie est conçu pour pouvoir stocker l'énergie de freinage à récupération gratuite pendant divers scénarios de décélération. Ces véhicules peuvent également offrir une autonomie purement électrique allant jusqu'à deux miles afin de répondre à certaines exigences particulières telles que la conduite silencieuse dans certaines zones et l'absence d'émissions pour la conduite dans les tunnels et à l'intérieur. Le scénario d'application idéal pour les véhicules électriques entièrement hybrides est le fonctionnement en continu avec des arrêts et des départs ; ils sont donc largement utilisés comme autobus urbains et camions de livraison. Par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne traditionnels,

l'économie de carburant globale d'un véhicule électrique entièrement hybride en conduite urbaine pourrait s'améliorer de 40 %[7].

1.10.4 Plug-in Hybrid Electric Vehicles

Les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) partagent les caractéristiques des véhicules électriques entièrement hybrides et des véhicules entièrement électriques avec la capacité de charger la batterie par une prise de courant alternatif connectée au réseau électrique. Le groupe motopropulseur électrique des PHEV a normalement une capacité de 80-150 kW qui permet au véhicule de fonctionner en mode exclusivement électrique avec une autonomie de 20-60 miles sur la plupart des trajets quotidiens. Comme pour les Les VEB, un PHEV, utilisent également l'énergie du réseau pour charger la batterie. Pendant un trajet, le véhicule fonctionne normalement d'abord en mode électrique en utilisant l'énergie stockée dans la batterie ; une fois que la batterie est épuisée jusqu'à un certain niveau, le moteur à combustion interne commence à propulser le véhicule et la batterie fournit une énergie électrique supplémentaire et stocke l'énergie de freinage régénératif comme un VEH complet pour améliorer l'économie de carburant et les performances dynamiques et aussi pour réduire les émissions[7].

1.11 Les configurations principales des véhicules électriques hybrides

Il existe deux architectures fondamentales de véhicules électriques hybrides :

- Le véhicule hybride en série, dans lequel le moteur, couplé à un générateur, alimente le générateur pour recharger les batteries et/ou fournir de l'énergie électrique au moteur électrique.

Le moteur, à son tour, fournit tout le couple aux roues.

- Le véhicule hybride parallèle est propulsé soit par un moteur thermique, soit par un moteur électrique, soit par les deux[7].

Le moteur électrique fonctionne comme un générateur pour recharger les batteries pendant la phase de régénération (freinage) ou lorsque le moteur produit plus de puissance que nécessaire pour propulser le véhicule.

Bien qu'il possède les caractéristiques avantageuses des véhicules électriques hybrides en série et en parallèle, Les VHE en série parallèle sont relativement plus compliqués et plus coûteux. Néanmoins, ce système a été adopté par certains véhicules électriques hybrides modernes, en tant que technologies de contrôle et de fabrication avancées peuvent être appliquées[7].

1.11.1 Configuration hybride série

La configuration du véhicule hybride série est la configuration du véhicule dans lequel les deux sources d'énergie alimentent un seul groupe motopropulseur qui propulse le véhicule. Dans ce type de véhicule (Figure 1.10), le moteur thermique est mécaniquement découplé des roues (transmission) et est lié à une génératrice soit sur le même arbre, soit par un assemblage mécanique. La source principale d'énergie assure la recharge de la source secondaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Lors d'une demande d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source secondaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Cette source peut être un moteur diesel ou essence[10].

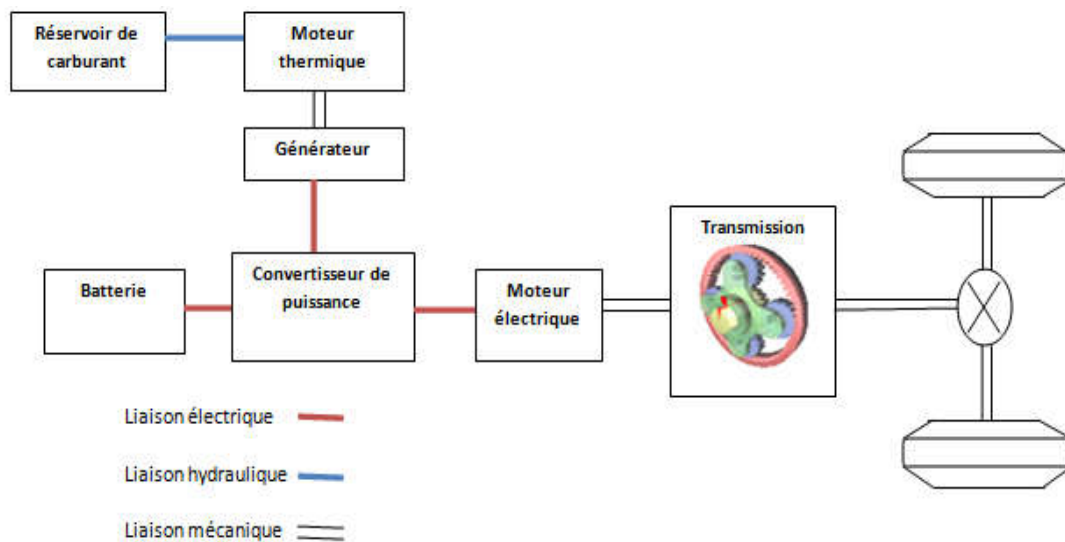


Figure1.13 Schéma de principe de l'architecture hybride série[10].

L'avantage principal de cette structure vient du découplage total entre le moteur thermique et la transmission mécanique, ce qui permet de faire travailler le moteur dans sa plage de rendement maximal ou d'émissions polluantes

minimales[10]. Ainsi la simplicité du groupe motopulseur et l'adaptation aux trajets courts[4, 6].

En revanche, l'inconvénient majeur de l'architecture hybride série est son faible rendement global[2]. En effet, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade de rendement du train moteur est assez défavorable à la réduction de l'énergie consommée[10].

1.11.2 Configuration hybride parallèle

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, les deux moteurs, thermique et électrique, sont liés directement à la transmission et donc aux roues. Ils peuvent participer à la traction du véhicule d'une façon parallèle car les flux énergétiques provenant des deux sources d'énergie arrivent simultanément aux roues. Des liaisons mécaniques entre l'arbre du moteur électrique et l'arbre du moteur thermique via une boîte à vitesse permettent d'assurer la transmission de la puissance aux roues[10].

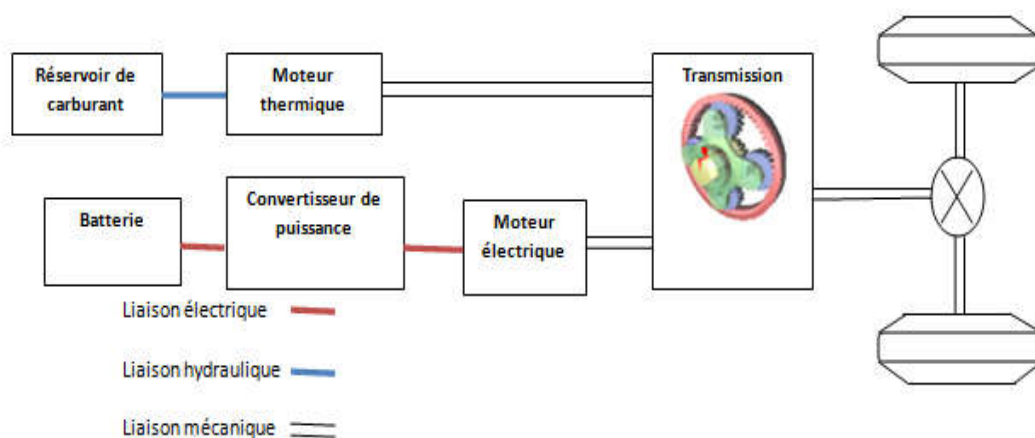


Figure1.14 Schéma de principe de l'architecture hybride parallèle[10].

Cette structure a un rendement global meilleur que l'architecture série.

La taille du moteur thermique peut être réduite, c'est pour cette architecture que l'on obtient une meilleure économie de carburant[10], avec la possibilité de faire

fonctionner le moteur électrique et le moteur thermique ensemble pour des fortes demandes de puissance[4].

L'inconvénient majeur est l'augmentation de la complexité du contrôle car le flux d'énergie doit être régulé et mélangé à partir de deux sources parallèles[4].

1.11.3 Configuration hybride série-parallèle

Cette architecture série-parallèle est appelée aussi « hybride parallèle à dérivation de puissance », elle intègre un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique. Utilisant une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler le régime de fonctionnement avec le maximum de rendement concernant le moteur thermique et de partager la puissance entre les demandes du véhicule (charge) et la recharge de la batterie. Les combinaisons entre les avantages de la configuration série et les avantages de la configuration parallèle permettent de tirer un bon parti de cette configuration. L'architecture série-parallèle nécessite au moins deux moteurs électriques en plus du moteur thermique ce qui la rend onéreuse et augmente la complexité de la structure contrôle commande[10].

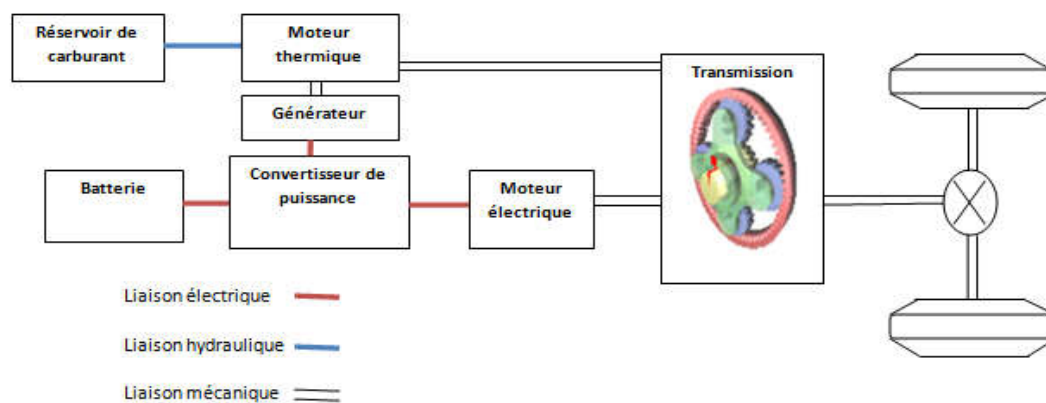


Figure1.15 Schéma de principe de l'architecture hybride série-parallèle[10].

1.11.3.1 Avantages des véhicules hybrides série-parallèle

- grande autonomie et autonomie de déplacement.
- le plus vendu.
- moins polluante.

1.11.3.2 Inconvénients du véhicule hybride série-parallèle

- grande complexité de la chaîne de traction.
- Haute complexité des composants de sa gestion.
- Coût et masse élevés.

1.12 Conclusion

Le véhicule électrique est actuellement le moyen de transport le plus ”propre” qui suscite le plus d’intérêt de la part des constructeurs automobiles et des pouvoirs publics. Son objectif est de pallier aux différents problèmes liés aux véhicules thermiques.

Nous venons de présenter, dans ce chapitre une historique sur le véhicule électrique, et un aperçu sur leur actualité récente. Par la suite nous avons abordé une modélisation dynamique du véhicule électrique à travers une description générale de cette dernière. Nous avons présenté aussi l’expression mathématique de la puissance de traction, ainsi que la notion de la consommation d’énergie dans un véhicule électrique. Après, nous avons défini les véhicules purement électriques et les véhicules à énergie solaire. Aussi, nous avons abordé le concept d’hybridation et le taux d’hybridation et donne une classification des véhicules électriques hybrides. Finalement nous avons abordé les différentes configurations des véhicules hybrides existants.

Chapitre 2

Sources d'alimentation des véhicules électriques

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux sources d'énergies qui peuvent alimenter notre voiture électrique hybride rechargeables.

Dans un premier temps, nous définirons les sources d'alimentation: batteries et énergies photovoltaïque ainsi qu'aux super-condensateurs comme source auxiliaire très utile dans le cas de forte demande de puissance, et dans le cas de freinage pour la récupération d'énergie. Nous présenterons ainsi le principe de fonctionnement des différentes sources électriques, les types de chaque sources, leurs modélisations électriques et leurs avantages et inconvénients. Puis, nous aborderons les notions suivantes : la puissance spécifique, l'efficacité énergétique ainsi que l'état de charge des batteries et des super-condensateurs.

Nous traiterons enfin le principe d'hybridation des sources d'énergie embarquées.

2.2 Batterie électrochimique

Les piles électrochimiques, plus communément appelées batteries, sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique potentielle pendant la charge, et convertir l'énergie chimique en énergie électrique pendant la décharge[1]. Les batteries constituent l'élément-clé limitatif du développement des véhicules électriques et hybrides. Une batterie ou une batterie d'accumulateurs, est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques reliés entre eux de façon à créer un générateur de courant continu de capacité et de tension données. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellule. En fonction du nombre de cellules choisi et de leur agencement (série, parallèle ou série-parallèle), nous avons la possibilité d'avoir la configuration de batterie désirée en termes de tension en sortie et de capacité[10].

Les critères de choix des différents types de batteries utilisées dans la traction électrique sont généralement les suivants :

- les performances énergétiques.
- le rendement sur un cycle.
- la durée de vie (cyclique ou temporelle).
- l'autodécharge et l'impact environnemental.

- l'énergie massique exprimée en Wh/kg qui détermine l'autonomie du véhicule électrique.
- la puissance massique exprimée en W/kg dont dépend la capacité du véhicule électrique à changer de régime (accélération, dépassement, *etc.*).

Il existe des nombreuses types de batteries, par exemple plomb-acide, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, *etc.* Cependant, aujourd'hui le lithium-ion est le choix préféré pour les applications des VE en raison de sa teneur relativement élevée en énergie et puissance spécifique[4].

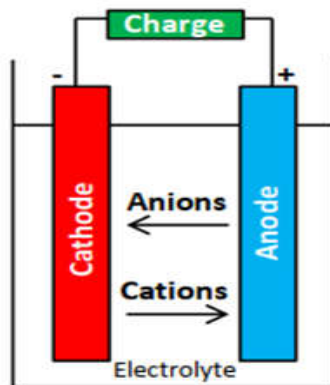


Figure2.1 Une cellule typique d'une batterie électrochimique[11].

2.2.1 La batterie au plomb

L'accumulateur au plomb est un produit commercial réussi depuis plus d'un siècle, il est utilisé pour le stockage de l'énergie électrique dans le secteur automobile et d'autres secteurs[4]. Aujourd'hui sont largement délaissées. La raison en est leurs caractéristiques énergétiques et de puissance plus faibles par unité de masse que les autres solutions disponibles[2]. Les équations des réactions chimiques sont représentées dans le tableau (2.1).

Décharge	Charge
<p>A l'anode (+):</p> $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow Pb^{++} + 2H_2O$	<p>A l'anode (+):</p> $Pb^{++} + 2H_2O \longrightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^-$
<p>A la cathode (-):</p> $Pb \longrightarrow Pb^{++} + 2e^-$	<p>A la cathode (-):</p> $Pb \longrightarrow Pb^{++} + 2e^-$

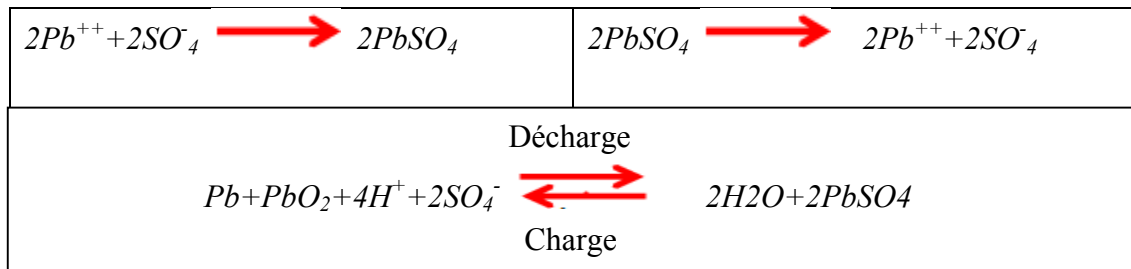


Tableau2.1 Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[11].

Les principaux avantages et inconvénients de la batterie au plomb sont indiqués dans le tableau (2.2).

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteux et simple à fabriquer. • Une technologie fiable et bien comprise. • Faible autodécharge. • Faible besoin d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible densité énergétique. • Ne permet qu'un nombre limité de cycles de décharge complets. • Ne respecte pas l'environnement. • Un emballement thermique peut se produire en cas de charge incorrecte.

Tableau2.2 Avantages et inconvénients de la batterie au plomb[4].

2.2.2 La batterie à base de nickel

Le nickel est un métal plus léger que le plomb et possède de très bonnes propriétés électrochimiques souhaitables pour les applications de batteries[4].

On distingue deux types de batteries qui correspondent à deux couples électrolytiques différents.

2.2.2.1 La batterie au nickel-cadmium (NiCd)

Largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. Et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée[2]. Cependant, la batterie au nickel/cadmium présente certains inconvénients, indiqués dans le tableau (2.3).

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Nombre élevé de cycles de charge/décharge. • Bonne performance de charge, le NiCd permet de recharger à basse température. • La batterie la moins chère en termes de coût par cycle. • Bonne performance à basse température. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité énergétique relativement faible par rapport aux systèmes plus récents. • Sa charge est complexe en raison de l'effet mémoire, le NiCd doit être périodiquement exercé pour empêcher la mémoire. • le NiCd contient des métaux toxiques. • Il a une auto-décharge relativement élevée qui doit être rechargée après le stockage.

Tableau2.3 Avantages et inconvénients de la NiCd[4].

2.2.2.2 La batterie au nickel-hydrure métallique (NiMH)

La batterie Ni-MH a été considérée comme un choix important à court terme pour les applications VE et VEH[4]. Et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture[2].

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Capacité supérieure de 30 à 40 % à celle d'un NiCd standard. • Moins sensible à la mémoire que le NiCd, les cycles d'exercices périodiques sont moins souvent nécessaires. • Le stockage et le transport sont simples, les conditions de transport ne 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie limitée : les performances commencent à se détériorer après 200 à 300 cycles. • Courant de décharge limité. • Algorithme de charge plus complexe nécessaire. • Les performances se dégradent si elles sont stockées à des températures

<p>sont pas soumises à un contrôle réglementaire.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Respectueux de l'environnement. • Rentable pour le recyclage 	<p>élevées.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20% plus cher que le NiCd.
---	--

Tableau2.4 Avantages et inconvénients de la NiMH[4].

2.2.3 La batterie au lithium

Le lithium est le plus léger de tous les métaux et présente des caractéristiques très intéressantes d'un point de vue électrochimique[4], les batteries au lithium sont celles qui ont le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées)[2].

Il existe deux grandes technologies de batteries à base de lithium: le lithium-polymère et le lithium-ion.

2.2.3.1 La batterie Lithium Polymère

Ces batteries sont considérées comme des batteries à l'état solide, car leurs électrolytes sont solides. L'électrolyte polymère le plus courant est l'oxyde de polyéthylène mélangé à un sel électrolyte approprié. Les batteries Li-poly ont le potentiel d'énergie spécifique le plus élevé. Les polymères solides, qui remplacent les électrolytes liquides plus inflammables dans d'autres types de batteries, peuvent conduire les ions à des températures supérieures à 60°C[4].

L'utilisation de polymères solides présente également un grand avantage en termes de sécurité en cas d'accidents de VE et de VHE. Comme le lithium est intercalé dans des électrodes en carbone, le lithium est en phase ionique et est moins réactif que le lithium métal pur. La fine cellule Li-poly donne la forme ajoutée l'avantage de former une pile de n'importe quelle taille ou forme pour s'adapter à l'espace disponible dans la Châssis EV ou HEV[4].ont le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées)[2]. Il existe deux grandes technologies de batteries à base de lithium: le lithium-polymère et le lithium-ion.

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Très discret. • Facteur de forme flexible, avec un volume élevé, toute taille raisonnable peut être produite de manière économique. • Légèreté. • Sécurité améliorée, plus résistant à la surcharge ; moins de risques de fuite d'électrolyte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité énergétique et nombre de cycles plus faibles que pour le Li-ion. • Coûteux à fabriquer, une fois produit en masse ; • La réduction du circuit de commande compense les coûts de fabrication les plus élevés.

Tableau2.5 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium-Polymère[4].

2.2.3.2 Batterie au lithium-ion (Li-Ion)

Depuis la première annonce de la batterie Li-ion en 1991. La technologie des batteries Li-ion a connu une augmentation sans précédent de ce qui est maintenant considéré comme la batterie rechargeable la plus prometteuse du futur grâce à ses avantages comme indiqué dans le tableau (2.6).

Bien qu'elle en soit encore au stade de développement, la batterie Li-ion a déjà gagné l'acceptation des demandes de VE et VHE[4].

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Une densité énergétique élevée, un potentiel de capacités encore plus élevé. • Facteur de forme flexible, avec un volume élevé, toute taille raisonnable peut être produite de manière économique. • Autodécharge relativement faible, l'autodécharge est inférieure à la moitié de celle du NiCd et du NiMH. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un circuit de protection. • Coûteux à fabriquer, une fois produit en masse.

- Faible maintenance et sécurité accrue.

Tableau2.6 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium-ion[4].

2.2.4 Modèle électrique d'une batterie

La batterie peut être modélisée en régime permanent, c'est-à-dire que le comportement dynamique n'est pas pris en compte. Le schéma du circuit électrique équivalent peut être vu dans la Figure (2.2)[4].

Le modèle de batterie se compose d'une source de tension interne (V_{int}) et d'une résistance interne (R_{int}), causé par une réaction chimique. Cette dernière représente la chute de tension, ΔV , qui est associé au courant de la batterie. Les courants de batterie sont traités comme des courants positifs, c'est-à-dire que les courants de charge sont alors négatifs.

$$V_{batt} = V_{battint} - R_{int}i \quad (2.1)$$

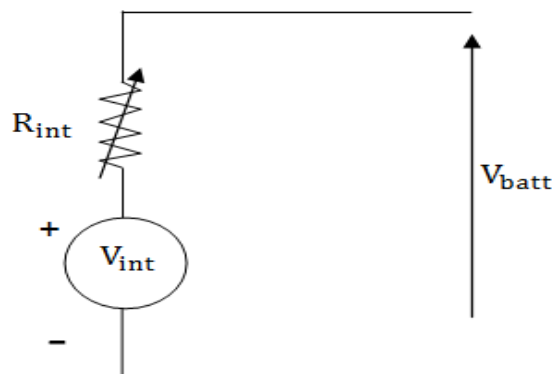


Figure2.2 Le circuit équivalent de la batterie[4].

2.2.4.1 Puissance spécifique.

La puissance spécifique est importante dans la réduction du poids d'une batterie, en particulier dans les applications à forte demande de puissance, comme les applications VE et VEH. La puissance spécifique d'une batterie chimique dépend principalement de la résistance interne de la batterie [6].

La puissance maximale que la batterie peut fournir à la charge est :

$$P_s = \frac{V_{int}^2}{4(R_c + R_{int})} \quad (2.2)$$

2.2.4.2 Efficacité énergétique

Les pertes d'énergie ou de puissance lors de la décharge et de la charge d'une batterie apparaissent sous forme de pertes de tension. Ainsi, l'efficacité de la batterie pendant la décharge et la charge peut être définie à tout point de fonctionnement comme le rapport entre la tension de fonctionnement de la cellule et la tension thermodynamique, c'est-à-dire [4] :

$$\begin{cases} \eta_d = \frac{V}{V_{int}} \\ \eta_c = \frac{V_{int}}{V} \end{cases} \quad (2.3)$$

Où η_d et η_c sont respectivement l'efficacité énergétique pendant la décharge et la charge. La tension aux bornes, en fonction du courant et de l'énergie stockés dans la batterie ou de l'état de charge (SOC) de la batterie, est inférieure en décharge et supérieure en charge au potentiel électrique produit par une réaction chimique[4].

2.2.4.3 État de charge de la batterie

Le SOC est l'équivalent d'une jauge de carburant pour le bloc de batteries d'un VE. Il n'y a pas d'unité pour le SOC et il est exprimé en points de pourcentage (0% = vide ; 100% = plein)[4]. Le changement de SOC dans un intervalle de temps dt , avec un courant de décharge ou de charge i_{bat} peut être exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \Delta SOC = \frac{idt}{Q} \\ SOC(t) = SOC(0) - \int \frac{i_{bat}(t)}{Q} dt \end{cases} \quad (2.4)$$

Où Q est la capacité en ampères-heures de la batterie au taux actuel i_{bat} . Pour la décharge, le courant de la batterie (i_{bat}) est positif et pour la charge, il est négatif[12].

2.3 Supercondensateurs

Le principe de la double couche électrique est né avec le physicien Hermann Von Helmholtz dans l'année 1853. Il a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement d'ions de cet électrolyte à la surface de cette interface. Super condensateurs, où bien "condensateurs électriques à double couche" (en anglais electric double layer capacitors EDLC) sont des condensateurs à valeurs de capacité

supérieures à tous autres types de condensateur disponibles aujourd'hui. Ces valeurs de capacité atteignent jusqu'à 4000 Farads[11].

2.3.1 Principes de base des supercondensateurs

Le fonctionnement des supercondensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique.

L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte[11].

Lorsque deux tiges de carbone sont immergées dans une solution d'acide sulfurique, séparées l'un à l'autre et chargée avec une tension passant de zéro à 1,5 V, il ne se passe presque rien jusqu'à 1 V, puis à un peu plus de 1,2 V, une petite bulle apparaîtra à la surface des deux électrodes. Ces bulles à une tension supérieure à 1 V indiquent une décomposition électrique d'eau. En dessous de la tension de décomposition, le courant ne circule pas, un "courant électrique double couche" se produit alors à la limite entre l'électrode et l'électrolyte, puis les électrons sont chargés à travers la double couche[4].

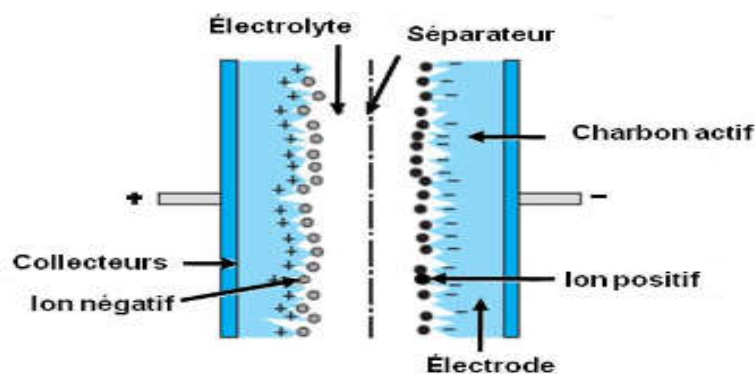


Figure 2.3 Principe de construction d'un supercondensateur[13].

2.3.2 Modèle électrique de supercondensateur

Le module de supercondensateurs est représenté par un circuit électrique du type RC. En supposant que le courant $i_{\text{élé}}m$ d'un élément super-condensateur est positif pendant la phase de décharge et est négatif pendant la phase de charge[13], la tension aux bornes d'un élément peut être écrite comme suit :

$$V_{\text{élé}}m = V_{\text{cé}}lé}m - R_{\text{élé}}m i_{\text{élé}}m \quad (2.5)$$

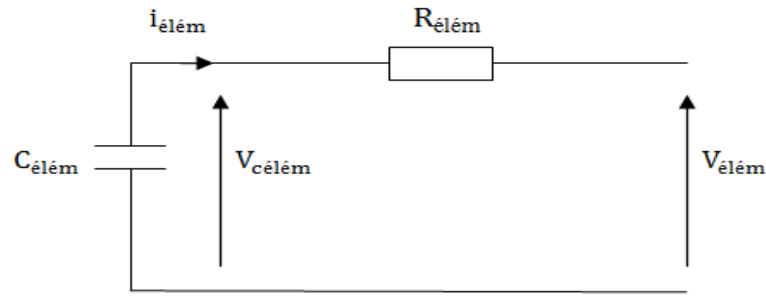


Figure 2.4 Modèle d'un élément supercondensateur[13].

Un supercondensateur qu'émet en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente pour obtenir une capacité élevée à une tension demandée; un arrangement en série et en parallèle de plusieurs supercondensateurs est envisagé formant un module complet ou un stack[13]. La tension aux bornes d'un stack de super-condensateurs est déterminée par la relation suivante :

$$V_{sc} = V_{csc} - R_{sc}I_{sc} \quad (2.6)$$

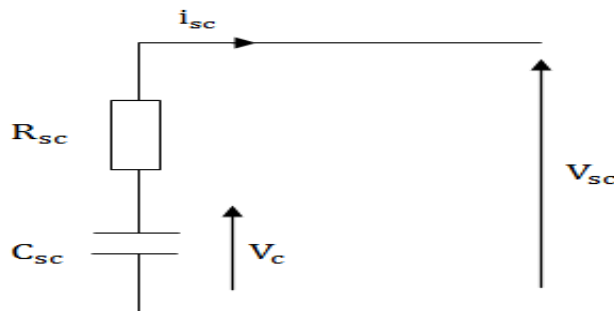


Figure 2.5 Circuit équivalent du module de supercondensateurs[13].

C_{sc} =Capacité totale du module de supercondensateurs.

R_{sc} =Résistance série totale du module de supercondensateurs.

Q_{sc} =Quantité de charge stockée dans le module de supercondensateurs. Elle est donnée par :

$$Q_{sc} = C_{sc}V_{sc} \quad (2.7)$$

Le courant du module est donnée par :

$$\frac{dQ_{sc}}{dt} = -I_{sc} \quad (2.8)$$

L'énergie emmagasinée E_{sc} est liée à la capacité du supercondensateur C_{sc} et à la tension de service :

$$E_{sc} = \frac{1}{2}C_{sc}V_{sc}^2 \quad (2.9)$$

2.3.2.1 État de charge du supercondensateur

Un SC reçoit généralement une tension de bas (V_{scb}), en dessous de laquelle le SC arrêtera de fournir de l'énergie. Par conséquent, l'énergie disponible ou utile est inférieure à son énergie à pleine charge, qui peut être exprimée comme :

$$E_{scu} = \frac{1}{2} C_{sc} (V_{scb}^2 - V_{scn}^2) \quad (2.10)$$

Où V_{scn} est la tension nominale du SC. À sa tension de bas, le SOC peut être écrit comme suit:

$$SOC = \left(\frac{V_{scb}}{V_{scn}} \right)^2 \quad (2.11)$$

2.4 Source photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque[14].

2.4.1 La cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la figure (2.6) ci-dessous. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe[15].

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction $P-N$ représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai générateur dans le dispositif[16].

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photo-générés, pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contacte avec la zone p , et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [17].

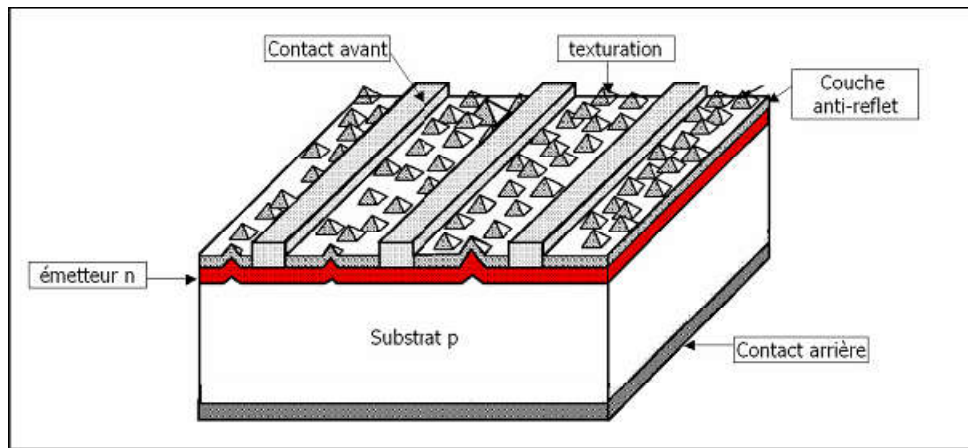


Figure 2.6 Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire [16].

2.4.2 Caractéristique électrique

La variation du courant « A » (ou densité du courant « A/cm^2 ») en fonction de la tension « V », à l'obscurité et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire; la figure (2.7) montre deux exemples de caractéristiques $I - V$ de cellule solaire sans et avec éclairement.

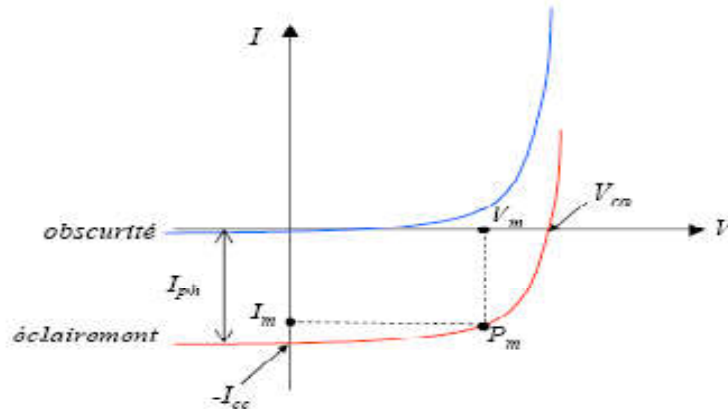


Figure 2.7 Caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement [14].

2.4.3 Circuit électrique équivalent

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante[16]:

$$I_{obs} = I_s \left(\exp \left(\frac{V}{nV_{th}} \right) - 1 \right) \quad (2.12)$$

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (2.13)$$

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante[16]:

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V}{nV_{th}} \right) - 1 \right) \quad (2.14)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors[16]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

Et par conséquence le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (2.8) par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh})[16].

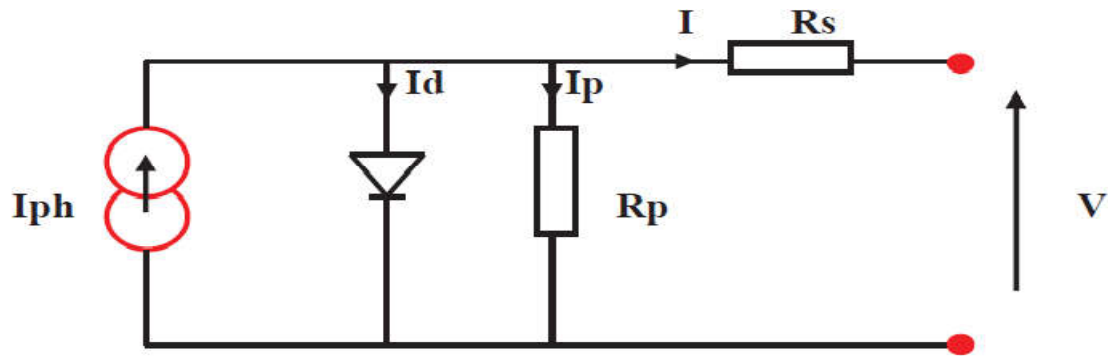


Figure 2.8 Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle [14].

- ❖ Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant Photo-généré.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau.
- ❖ La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction [16].

2.4.4 Le mécanisme de la conversion photovoltaïque

Les différents processus qui entrent en jeu durant cette conversion sont résumés comme suit:

Comme on la définit (2.4.1) une cellule solaire est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [16]:

- Absorption des photons incidents (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des porteurs générés dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter

les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron-trou créés est nécessaire.

Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées[16].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (2.9). Sous éclairement les photons incidents créent des porteurs dans les zones N, P et dans la zone de charge d'espace (ZCE). Les paires électrons-trous photo-générés dans cette zone sont instantanément séparés par le champ électrique E régnant[16].

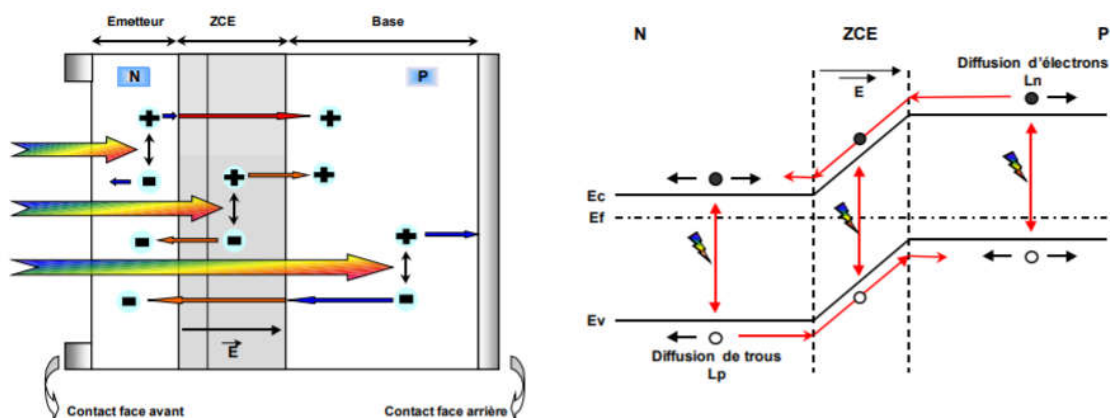


Figure 2.9 Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairement[18].

Les trous, charges positives se voient accélérés vers la zone P , les électrons, charge négatives, vers la zone N . Trous et électrons deviennent alors majoritaire : C'est le photo-courant de génération, parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés coté N et électrons générées coté P , créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau.

S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone déplétive afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photo-courant de diffusion[16].

La présence de contacts ohmiques assure le bon cheminement des porteurs qui créent un courant photo-généré I_{ph} ; somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total[16].

2.4.5 Rendement de la cellule photovoltaïque

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type

de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement. Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairage de 1000 W/m² de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules[14].

$$\eta = \frac{P_m}{E*S} = \frac{FF*I_{cc}*V_{co}}{E*S} \quad (2.16)$$

η : Le rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : La puissance maximale produite par le générateur PV.

E : L'éclairement absorbé par la cellule.

S : La surface de la cellule.

FF : Le facteur de forme.

I_{cc} : le courant de court-circuit

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

Ce rendement dépend plusieurs facteurs :

- L'ensoleillement et la réflexion à la surface.
- La température de la jonction des cellules.
- Le type de matériau utilisé et la technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- L'absorption incomplète et l'excès d'énergie des photons absorbés[14].

2.4.6 Les caractéristiques : courant- tension et puissance– tension

Les figures (2.10), (2.11) représentent respectivement les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25°C[14].

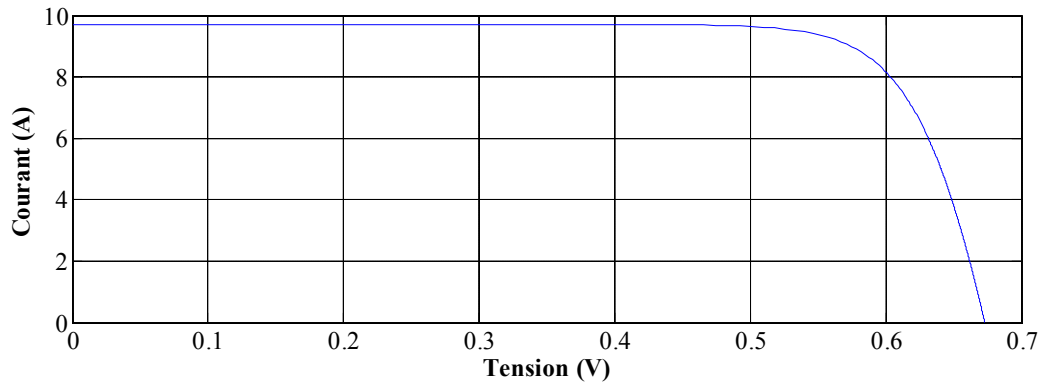


Figure 2.10 Caractéristique courant-tension.

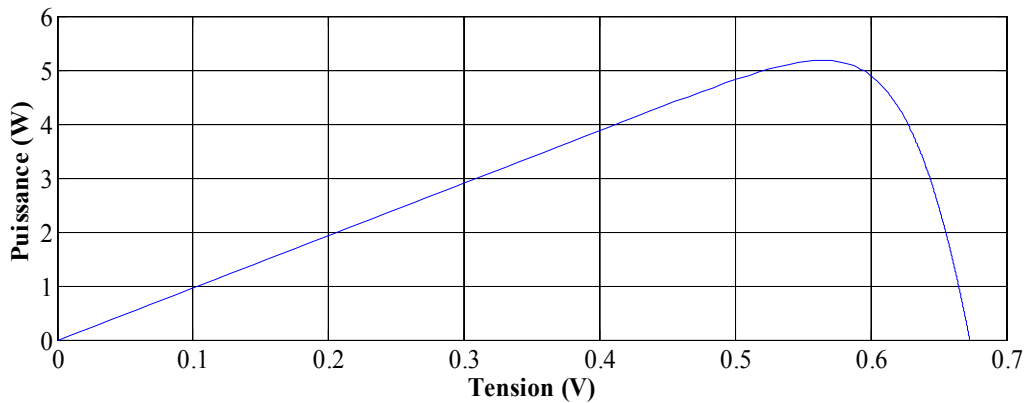


Figure 2.11 Caractéristique puissance-tension.

2.4.7 Les différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique; plusieurs types de cellules solaires sont distingués.

2.4.7.1 Les cellules solaires au silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en termes d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopiles au silicium[16].

- **Les cellules monocristallines**

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent (12 – 16) % et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur[16].

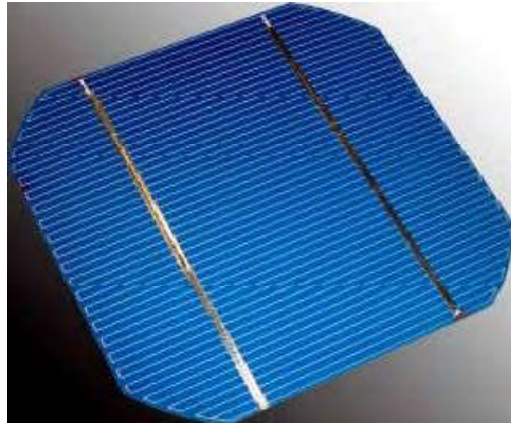


Figure2.12 Cellule monocristallin[14].

- **Les cellules poly-cristallines**

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre (11 – 13) % (autour de 18 % en laboratoire)[16].

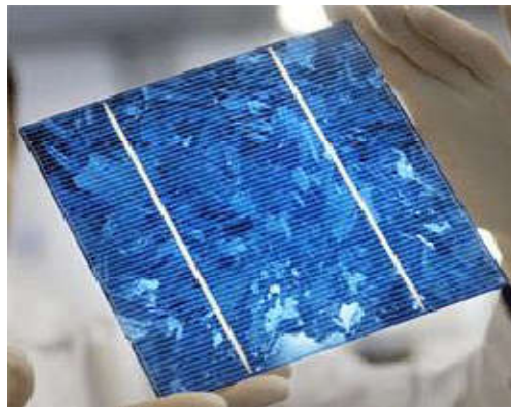


Figure2.13 Cellule poly-cristallin[14].

- **Les cellules amorphes**

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre (8 –10) % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,...etc[16].

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées[16].



Figure2.14 Cellule amorphe[14].

2.4.7.2 Les cellules solaires à couche mince

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

- Cuivre-indium-diséléniure (CIS) ou cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS) : leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minimale, sans élément toxique mais fabrication très délicate[16].



Figure2.15 Cellule CISG.

- Cadmium-tellure (CdTe) : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire) : haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique[16].

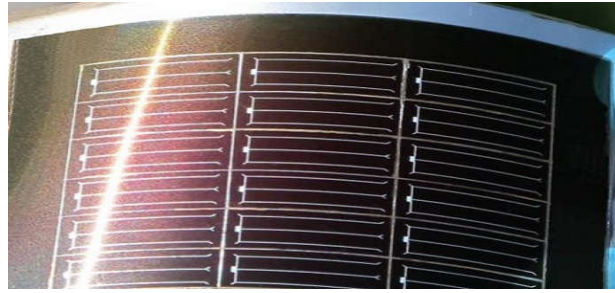


Figure2.16 Cellule CdTe.

- Gallium Arsenic (GaAs): leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire[16].

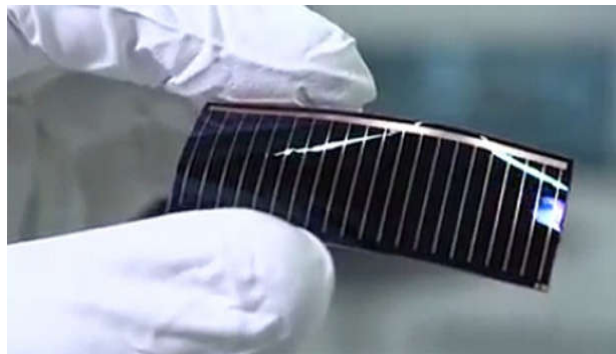


Figure2.17 Cellule GaAs.

Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :

- une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
- leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer[16].

2.4.7.3 Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques[16].

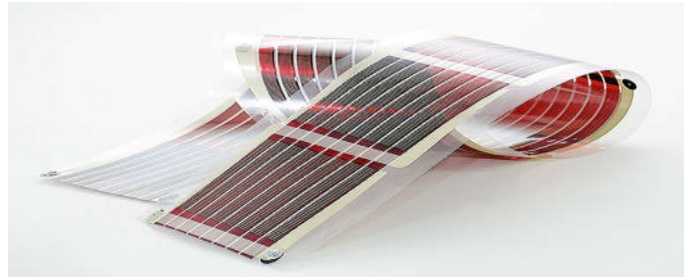


Figure 2.18 Cellule organique.

2.4.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients[14].

2.4.8.1 Avantages du photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets[14].

2.4.8.2 Inconvénients du photovoltaïque

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 %.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.

- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an[14].

2.5 Véhicule en utilisant une source photovoltaïque

La voiture solaire est un véhicule alimenté par des cellules photovoltaïques utilisée pour évoluer sur le réseau routier, il s'agit d'une innovation technologique qui permettra dans un futur proche de se déplacer en récupérant et en stockant l'énergie solaire pour la transformer en énergie électrique.

Les voitures solaires combinent des technologies typiquement utilisées dans les domaines de l'aérospatiale, des énergies alternatives et de la construction automobile. Le design d'un véhicule solaire est particulièrement contraint par la taille des capteurs solaires à cause de la quantité d'énergie dont la voiture a besoin. La plupart des véhicules solaires sont des prototypes expérimentaux construits dans le but de participer à des courses de voitures solaires[19].

2.5.1 L'évolution des voitures solaires

Le premier véhicule solaire de l'histoire (la Sunmobile) est un modèle réduit de voiture inventé par William Cobb de General Motors. Elle est présentée la première fois à Chicago le 31 août 1955. Cette miniature est dotée de 12 cellules photovoltaïques en sélénium et d'un petit moteur électrique Pooley qui actionne une poulie faisant tourner les roues arrière, et elle est fabriquée en bois de balsa, mesure moins de 40 cm de longueur[19].

Elle prouve néanmoins pour la première fois que l'énergie solaire est capable de faire se mouvoir un véhicule.

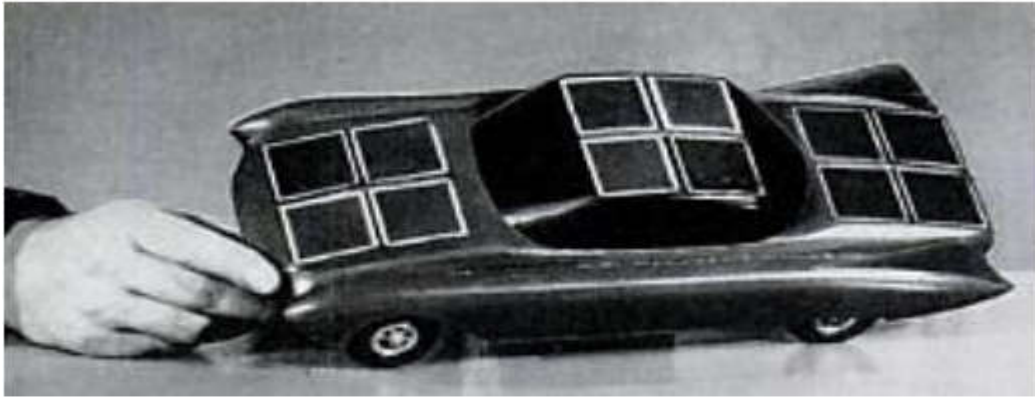


Figure2.19 Le premier véhicule solaire de l'histoire[19].

Après 5 ans de travail en Californie, le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain est mis au point et présenté en 1960 à Rome par le physicien et chimiste américain Charles Escoffery.

Il s'agit d'une ancienne Baker, une voiture électrique datant de 1912, équipée sur son toit de 2,42 m² de panneaux solaires amovibles comportant 10 640 cellules. Cette installation a une puissance de 200 W avec des conditions d'ensoleillement optimales mais, pratiquement, cette puissance dépasse rarement les 100 W pour un rendement des cellules atteignant seulement 5 %[19].

Partant d'une charge complète d'électricité, elle peut rouler durant 3 heures à une vitesse maximum de 32 km/h. Cette voiture solaire est présentée dans le monde entier par son concepteur afin de démontrer que l'énergie solaire permet une mobilité propre et économique[19].



Figure2.20 Le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain[19].

En 2015, EVX, une entreprise australienne, fait le pari de pouvoir commercialiser une voiture de sport à énergie solaire, l'Immortus (fig. 2.22). Il s'agit d'une voiture deux places qui pourrait, en théorie, rouler indéfiniment. L'Immortus, telle que projetée, fait 5 m de long pour 2 m de large et est mue grâce à ses 7 m² de panneaux photovoltaïques au rendement de 22 %. Son poids à vide doit être de 550 kg. Il ne s'agit pour le moment que d'un projet qui, s'il voit le jour, s'adressera à une clientèle fortunée capable de déboursier 330 000 euros pour s'offrir cette voiture unique en son genre. En combinant l'énergie des panneaux solaires et celle des batteries, l'Immortus pourrait atteindre une vitesse de pointe de 140 à 160 km/h et son autonomie serait de 550 km à 85 km/h de moyenne. Et, si elle ne compte que sur le photovoltaïque, elle pourrait, selon EVX, rouler jusqu'à 80 km/h indéfiniment[20].



Figure2.21 L'IMMORTUS D'EVX [20].

L'un des véhicules solaires biplaces aujourd'hui disponible sur le marché est commercialisé par Evovelo, coopérative de Malaga (Espagne). Misant l'utilisation de matériaux se régénérant avec le temps, à l'instar des dérivés de bois et les plantes, Evovelo a conçu Mö (fig. 2.23), une voiture solaire urbaine construite avec $\frac{3}{4}$ de matériaux durables. Mö peut se mettre en mouvement de manière totalement renouvelable.. Grâce à sa carrosserie courbée, la voiture espagnole intègre des panneaux solaires flexibles « à haut rendement ». Elle a une autonomie de 50 km et roule à environ 50 km/h. Elle est très légère, ne pesant que 85 kg. Son prix en précommande, au début de l'année 2016, est évalué à 4 500 euros. Le milieu automobile classique voit aussi, après l'arrivée des voitures électriques, le développement de projet de voitures solaires comme la C-max Solar Energi de Ford

présentée en 2014 qui devrait être disponible chez les concessionnaires prochainement[20].



Figure 2.22 MÖ DU CONSTRUCTEUR ESPAGNOL EVOVELO (2016)[20].

2.5.2 Le fonctionnement

Depuis l'apparition des cellules photovoltaïques, les professionnels de l'automobile souhaitent créer une voiture entièrement propulsée à l'aide de l'énergie solaire. L'intérêt de cette énergie est de profiter de la lumière solaire pour la transformer en énergie électrique.

Pour faire cette modification on utilise des cellules photovoltaïques (panneau solaires) qui seront chargés de transformer les photons de lumière en électrons (électricité). Une voiture que l'on qualifie de solaire fonctionne avant tout grâce au rendement des cellules photovoltaïques installées sur sa structure et à la capacité de stockage d'énergie de ses batteries.

Donc, pour faire fonctionner les voitures solaires, il faut que la plus grande surface possible soit recouverte possible soit recouverte de panneaux solaires.

L'excès d'électrons alimente ensuite des batteries à chargement rapides, permettant au moteur électrique de fonctionner[19].

2.5.3 La composition

Les voitures solaires électriques contiennent plusieurs composants qui sont totalement différents aux composants des véhicules thermiques, une voiture solaire électrique est composée essentiellement de trois éléments d'alimentation:

- **Panneau photovoltaïque :** il est destiné principalement au chargement des batteries. Ce qui nécessite que le panneau solaire doit être puissant, flexible et

d'un type convenable aux voitures solaires (rendement, résistance à l'environnement). En effet, il doit être monté dans un emplacement idéal pour capter le maximum d'énergie solaire, généralement, il est mis sur le toit ou le capot de la voiture[19].

- **Moteur électrique** : La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux. Elle est alors composée d'un moteur équipé d'un réducteur, généralement épicycloïdal, accouplé à un différentiel. L'ensemble est relié aux roues par l'intermédiaire de transmissions[19].
- **Batterie** : Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans le secteur automobile, Mais la batterie lithium reste le meilleur choix car les accumulateurs lithium offrent aujourd'hui les plus importantes densités d'énergies massiques et volumiques. Ils sont aussi les plus délicats dans leur utilisation, et un BMS (Battery Management System) est indispensable pour s'assurer de la meilleure longévité[19].

2.5.4 Avantages et inconvénients d'un véhicule en utilisant la source PV

2.5.4.1 Les Avantages

- Le développement d'une mobilité durable.
- La réduction ou la suppression de la pollution de l'air et réduire les nuisances sonores.
- Lors des journées ensoleillées, les capteurs jouent pleinement leur rôle, permettant ainsi d'actionner le moteur.
- Le silicium qui constitue les cellules photovoltaïques est recyclable, le coût de fabrication de ces cellules devrait donc très vite chuter.

2.5.4.2 Les inconvénients

- Le rendement réel de conversion d'une cellule est faible.
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement
- Les véhicules solaires ne sont pas compétitifs par rapport aux véhicules thermiques.

2.6 Hybridation des sources d'énergie embarquées

Par analogie avec les véhicules thermiques hybrides, l'hybridation n'intervient pas au niveau de la motorisation mais en amont au niveau des sources de stockage d'énergie[21]. Le principe consiste à combiner deux technologies de stockage complémentaires (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées adaptées, pour la seconde). Elle permet en particulier, de dissocier les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire.

Un véhicule à batteries électrochimiques utilise ainsi en complément une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance, telle que des super-condensateurs afin d'améliorer les performances du stockeur d'énergie et l'adapter aux besoins spécifiques du transport[21].

2.6.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie

La densité énergétique et la densité de puissance sont des critères principaux pour choisir le système de stockage d'un véhicule électrique[21]. Le diagramme de *Ragone* illustre les performances en termes d'énergie spécifique et de puissance spécifique des différentes technologies de stockage d'énergie. On peut remarquer que les batteries possèdent une grande densité d'énergie mais une faible densité de puissance.

A l'autre extrémité du diagramme, on trouve les super-condensateurs qui possèdent de grandes densités de puissance mais de faibles densités d'énergie[21]. On peut également remarquer qu'il n'existe pas dans ce diagramme de systèmes ayant intrinsèquement de bonnes performances sur les deux axes à la fois.

Or pour une application comme le véhicule électrique utilisant une seule source d'énergie (solution mono-source), cela pose problème. On est en général amené à sur-dimensionner le dispositif de stockage, ou à limiter les performances en transitoire, ce qui impose de faire des compromis au niveau du volume et de la masse[21].

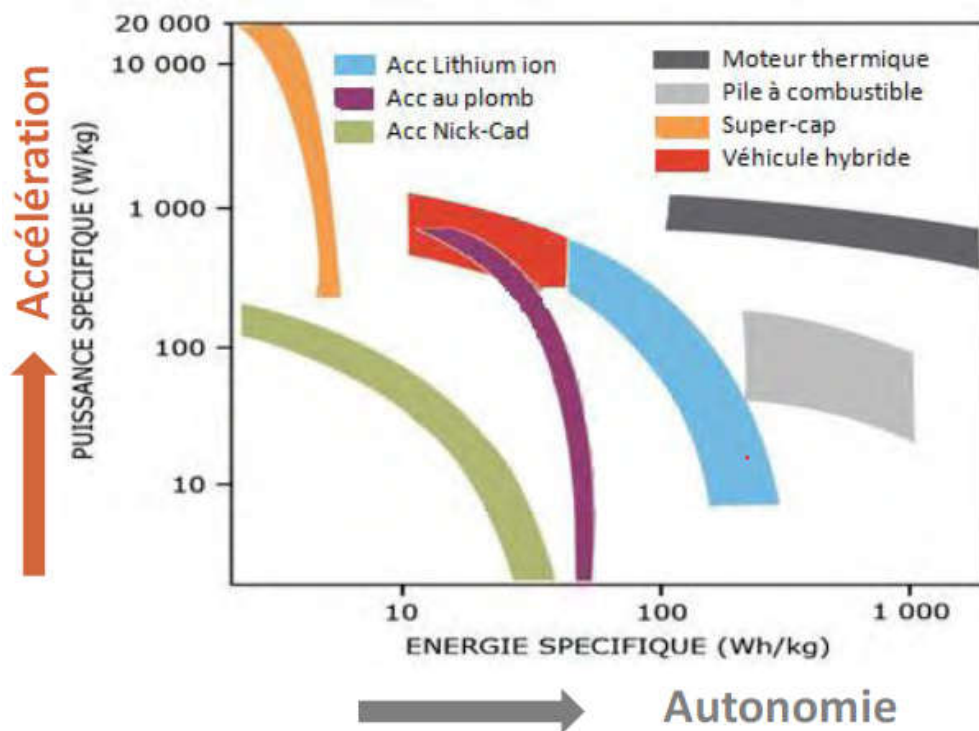


Figure 2.23 Diagramme de Ragone [21]

Une solution alternative est d'associer deux sources entre elles : la première de forte densité d'énergie et la seconde de forte densité de puissance afin de permettre de combler une partie du vide laissé dans le diagramme de *Ragone*. On synthétise ainsi un nouveau système de stockage, dit « hybride » [21].

Le super-condensateur est le composant le plus puissant avec la durée de vie la plus longue. C'est cette solution que nous proposons dans cette étude pour l'hybridation des batteries Li-ion.

2.6.2 Bilan et choix de l'hybridation

L'hybridation des technologies de stockage répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon le cahier des charges de l'application [21].

Pour ce qui concerne le véhicule électrique, les paramètres clés pour ce choix sont [21] :

- ❖ Les performances en termes de densité de puissance et densité d'énergie.
- ❖ La durée de vie, la fiabilité, la sécurité d'utilisation.

- ❖ Le coût en investissement mais aussi en fonctionnement.

2.7 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons fait une présentation générale des sources d'énergies qui peuvent alimenter notre voiture électrique hybride. Puis nous avons exposé leur principe de fonctionnement, les types de chaque sources, leurs modélisations électriques et leurs avantages et inconvénients, ensuite nous avons abordé les notions suivantes : la puissance spécifique, l'efficacité énergétique ainsi que l'état de charge des batteries et des super-condensateurs. À la fin il s'agit d'une généralité sur le principe d'hybridation des sources d'énergie embarquées.

Chapitre 3

Gestion de l'énergie des sources hybrides

3.1 Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à la gestion de l'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride, où nous allons présenter la modélisation des convertisseurs de l'interfaçage entre les sources de productions et le bus continu, D'autre part, on présentera dans ce chapitre, la boucle de courant associé au contrôleur qui est basé sur un régulateur PID, pour tous les convertisseurs agrégé au bus continu, pareillement nous présenterons une commande basée sur la notion de platitude dans lequel une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie dissipé par les différentes sources installées (gestion de l'énergie). Nous aborderons aussi le dimensionnement de moteur utilisé ainsi que les sources et les convertisseurs. Finalement, nous interprétons les différents résultats obtenus durant la simulation.

3.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride

Dans cette étude nous avons utilisé le modèle dynamique de modélisation par moyen en petits signaux pour des raisons de performances et pour engendrer des commandes appropriées des convertisseurs associés. Pour notre travail des convertisseurs de type DC/DC Boost, et Buck-Boost sont utilisé.

3.2.1 Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost)

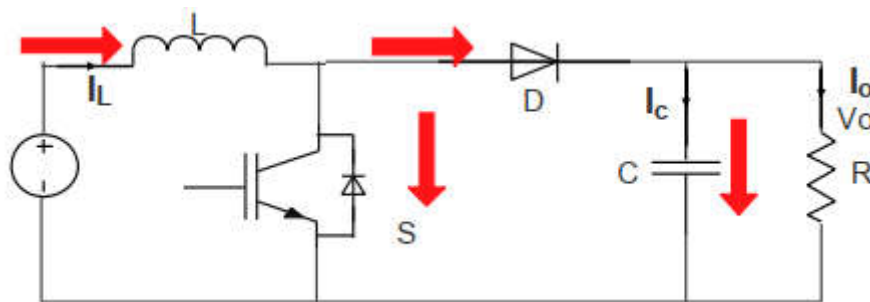


Figure 3.1 Architecture d'un convertisseur Boost idéal.

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α , Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Dans tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (pour ce cas étudié l'ordre est de 2). Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BV_{in} \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.1)$$

Où x : vecteur d'état $x=[x_1, x_2] = [i_L, V_c]$.

u : vecteur de commande.

A : matrice d'état.

B : matrice d'entrée.

y : le vecteur de sortie.

C : matrice de sortie.

❖ Première séquence de conduction [0 à αT]

Lorsque S est fermé. Le comportement dynamique du circuit est donné par:

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + r_L i_L \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{in} - \frac{r_L}{L} i_L \\ \dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{in} - \frac{r_L}{L} x_1 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C} i_c \quad (3.5)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch} = 0 \quad (3.6)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_{pv} \quad (3.7)$$

Qui peut être écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 V_{in} \\ y = V_{ch} = C_x x \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec $C = [0,1]$

❖ Deuxième séquence de conduction [αT à T]

Lorsque S est ouvert :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - V_c - r_L i_L \quad (3.9)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{r_L}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + V_c + r_L i_L \quad (3.12)$$

$$I_L = C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch} \quad (3.13)$$

D'où

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_{pv} \quad (3.14)$$

Ce système peut être mis sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 V_{in} \\ y = V_{ch} = Cx \end{cases} \quad (3.15)$$

❖ Model Moyen:

A partir des équations (8) et (15), on peut déduire la forme moyenne et V_{ch} pour toute la période:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (A_1 x + B_1 V_{in})\alpha + (A_2 x + B_2 V_{in})(1 - \alpha) \\ V_{ch} = (C\alpha + C(1 - \alpha))x \end{cases} \quad (3.16)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = A_1 \alpha + A_2 (1 - \alpha) \\ B = B_1 \alpha + B_2 (1 - \alpha) \end{cases} \quad (3.17)$$

Où A : matrice d'état, B : matrice de commande

En conclusion : le modèle moyen du hacheur survolteur est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{r_L}{L}x_1 - \frac{1-\alpha}{L}x_2 \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{r_L}{L}i_l - \frac{1-\alpha}{L}V_c \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1-\alpha}{C}i_l - \frac{1}{RC}V_c \end{cases} \quad (3.19)$$

Ainsi le courant de la charge égale :

$$I_{ch} = \frac{1}{R}V_c = \frac{1}{R}x_2 \quad (3.20)$$

$$x_2 = RI_{ch} \quad (3.21)$$

Donc les équations (3.18), (3.19) seront comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{r_L}{L}x_1 - \frac{1-\alpha}{L}x_2 \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{r_L}{L}i_L - \frac{1-\alpha}{L}V_c \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{C}x_1 - \frac{1}{RC}I_{ch} \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1-\alpha}{C}i_l - \frac{1}{C}I_{ch} \end{cases} \quad (3.23)$$

3.2.2 Modélisation du convertisseur Buck-Boost

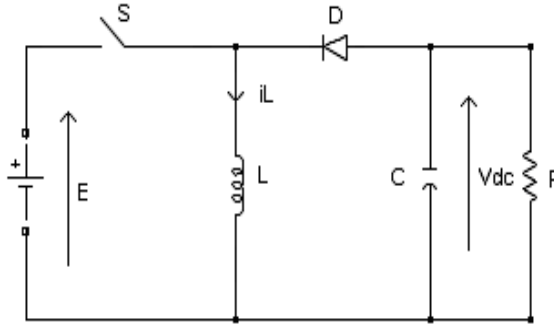


Figure 3.2 Schéma de principe du convertisseur Buck/Boost

La procédure de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue est la même que dans le cas du hacheur parallèle. En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont :

$$r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} = E \quad (3.24)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R}V_{dc} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{r_L}{L}x_1 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}V_{dc} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 E \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.27)$$

Où x: vecteur d'état $x=[x_1, x_2] = [i_L, V_{dc}]$.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (3.28)$$

Où $C=[0,1]$ et $y = V_{dc}$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont :

$$\begin{cases} \frac{Lr_L}{RC} i_L + L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L - \frac{1}{R} V_{dc} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{r_L}{RC} x_1 + \frac{1}{L} x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L} E - \frac{1}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 E \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L}{RC} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (3.32)$$

Où $C = [0, 1]$ et $Y = V_{dc}$

❖ **Model Moyen:**

$$\begin{cases} A = A_1 \alpha + A_2 (1 - \alpha) \\ B = B_1 \alpha + B_2 (1 - \alpha) \end{cases} \quad (3.33)$$

En conclusion : le modèle moyen du hacheur Buck-boost est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{\alpha}{L} E + \left[-\frac{\alpha r_L}{L} - \frac{(1-\alpha)r_L}{RC} \right] x_1 + \frac{1-\alpha}{L} x_2 \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{\alpha}{L} E + \left[-\frac{\alpha r_L}{L} - \frac{(1-\alpha)r_L}{RC} \right] i_L + \frac{1-\alpha}{L} V_{dc} \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\frac{1-\alpha}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1-\alpha}{C} i_L - \frac{1}{RC} V_{dc} \end{cases} \quad (3.35)$$

$$I_{ch} = \frac{1}{R} V_{dc} = \frac{1}{R} x_2 \quad (3.36)$$

$$x_2 = R I_{ch} \quad (3.37)$$

Donc les équations (3.34), (3.35) seront comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{\alpha}{L} E + \left[-\frac{\alpha r_L}{L} - \frac{(1-\alpha)r_L}{RC} \right] x_1 + \frac{1-\alpha}{L} x_2 \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{\alpha}{L} E + \left[-\frac{\alpha r_L}{L} - \frac{(1-\alpha)r_L}{RC} \right] i_L + \frac{1-\alpha}{L} V_{dc} \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\frac{1-\alpha}{C} x_1 - \frac{1}{C} I_{ch} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1-\alpha}{C} i_L - \frac{1}{C} I_{ch} \end{cases} \quad (3.39)$$

3.3 Régulateur du courant des convertisseurs

3.3.1 Principe du contrôleur PID (Proportionnel Intégral Dérivé)

C'est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés.

L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure. Le PID permet 3 actions en fonction de cette erreur :

- **Une action Proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain G .
- **Une action Intégrale** : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps s , puis divisée par un gain T_i .
- **Une action Dérivée** : l'erreur est dérivée suivant un temps s , puis multipliée par un gain T_d il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte).

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes.

- ❖ Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- ❖ Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- ❖ Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

$$C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.40)$$

Les effets de chaque correcteur (K_p , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau (3.1).

	Temps de montée	dépassement	Temps d'établissement	Erreur statique
Si K_p croît	diminue	augmente	Peu de changement	diminue
Si K_i croît	diminue	augmente	augmente	éliminée
Si K_d croît	Peu de changement	diminue	diminue	Peu de changement

Tableau3.1 Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique[22].

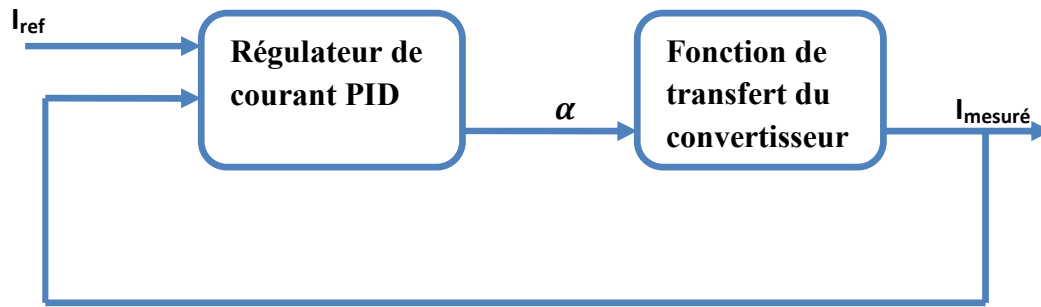


Figure 3.3 Schéma fonctionnel d'un régulateur PID associé à un convertisseur.

3.4 Stratégie de commande du système hybride proposé

Pour définir une stratégie de contrôle appropriée pour le système hybride, il est essentiel d'établir les principaux objectifs de contrôle pour un système hybride composé de batteries, de cellules photovoltaïques et de supercondensateurs peuvent être déterminé comme suit:

- La tension du bus CC doit être ajustée et régulée à tout moment, et pour diverses variations continues de la charge alimentée.
- La puissance requise par la charge doit être satisfaite à tout moment.
- Le système de stockage (les supercondensateurs) doit être chargé.
- La puissance produite par le système hybride doit être générée de manière ordinaire, en commençant par la source principale (les batteries), puis la source secondaire (les cellules photovoltaïques) et enfin les supercondensateurs de stockage.

3.4.1 Notion de la commande par platitude

Le concept de platitude a été défini pour la première fois par M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon utilisant le formalisme de l'algèbre différentielle, où un système est considéré comme un champ différentiel généré par un ensemble de variables (états et entrées)[11].

La platitude différentielle est une propriété des systèmes de contrôle dynamiques, elle fournit une approche unifiée à planifier dynamiquement les trajectoires possibles et concevoir le contrôle des systèmes non linéaires qui permet de suivre ces trajectoires[23].

On dit qu'un système est plat si on peut trouver un ensemble de sorties de telle sorte que tous les états et entrées puissent être déterminés à partir de ces sorties sans intégration, donc les trajectoires du système sont estimées par les trajectoires d'une sortie plate et de ses dérivées sans aucune équation différentielle[24].

Considérer le système :

$$\begin{cases} u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T u \in R^m \\ x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T x \in R^n \\ y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T y \in R^m \\ \dot{x} = f(x, u) \end{cases}, (n, m) \in \mathbb{N}^2 \quad (3.41)$$

Où : x : le vecteur des variables d'état.

u : le vecteur des entrées de contrôle.

Y : le vecteur des sorties plates.

$$y = \phi(x, u, u, \dots, u^{(s)}) \quad (3.42)$$

Où (s) est le nombre déterminé des dérivés.

Tel que :

$$\begin{cases} x = \varphi(y, y', \dots, y^{(r)}) \\ u = \psi(y, y', \dots, y^{(r+1)}) \end{cases} \quad (3.43)$$

Où (r) est le nombre prédéterminé des dérivés.

Il n'y a aucune équation différentielle de la forme:

$$\zeta(y, y', \dots, y^{(k)}) = 0 \quad (3.44)$$

Où (k) est un nombre prédéterminé des dérivés.

Si les profils de sortie plats sont connus en fonction du temps, alors on peut obtenir les profils de tous les états du système et les entrées correspondants.

3.4.2 Régulation de l'énergie du système hybride

Pour le système hybride renouvelable proposé (PV- Batt-SC), il est supposé que les courants des PV, SC, et les batteries suivent leurs signaux de référence.

- les courants de références :

$$I_{PV} = I_{PVref} = \frac{P_{PV}}{V_{PV}} = \frac{P_{PVref}}{V_{PV}} \quad (3.45)$$

$$I_{batt} = I_{battref} = \frac{P_{batt}}{V_{batt}} = \frac{P_{battref}}{V_{batt}} \quad (3.46)$$

$$I_{SC} = I_{SCref} = \frac{P_{SC}}{V_{SC}} = \frac{P_{SCref}}{V_{SC}} \quad (3.47)$$

Où P_{pv} , P_{batt} , et P_{sc} sont les puissances générées par le système hybride PV-Batt-SC.

r_{pv} , r_{batt} et r_{sc} représentent les seules pertes statiques dans les convertisseurs PV, Batteries, et les supercondensateurs respectivement.

V_{pv} , V_{batt} et V_{sc} , le I_{pv} , I_{batt} et I_{sc} sont les tensions et les courants de la source photovoltaïque, les batteries et les supercondensateurs respectivement.

- L'énergie Y_{bus} stockée dans le bus continu :

$$Y_{bus} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 \quad (3.48)$$

- L'énergie stockée dans les supercondensateurs :

$$Y_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (3.49)$$

- L'énergie totale Y_{tot} électrostatique emmagasinée dans le condensateur de

bus continue C_{bus} et dans le supercondensateur C_{sc} :

$$Y_{tot} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 + \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (3.50)$$

- L'énergie Y_{bus} selon la P_{pv_r} , P_{batt_r} , P_{sc_r} et P_{ch} :

$$\dot{Y}_{bus} = P_{pv_r} + P_{batt_r} + P_{sc_r} - P_{ch} \quad (3.51)$$

Tel que:

$$\text{➤ } P_{pv_r} = P_{pv} - r_{pv} * I_{pv}^2 = P_{pv} - r_{pv} * \left(\frac{P_{pv}}{V_{pv}}\right)^2 \quad (3.52)$$

$$\text{➤ } P_{batt_r} = P_{batt} - r_{batt} * I_{batt}^2 = P_{batt} - r_{batt} * \left(\frac{P_{batt}}{V_{batt}}\right)^2 \quad (3.53)$$

$$\text{➤ } P_{sc_r} = P_{sc} - r_{sc} * I_{sc}^2 = P_{sc} - r_{sc} * \left(\frac{P_{sc}}{V_{sc}}\right)^2 \quad (3.54)$$

- La puissance demandée par la charge :

$$P_{ch} = V_{bus} * I_{ch} = \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch} \quad (3.55)$$

- La puissance délivrée à partir des supercondensateurs :

$$P_{sc} = \sqrt{\frac{2 * Y_{sc}}{C_{sc}}} * I_{sc} \quad (3.56)$$

3.4.3 Démonstration de la platitude du système hybride proposée

Les sorties plat "Y", les variables d'entrée de commande "u" et les variables d'état "x" peuvent être données par les formules suivantes :

$$\bullet \quad Y = \begin{pmatrix} Y_{bus} \\ Y_{tot} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad (3.57)$$

$$\bullet \quad u = \begin{pmatrix} P_{SC} \\ P_{totdemd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (3.58)$$

$$\bullet \quad x = \begin{pmatrix} V_{bus} \\ V_{SC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3.59)$$

- L'énergie électrostatique du bus continu Y_{bus} du système est constante et est déterminée comme sortie plat Y_1 :

$$Y_{bus} = 0 = P_{PV_r} + P_{Batt_r} + P_{SC_r} - P_{ch} \quad (3.60)$$

- L'énergie électrostatique totale Y_{tot} stockée dans le condensateur du bus continu C_{bus} et dans les supercondensateurs, est constante et est déterminée comme une Sortie plate Y_2 .

$$Y_2 = 0 = P_{PV_r} + P_{Batt_r} - P_{ch} \quad (3.61)$$

- La première variable d'état (tension du bus continu) $V_{bus} = x_1$:

$$x_1 = V_{bus} = \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} = \varphi_1(Y_1) \quad (3.62)$$

- La première variable de commande (puissance du supercondensateur)

$$P_{SC} = u_1 :$$

$$\dot{Y}_{bus} = P_{PV_r} + P_{Batt_r} + P_{SC} - r_{SC} * \left(\frac{P_{SC}}{V_{SC}}\right)^2 - \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch} \quad (3.63)$$

$$u_1 = P_{SCref} = P_{SC} \quad (3.64)$$

$$u_1 = \dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + r_{SC} * \left(\frac{u_1}{V_{SC}}\right)^2 + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch} \quad (3.65)$$

$$u_1 - r_{SC} * \left(\frac{u_1}{V_{SC}}\right)^2 = \dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch} \quad (3.66)$$

$$P_{SCmax} = \frac{V_{SC}^2}{4 * r_{SC}} \quad (3.67)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4 * P_{SCmax}} = \dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch} \quad (3.68)$$

$$-\frac{u_1}{P_{SCmax}} + \left(\frac{u_1}{2 * P_{SCmax}}\right)^2 + 1 - 1 = -\frac{\dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch}}{P_{SCmax}} \quad (3.69)$$

$$\left(1 - \frac{u_1}{2 * P_{SCmax}}\right)^2 = 1 - \frac{\dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}}} * I_{ch}}{P_{SCmax}} \quad (3.70)$$

$$1 - \frac{u_1}{2 * P_{scmax}} = \sqrt{1 - \frac{\dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}} * I_{ch}}}{P_{scmax}}} \quad (3.71)$$

$$u_1 = 2 * P_{scmax} * \left(-\sqrt{1 - \frac{\dot{Y}_{bus} - P_{PV_r} - P_{Batt_r} + \sqrt{\frac{2 * Y_{bus}}{C_{bus}} * I_{ch}}}{P_{scmax}}} \right) \quad (3.72)$$

$$u_1 = \Psi(Y_1, \dot{Y}_1) \quad (3.73)$$

- La deuxième variable d'état (tension du supercondensateur) $V_{sc} = x_2$:

$$x_2 = V_{sc} = \sqrt{\frac{2 * (Y_{tot} - Y_{bus})}{C_{sc}}} = \sqrt{\frac{2 * (Y_2 - Y_1)}{C_{sc}}} = \varphi_2(Y_1, Y_2) \quad (3.74)$$

- La deuxième variable de commande (puissance totale demandée)

$$P_{totdemd} = u_2 :$$

$$u_2 = 2 * P_{totLim} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\dot{Y}_2 + \varphi_1(Y_1) * I_{ch}}{P_{totLim}}} \right) u_2 = P_{totref} = P_{totdemd} \quad (3.75)$$

$$P_{totLim} = P_{PVLim} + P_{BattLim} \quad (3.76)$$

3.4.4 Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence

Pour faire suivre la sortie plate Y à sa référence Y_{ref} , nous utilisons la loi de commande asymptotique suivante :

$$(\dot{Y}_{1ref} - \dot{Y}_1) + k_1(Y_{1ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1ref} - Y_1) = 0 \quad (3.77)$$

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_{1ref} + k_1(Y_{1ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1ref} - Y_1) \quad (3.78)$$

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y}_{2ref} + k_{21}(Y_{2ref} - Y_2) \quad (3.79)$$

- ❖ Détermination des coefficients de régulation k_{11} et k_{12} :

$$p^2 + k_{11}p + k_{12} = 0 \quad (3.80)$$

$$k_{1,21} = 2\xi\omega_n$$

$$k_2 = \omega_n^2$$

ξ et ω_n symbolisent l'amortissement et la pulsation naturels désirés respectivement.

Les coefficients k_{11} , k_{12} sont positifs ; ceci indique que les racines du système déterminé possèdent des parties réelles négatives, donc la stabilité de la commande de système est assurée.

3.5 Schéma de commande de système hybride

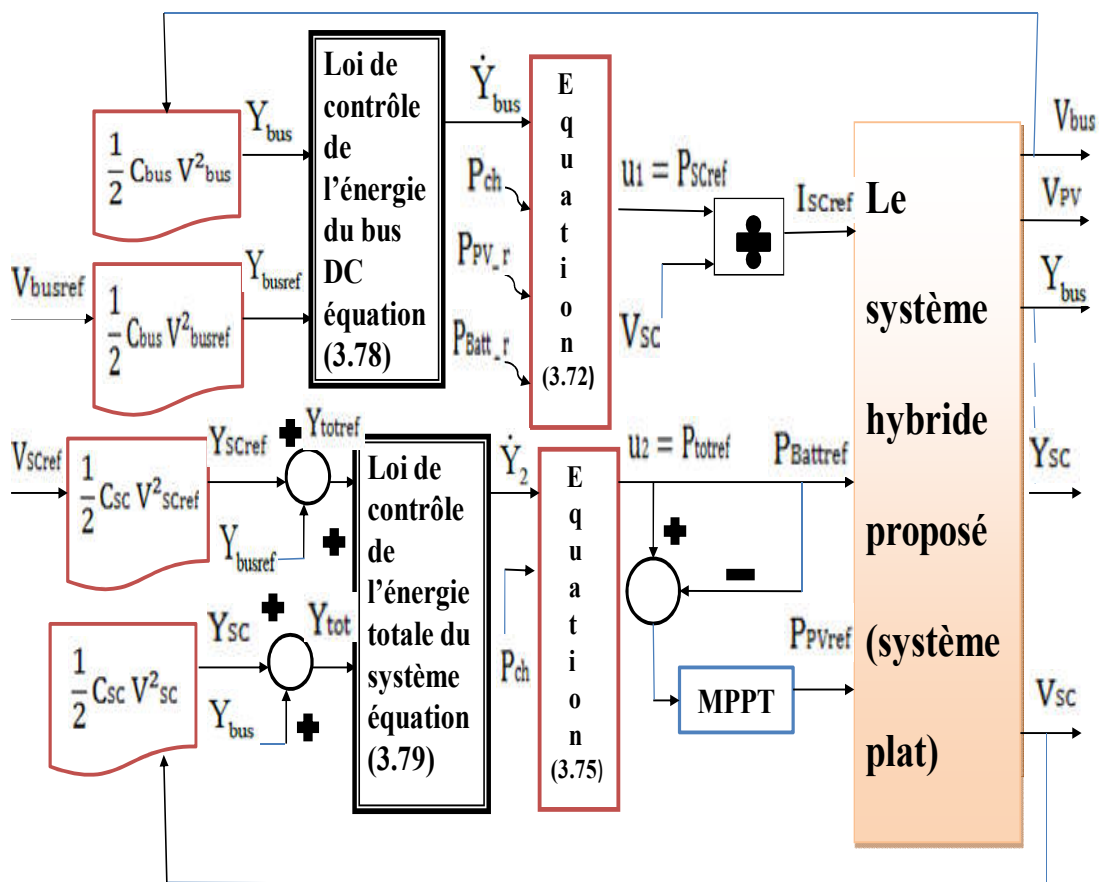


Figure 3.4 Schéma de commande de système hybride.

3.6 Dimensionnement d'un moteur électrique destiné à une voiture

Le cahier de charge peut être récapitulé par le tableau suivant :

Charge utile	300 kg
À vide en ordre de marche	1 300 kg
Vitesse maximale	120 km/h
Accélération	De 0-100 km/h en 12s
Tension d'alimentation	200 V

refroidissement	par air ambiant.
Cx	0.60
Batterie Technologie	Lithium-ion
Poids de la batterie (kg)	Ne dépasse pas 400 kg.

Tableau3.2 le cahier de charge.

Toutes les grandeurs nécessaires pour le dimensionnement de la puissance du moteur électrique sont résumées dans le tableau suivant :

Les grandeurs	Les valeurs
La densité de l'air	$\rho = 1.28 \text{ kg/m}^3$
La section frontale	$S_f = 2.0676 \text{ m}^2$
Le coefficient de pénétration dans l'air	$C_x = 0.6$
La vitesse maximale de véhicule	$V = 120 \text{ km/h} = 33.33 \text{ m/s} = 95.23 \text{ rad/s}$
Le couple de résistance au roulement	$C_{\text{rmoy}} = 0.0024$
La masse totale en charge	$M_{\text{totale}} = 1600 \text{ kg}$
L'accélération de la pesanteur	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
La pente	$P\% = 10 \%$
L'accélération	$\gamma = 2.31 \text{ m/s}^2$
Le rayon de la roue	$R_r = 0.35 \text{ m}$
Le rapport de réduction	$m = 5$
Le rendement de réduction	$\eta = 0.85$
La vitesse du véhicule	$V_v = 60 \text{ km/h} = 16.66 \text{ m/s}$

La vitesse relative à l'air	$V_r = 2 \text{ m/s}$
-----------------------------	-----------------------

Tableau 3.3 les grandeurs nécessaires pour le dimensionnement du moteur électrique

3.6.1 Caractéristiques mécaniques requises pour l'entraînement d'un véhicule roulant

L'effort total de résistance (F_r) à l'avancement que doit vaincre le système de motorisation peut s'écrire sous la forme :

$$F_r = F_{\text{roul}} + F_{\text{aéro}} + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma \quad (3.81)$$

- ❖ $F_{\text{aéro}}$: est la force de résistance aérodynamique, proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale S_f du véhicule et à son coefficient « C_x » de pénétration dans l'air.

$$F_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x S_f = 170.6340 \quad (3.82)$$

- ❖ F_{roul} est la force de résistance au roulement liée au coefficient de roulement des pneus. En pratique, avec des pneumatiques modernes à très faible résistance au roulement, avec une pression de gonflage comprise entre 1,8 et 2,2 daN/cm², le coefficient C_{RR} de résistance au roulement vaut environ 10^{-2}

$$F_{\text{roul}} = C_{RR\text{moy}} Mg = 45.2045 \text{ N} \quad (3.83)$$

- ❖ $M \cdot g \cdot p\%$ est la force nécessaire, pour vaincre une pente à (p en %).

$$Mgp\% = 2260.2268 \text{ N} \quad (3.84)$$

- ❖ $M \cdot \gamma$ est le terme dynamique d'accélération ($\gamma > 0$ pour une accélération et $\gamma < 0$ pour une décélération).

$$M\gamma = 4435.2056 \text{ N} \quad (3.85)$$

Le couple nécessaire aux roues pour obtenir cette force

$$C_r = F_r \cdot R_r = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 C_x S_f + C_{RR\text{moy}} Mg + Mgp\% + M\gamma \right) \cdot R_r = 2418.9448 \text{ Nm} \quad (3.86)$$

Le couple C_e du moteur devra donc être majoré de 20 % pour prendre en compte les différents couples de pertes dans la transmission.

$$C_r = 1,2 \cdot \frac{1}{m} F_r \cdot R_r = 580.5467 \text{ Nm} \quad (3.87)$$

La transmission finale est assurée par un réducteur de type courroie crantée pignons.

Soit, pour une accélération et une vitesse maximales sur le plat :

❖ **Couple moteur :**

$$C_e = \frac{C_r}{m \cdot \eta} = 136.5992 \text{ Nm} \quad (3.88)$$

❖ **Vitesse angulaire :**

$$\Omega_e = m \cdot \Omega_r = 476.15 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 4500 \frac{\text{tr}}{\text{min}} \quad (3.89)$$

Nous pouvons donc choisir le moteur équipant la voiture électrique selon le cahier des charges qui nous a été confié.

$$P_e = C_e \cdot \Omega_e = 65.0417 \text{ kw} \quad (3.90)$$

Par conséquent nous avons choisi le moteur synchrone à aimant permanent LSRPM 160 LR. Voici les caractéristiques principales du moteur nécessaire à notre application.

Type de moteur	Pn (kW)	Nn (tr/min)	Cn (Nm)	In (A)	η (%)	J (kg.m ²)	Poids (kg)
LSRPM 160 LR	65	400	138	4500	128	0.13	95.3

Tableau3.4 les caractéristiques du moteur choisi.

3.7 Dimensionnement des sources

On a choisi comme voiture d'étude : SION (solar electric vehicle).

Avec un nombre des cellules photovoltaïques de 330 cellules divisés comme suit :

Le toit : 136 cellules.

Le capot : 44 cellules.

L'arrière : 20 cellules.

Les cotés : 2 X 65 cellules.

Dans notre étude, on concentre juste à la puissance délivré par (le toit +le capot) avec une surface totale de 4.42270125 m² et un nombre de cellule de 180 cellules photovoltaïques.

3.7.1 Dimensionnement de la source PV

Type de cellule	monocristallin
Rendement	21.4%
Puissance maximale d'une cellule P_{mpp}	5.23 W
Tension maximale d'une cellule V_{mpp}	0.571 V
Courant maximal d'une cellule I_{mpp}	9.16 A
Tension de circuit ouvert d'une cellule V_{oc}	0.673 V
Courant de court-circuit d'une cellule I_{sc}	9.71 A
Surface d'une cellule	156.75mmX 156.75mm
Nombre total des cellules	180 (toit+capot)
Puissance totale maximale produite	941.4 W

Tableau3.5 Paramètre de la source photovoltaïque utilisée

❖ La tension qu'elle doit être générée par la source photovoltaïque est considérée égale à 51.39V.

➤ **Nombre des cellules photovoltaïques en série**

$$N_{s_pv} = \frac{V_{pv_ref}}{V_{pv}} = 90 \quad (3.91)$$

➤ **Nombre des cellules photovoltaïques en parallèle**

$$N_{p_pv} = \frac{N_{total_pv}}{N_{s_pv}} = 2 \quad (3.92)$$

3.7.2 Dimensionnement des batteries

Type de batterie	Tension nominale	Capacité nominale	Energie nominale	Poids	Dimensions (L*I*h)
Lithium fer phosphate	12.8 V	150 Ah	1.92 kWh	20 kg	237x321x152 en mm

Tableau3.6 Paramètre de la batterie utilisée

- ❖ L'autonomie détermine la distance que peut parcourir un véhicule électrique avant qu'il soit nécessaire d'en recharger la batterie.

$$\text{Autonomie} = \frac{\text{capacité de la batterie}}{\text{Consommation}} \quad (3.93)$$

- ❖ La consommation moyenne d'un véhicule électrique égal 15 kWh/100 km.
- ❖ Pour notre étude on a choisi une autonomie de 200 km ce qui nous oblige d'avoir une capacité de 30 kWh à la source d'alimentation.

➤ **Le nombre de batterie nécessaire**

$$N_{\text{total_batt}} = \frac{E_{\text{total_batt}}}{E_{\text{batt}}} = 16 \quad (3.94)$$

➤ **Nombre des batteries en série**

$$N_{s_batt} = \frac{V_{\text{batt_ref}}}{V_{\text{batt}}} = 1 \quad (3.95)$$

➤ **Nombre des batteries en parallèle**

$$N_{p_batt} = \frac{N_{\text{total_batt}}}{N_{s_batt}} = 16 \quad (3.96)$$

➤ **Poids des batteries**

$$\text{Poids}_{\text{totale}} = \text{Poids}_{\text{batt}} * N_{\text{batt}} = 320 \text{ kg} \quad (3.97)$$

➤ **Surface des batteries**

$$\text{Surface}_{\text{totale}} = \text{Surface}_{\text{batt}} * N_{\text{batt}} = 1.217232 \text{ m}^2 \quad (3.98)$$

3.7.3 Dimensionnement des supercondensateurs

Modèle de supercondensateur	Tension nominale	Capacité nominale	Energie massique	Puissance massique	résistance série	Poids
BCAP0350	2.7 V	350 F	5.1 Wh/kg	16.3 W/kg	2.2 mΩ	0.06 kg

Tableau3.7 Paramètre du supercondensateur utilisé

- ❖ La tension de référence qu'elle doit être générée par les supercondensateurs est considérée égale à 48V.

• **L'énergie cinétique du véhicule**

$$E_c = \frac{1}{2} * M * V^2 = 1066.4547 \text{ kj} = 0.2962 \text{ kwh} \quad (3.99)$$

- **La capacité du module**

$$E_C = \left(\frac{1}{2} * C_{\text{pack_sc}} * V_{\text{sc_ref}}^2 \right) * \frac{3}{4} \quad (3.100)$$

❖ Puisque seul $\frac{3}{4}$ de l'énergie est disponible entre U et $\frac{U}{2}$

$$\text{Donc : } C_{\text{pack_sc}} = \left(\frac{2}{V_{\text{sc_ref}}^2} * E_C \right) * \frac{4}{3} = 1234 \text{ F} \quad (3.101)$$

- **Le nombre des supercondensateurs en série**

$$N_{s_sc} = \frac{V_{\text{sc_ref}}}{V_{\text{sc}}} = 18 \quad (3.102)$$

- **Le nombre des supercondensateurs en parallèle**

$$C_{\text{pack_sc}} = \frac{N_{p_sc}}{N_{s_sc}} * C_{\text{sc}} \quad (3.103)$$

$$\text{Donc : } N_{p_sc} = \frac{N_{s_sc}}{C_{\text{sc}}} * C_{\text{pack_sc}} = 63 \quad (3.104)$$

- **Le nombre total des supercondensateurs**

$$N_{\text{total_sc}} = N_{s_sc} * N_{p_sc} = 1134 \quad (3.105)$$

- **le poids total des supercondensateurs**

$$\text{Poids}_{\text{total_sc}} = \text{Poids}_{\text{sc}} * N_{\text{total_sc}} = 68.04 \text{ kg} \quad (3.106)$$

- **Le temps nécessaire pour que le véhicule atteigne sa vitesse maximale à puissance constante.**

D'après le cahier des charges on a : $\Delta T = 12 \text{ s}$ pour $[0 - 100 \text{ km/h}]$, alors on doit trouver le ΔT pour une vitesse maximale de 120 km/h .

$$\text{Donc } T = \frac{E_{\text{pack_sc}}}{P_{\text{charge}}} = 0.004166 \text{ h} = 15 \text{ s} \quad (3.107)$$

- **La résistance du module**

$$R_{\text{pack_sc}} = \frac{N_s}{N_p} * R_{\text{sc}} = 0.000914 \Omega = 0.914 \text{ m}\Omega \quad (3.108)$$

- **Le courant des supercondensateurs**

Le courant est maximum lorsque la tension est minimum. Pour des raisons pratiques découlant des performances limitées de l'électronique de puissance, le stockeur est utilisé entre la tension d'opération maximum et la moitié de cette valeur.

Au début de l'accélération la situation idéale est d'avoir un stockeur complètement chargé.

➤ A $t = 0 \text{ s}$, $V_{\text{charge}} = V_{\text{sc}}$

$$\text{Donc : } I_{\text{min}} = \frac{P_{\text{charge}}}{V_{\text{sc}}} = 1354 \text{ A} \quad (3.109)$$

$$\text{➤ } A t = 15 \text{ s, } V_{\text{charge}} = \frac{V_{\text{sc}}}{2}$$

$$\text{Donc : } I_{\text{max}} = 2 * I_{\text{min}} = 2708 \text{ A} \quad (3.110)$$

3.8 Dimensionnement des convertisseurs

3.8.1 Cahier de charge

- La tension référence du bus continu est prise égale à 200V.
- L'erreur statique acceptable au niveau de la tension de sortie doit être dans la marge [-1.5÷ 1.5V].
- L'énergie électrostatique au niveau du bus continu doit être constante.
- La fréquence de découpage égale à 12khz.
- La capacité du bus continu C_{bus} est : 3200uF.
- L'ondulation de tension est égale à 2%.
- L'ondulation de courant. Est égale à 15%.

3.8.2 Dimensionnement du convertisseur boost (source photovoltaïque)

- Le courant d'entrée de la source photovoltaïque : $I_{\text{in}_p\text{v}} = 18.32 \text{ A}$
- La tension d'entrée de la source photovoltaïque : $V_{\text{in}_p\text{v}} = 51.39\text{V}$

- **Le courant de sortie**

$$I_{\text{out}_p\text{v}} = \frac{V_{\text{in}_p\text{v}} * I_{\text{in}_p\text{v}}}{V_{\text{out}}} * \eta_{\text{conv}} = \frac{51.39 * 18.32}{200} * 0.98 = 4.61 \text{ A} \quad (3.111)$$

$$\text{➤ L'ondulation de courant est 15\% c.-à-d : } \Delta I_L = 0.69 \text{ A} \quad (3.112)$$

$$\text{➤ La puissance de sortie : } P_{\text{out}_p\text{v}} = V_{\text{out}} * I_{\text{out}_p\text{v}} = 922 \text{ W} \quad (3.113)$$

- **Le rapport cyclique**

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}_p\text{v}}}{1 - \alpha_{p\text{v}}} \quad (3.114)$$

$$\alpha_{p\text{v}} = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}_p\text{v}}}{V_{\text{out}}} = 0.743 \quad (3.115)$$

- **L'inductance**

$$\Delta I_L = \frac{\alpha_{p\text{v}} V_{\text{in}_p\text{v}}}{f * L_{p\text{v}}} = \frac{\alpha_{p\text{v}} * (1 - \alpha_{p\text{v}}) * V_{\text{out}}}{f * L_{p\text{v}}} \quad (3.116)$$

En résolvant l'équation $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$, on aperçoit que l'ondulation en courant ΔI_L est maximale pour $\alpha = 0,5$. Le dimensionnement de l'inductance L , à partir de la relation (3.116) s'effectue à l'aide l'équation (3.117).

$$L_{pv} \geq \frac{V_0}{4 * f * \Delta I_L} \quad L_{pv} \geq 6.038 \text{ mH} \quad (3.117)$$

- **La capacité**

L'ondulation de tension est 2% c.-à-d : $\Delta V_0 = 4V$

$$R_{pv} = \frac{P_{out_pv}}{I_{S_rms_pv}^2} = 3.857 \Omega \quad (3.118)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{\alpha_{pv} * V_{out}}{R_{pv} * C_{pv} * f} \quad (3.119)$$

Le dimensionnement du condensateur C , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{pv} \geq \frac{\alpha_{max_pv} * V_{out}}{\Delta V_{out} * f * R_{pv}} \quad C \geq 802.65 \mu\text{F} \quad (3.120)$$

- Le courant efficace traversant la diode D

$$I_{D_rms_pv} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_pv}}{1-\alpha_{pv}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)(1-\alpha_{pv})} = 9.094 \text{ A} \quad (3.121)$$

- Le courant efficace traversant l'interrupteur S

$$I_{S_rms_pv} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_pv}}{1-\alpha_{pv}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)(\alpha_{pv})} = 15.46 \text{ A} \quad (3.122)$$

- La tension maximale sur l'interrupteur et la diode

$$V_{S_max_pv} = |V_{D_max_pv}| = \frac{V_{in_pv}}{1-\alpha_{pv}} + \frac{\Delta V_{out}}{2} = 201.96 \text{ V} \quad (3.123)$$

- Contrainte maximale en courant

$$I_{S_max_pv} = |i_{D_max_pv}| = \frac{I_{out_pv}}{1-\alpha_{pv}} + \frac{\Delta I_L}{2} = 18.28 \text{ A} \quad (3.124)$$

3.8.3 Dimensionnement du convertisseur boost (batteries)

- Le rendement des batteries : $\eta_{batt} = 92 \%$
- Le courant d'entrée des batteries : $I_{in_batt} = 4800 \text{ A}$
- La tension d'entrée des batteries : $V_{in_batt} = 12.8 \text{ V}$
- **La puissance d'entrée des batteries**

$$P_{in_batt} = V_{in_batt} * I_{in_batt} * \eta_{batt} = 56.524 \text{ kw} \quad (3.125)$$

- **Le courant de sortie**

$$I_{out_batt} = \frac{V_{in_batt} * I_{in_batt} * \eta_{batt}}{V_{out}} * \eta_{conv} = 276.97 \text{ A} \quad (3.126)$$

$$\text{➤ L'ondulation de courant est 15% c.-à-d : } \Delta I_L = 41.54 \text{ A} \quad (3.127)$$

- **La puissance de sortie**

$$P_{out_batt} = V_{out} * I_{out_batt} = 55.394 \text{ kw} \quad (3.128)$$

- **Le rapport cyclique**

$$V_{out} = \frac{V_{in_batt}}{1 - \alpha_{batt}} \quad (3.129)$$

$$\alpha_{batt} = \frac{V_{out} - V_{in_batt}}{V_{out}} = 0.936 \quad (3.130)$$

- **L'inductance**

$$\Delta I_L = \frac{\alpha_{batt} * V_{in_batt}}{f * L_{batt}} = \frac{(1 - \alpha_{batt}) * V_{out}}{f * L_{batt}} \quad (3.131)$$

En résolvant l'équation $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$, on aperçoit que l'ondulation en courant ΔI_L est maximale pour $\alpha = 0,5$. Le dimensionnement de l'inductance L, à partir de la relation (3.131) s'effectue à l'aide l'équation (3.132).

$$L_{batt} > \frac{V_{out}}{4 * f * \Delta I_L} \quad L_{batt} > 0.1003 \text{ mH} \quad (3.132)$$

- **La capacité**

$$\text{L'ondulation de tension est 2% c.-à-d : } \Delta V_{out} = 4V \quad (3.133)$$

$$R_{batt} = \frac{P_{out_batt}}{I_{S_rms_batt}^2} = 3.159 \text{ m}\Omega \quad (3.134)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{\alpha_{batt}^2 * V_{in_batt}}{(1 - \alpha_{batt}) * R_{batt} * C_{batt} * f} \quad (3.135)$$

Le dimensionnement du condensateur C, à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide de l'équation suivante:

$$C_{batt} \geq \frac{\alpha_{max_batt} * V_{out}}{\Delta V_{out} * f * R_{batt}} \quad C_{batt} \geq 1.234 \text{ F} \quad (3.136)$$

- **Le courant efficace traversant la diode D**

$$I_{D_rms_batt} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_batt}}{1 - \alpha_{batt}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)(1 - \alpha_{batt})} = 1094.82 \text{ A} \quad (3.137)$$

- **Le courant efficace traversant l'interrupteur S**

$$I_{S_{rms}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_batt}}{1-\alpha_{batt}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)}(\alpha_{batt}) = 4186.89 \text{ A} \quad (3.138)$$

- La tension maximale sur l'interrupteur et la diode

$$V_{S_{max_batt}} = |V_{D_{max_batt}}| = \frac{V_{in_batt}}{1-\alpha_{batt}} + \frac{\Delta V_{out}}{2} = 202 \text{ V} \quad (3.139)$$

- Contrainte maximale en courant

$$I_{S_{max_batt}} = |i_{D_{max_batt}}| = \frac{I_{out}}{1-\alpha_{batt}} + \frac{\Delta I_L}{2} = 4348.42 \text{ A} \quad (3.140)$$

3.8.4 Dimensionnement du convertisseur buck-boost (supercondensateurs)

- La tension d'entrée des supercondensateurs : $V_{in_sc} = 48 \text{ V}$
- Le courant d'entrée des supercondensateurs : $I_{in_sc} = 1354 \text{ A}$
- Le rendement des supercondensateurs : $\eta_{sc} = 98 \%$

- **La puissance d'entrée des supercondensateurs**

$$P_{in_sc} = V_{in_sc} * I_{in_sc} * \eta_{sc} = 63.692 \text{ kw} \quad (3.141)$$

- **Le courant de sortie**

$$I_{out} = \frac{V_{in_sc} * I_{in_sc} * \eta_{sc}}{V_{out}} * \eta_{conv} = 312.09 \text{ A} \quad (3.142)$$

- L'ondulation de courant est 15% c.-à-d : $\Delta I_L = 46.814 \text{ A}$ (3.143)

- **La puissance de sortie**

$$P_{out_sc} = V_{out} * I_{out_sc} = 62.418 \text{ kw} \quad (3.144)$$

- **Le rapport cyclique**

$$V_{out} = \frac{\alpha_{sc}}{1-\alpha_{sc}} V_{in_sc} \quad (3.145)$$

$$\alpha_{sc} = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in_sc}} = 0.807 \quad (3.146)$$

- **L'inductance**

$$\Delta I_L = \frac{\alpha_{sc} * V_{in_sc}}{f * L_{sc}} = \frac{(1-\alpha_{sc}) V_{out}}{f * L_{sc}} \quad (3.147)$$

$$L_{sc} = \frac{\alpha_{sc} V_{in_sc}}{f * \Delta I_L} = \frac{(1-\alpha_{sc}) V_{out}}{f * \Delta I_L} = 0.068 \text{ mH} \quad (3.148)$$

- **La capacité**

$$\text{L'ondulation de tension est } 2\% \text{ c.-à-d : } \Delta V_0 = 4V \quad (3.149)$$

$$R_{sc} = \frac{P_{out_sc}}{I_{S_{rms_pv}}^2} = 12.214 \text{ m}\Omega \quad (3.150)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{\alpha_{sc}^2 V_{in_sc}}{(1-\alpha_{sc}) * R_{sc} * C_{sc} * f} \quad (3.151)$$

$$C_{sc} = \frac{\alpha_{sc}^2 V_{in_sc}}{(1-\alpha_{sc}) * R_{sc} * \Delta V_0 * f} = 228.3 \text{ mF} \quad (3.152)$$

- Le courant efficace traversant la diode D :

$$I_{D_rms_sc} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_sc}}{1-\alpha_{sc}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)(1-\alpha_{sc})} = 710.42 \text{ A} \quad (3.153)$$

- Le courant efficace traversant l'interrupteur S :

$$I_{S_rms_sc} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{out_sc}}{1-\alpha_{sc}}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)\alpha_{sc}} = 2260.6 \text{ A} \quad (3.154)$$

- La tension maximale sur l'interrupteur et la diode :

$$V_{S_max_sc} = |V_{D_max_sc}| = \frac{V_{in_sc}}{1-\alpha_{sc}} + \frac{\Delta V_{out}}{2} = 250.7 \text{ V} \quad (3.155)$$

- Contrainte maximale en courant :

$$I_{S_max_sc} = |I_{D_max_sc}| = \frac{I_{out_sc}}{1-\alpha_{sc}} + \frac{\Delta I_L}{2} = 1640.455 \text{ A} \quad (3.156)$$

- ❖ Le tableau suivant résume les résultats de dimensionnement des convertisseurs :

Les sources	Source PV (Boost)	Source Batt (Boost)	Source SC (Buck-Boost)
Puissance de sortie (kW)	0.922	55.394	63.692
Courant de sortie (A)	4.61	276.97	312.09
Rapport cyclique	0.743	0.936	0.807
Courant efficace de l'interrupteur (A)	15.46	4186.89	2260.6
Courant efficace de la diode (A)	9.094	1094.82	710.42
Tension maximale supportée par "S" et "D" (V)	201.96	202	250.7

Courant maximal supporté par "S" et "D" (A)	18.28	4348.42	1640.455
Valeur de l'inductance L (mH)	6.038	0.1003	0.068
le rendement	0.98	0.98	0.98
l'ondulation de tension (V)	4	4	4
l'ondulation de courant (A)	0.69	41.54	46.814

Tableau3.8 Résumé des résultats

3.9 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sur Matlab-Simulink sont illustrés sur les figures suivantes.

❖ Scénario : 1

Deux sources d'énergie sont utilisées pour alimenter notre voiture électrique hybride : Les batteries et les supercondensateurs.

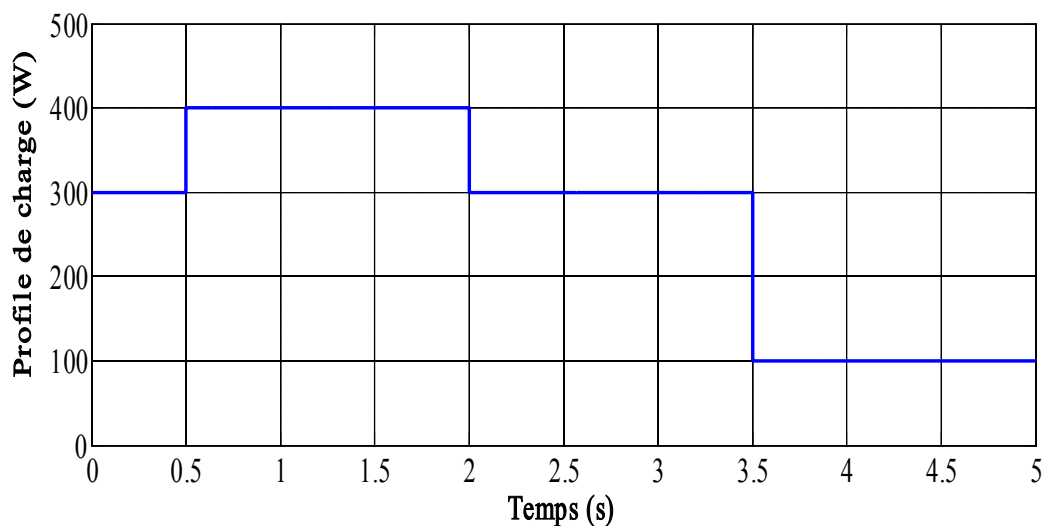


Figure3.5 Profil de la charge (scénario 1).

La figure (3.5) illustre le profil de charge qui a été utilisé pour valider la robustesse et l'efficacité de la commande proposée, dont les séquences de la demande sont comme suit :

A $t=0s$, une demande de puissance de l'ordre de 300W au démarrage du système hybride.

A $t=0,5s$, une augmentation de la puissance demandée vers une valeur de 400W.

A $t=2s$, une diminution de la puissance demandée vers une valeur de 300W.

A $t=3.5s$, une autre diminution de la puissance demandée vers 100W.

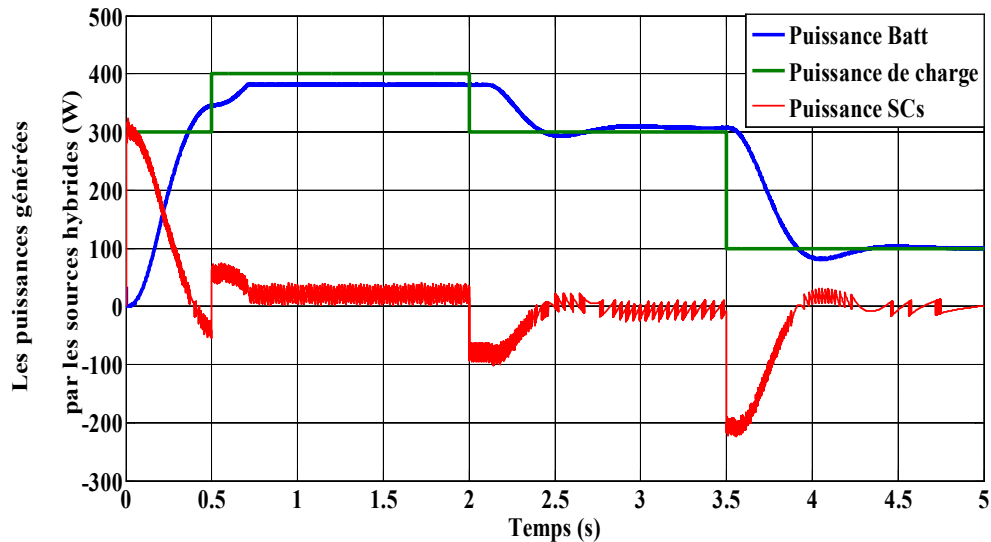


Figure 3.6 les puissances générées par les deux sources employées.

La figure (3.6) représente l'évolution des puissances générées par la source primaire (batterie) et la source auxiliaire (supercondensateur) en fonction des variations de la charge.

A $t=0s$ la batterie commence à produire son énergie et les supercondensateurs fournissent une puissance de 300W nécessaire pour le démarrage.

A $t=0.5s$ la charge atteint une valeur de 400W, on remarque que les supercondensateurs interviennent à la partie transitoire (échelon positif : mode d'accélération) et contribuent à la satisfaction de la forte demande de puissance, d'autre part, la puissance de la batterie augmente et suit toujours l'allure de la charge.

A $t=2s$ une diminution de la puissance de charge de 400W à 300W (échelon négatif : mode de freinage), provoque la récupération de l'énergie par les supercondensateurs, ce qui implique que la batterie couvre la demande permanente de puissance et fournit toute la puissance requise.

A $t=3.5s$ une autre diminution de charge vers une valeur de 100W. D'un part, les supercondensateurs interviennent à la partie transitoire (échelon négatif : mode de freinage) et absorbent le superflu de puissance, d'autre part, on observe une

diminution de la puissance provenant de la batterie afin d'assurer l'équilibre de puissance entre les sources et la charge.

❖ Scénario : 2

En ajoutant la troisième source : les cellules photovoltaïques.

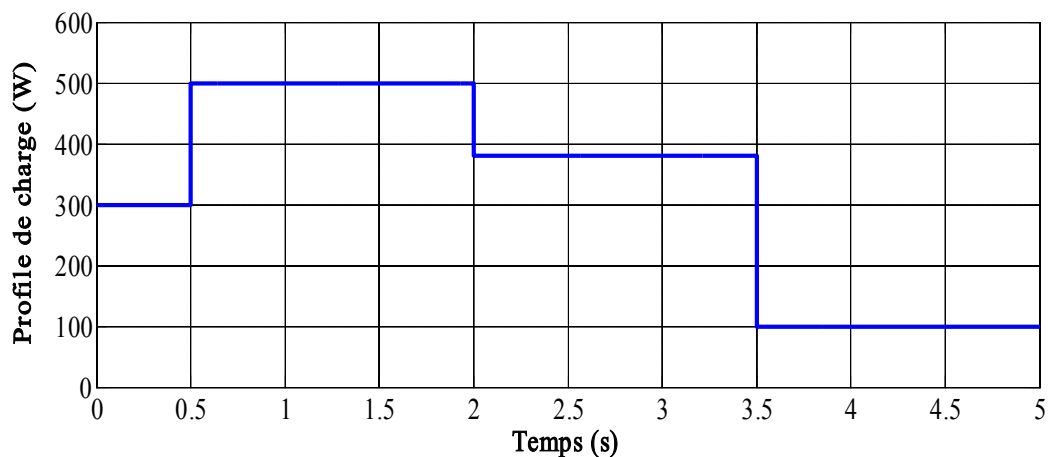


Figure3.7 Profile de la charge (scénario 2).

La figure (3.7) illustre le profil de charge qui a été utilisé pour valider la robustesse et l'efficacité de la commande proposée, dont les séquences de la demande sont comme suit :

A $t=0s$, une demande de puissance de l'ordre de 300W au démarrage du système hybride.

A $t=0,5s$, une augmentation de la puissance demandée vers une valeur de 500W.

A $t=2s$, une diminution de la puissance demandée vers une valeur de 380W.

A $t=3.5s$, une autre diminution de la puissance demandée vers 100W.

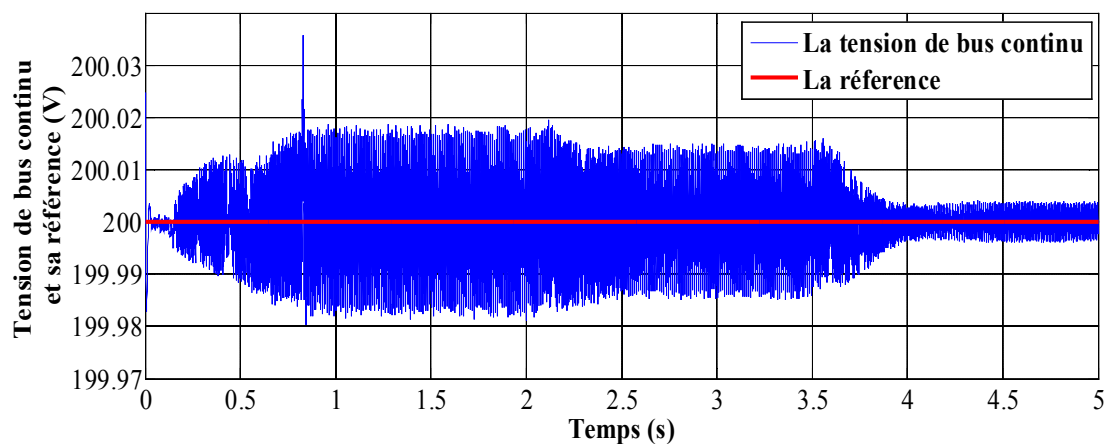


Figure3.8 Tension du bus continu.

La figure (3.8) représente la tension du bus continu. Cette figure montre également le bon comportement de la tension de sortie ajustée à la tension souhaitée (200V) pendant quatre changements importants de la charge, avec échelon positif et négatif. On peut remarquer une bonne traque de la référence de tension, par conséquent, la tension de sortie suit sa référence avec une erreur statique maximale ne dépassant pas les 0.02% (0.04V).

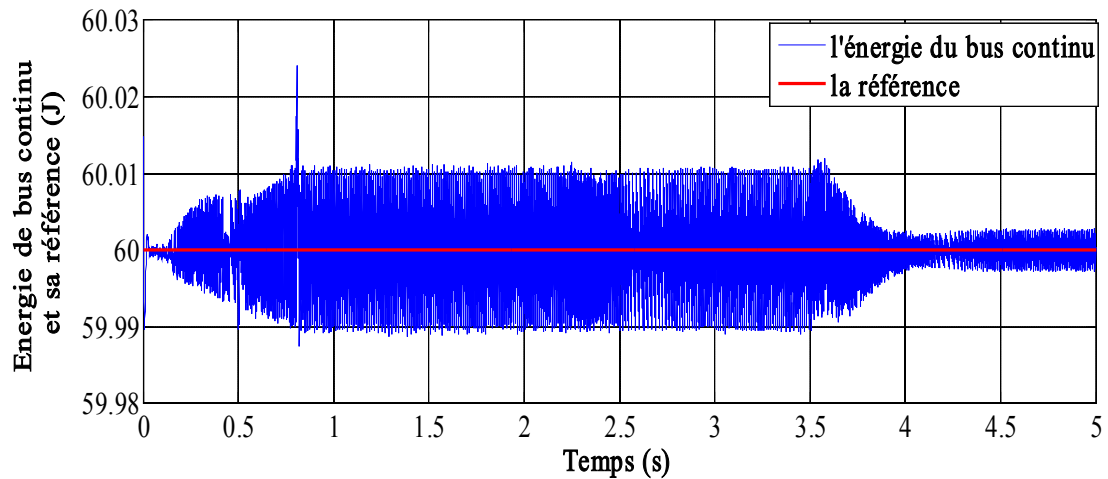


Figure3.9 Energie du bus continu et sa référence.

La figure (3.9) illustre les trajectoires d'énergie électrostatique du bus continu qui suit parfaitement sa référence quel que soit le mode de fonctionnement (accélération – freinage). On déduit que la commande par platitude (dans sa première boucle de régulation : ajustement de la tension de bus continu) donne une bonne performance dynamique lors de la variation de la charge avec une faible erreur statique.

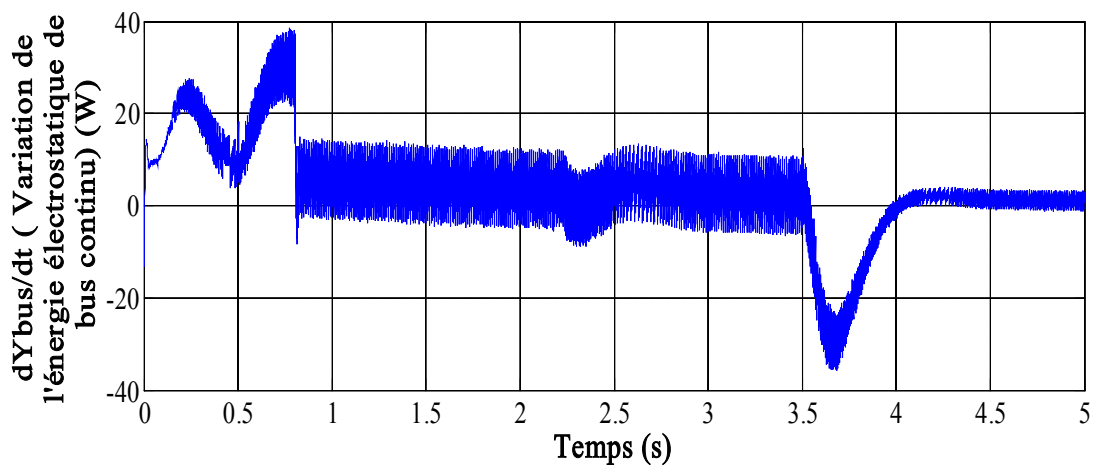


Figure3.10 Variation de l'énergie électrostatique dans le bus continu.

La figure (3.10) montre la variation de l'énergie électrostatique au niveau du bus continu (la puissance transitée via le condensateur de bus continu). On constate que cette variation converge vers zéro, ce qui implique un bon asservissement des signaux de commande obtenues à travers la commande plate et les régulateurs des courants de référence. De ce fait, une stabilité de la tension de sortie a été obtenue.

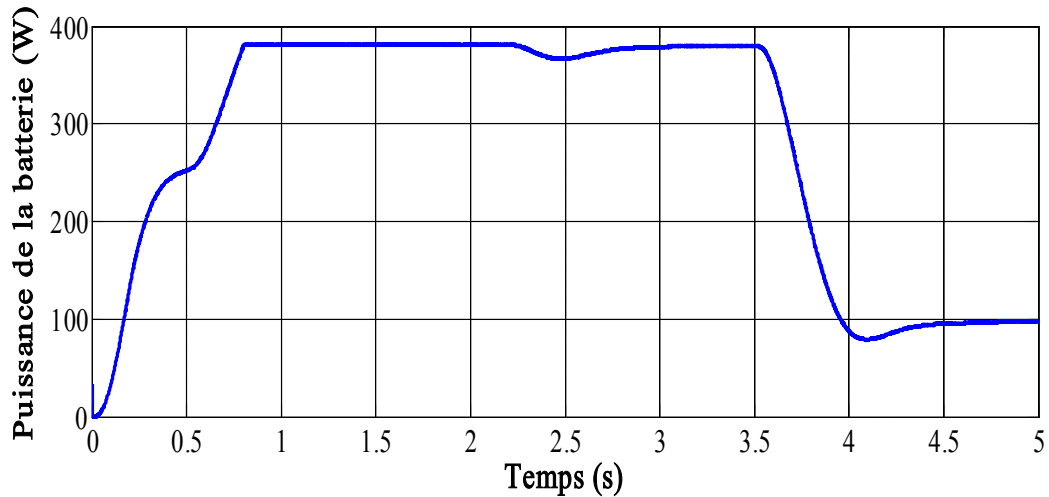


Figure 3.11 Puissance produite par la source primaire (batterie).

La figure (3.11) montre les changements survenus au niveau de la puissance produite par la source primaire (batterie) passant par les différents modes de fonctionnement de la charge.

La batterie commence à produire son énergie au démarrage du système. La puissance générée par la batterie dépend essentiellement des signaux de commande du convertisseur boost associé.

Cette puissance contribue avec les autres sources du système hybride pour répondre à la puissance de charge demandée durant le temps de fonctionnement.

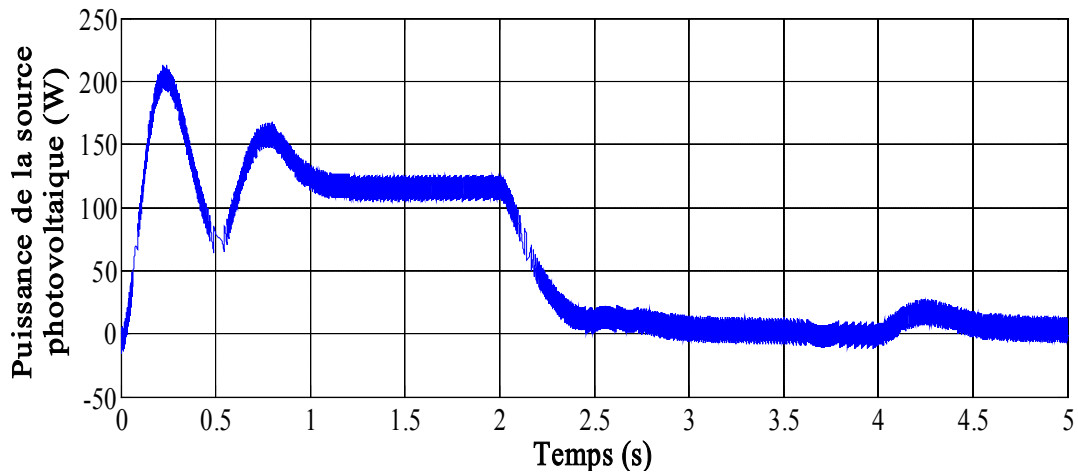


Figure3.12 Puissance produite par la source (PV).

La figure (3.12) révèle le comportement de la source secondaire (PV), La source photovoltaïque commence à produire son énergie au démarrage du système progressivement, La puissance générée par la source PV dépend du profil de l'éclairement et des signaux de commande du convertisseur boost associé qui sont engendrés via un algorithme MPPT.

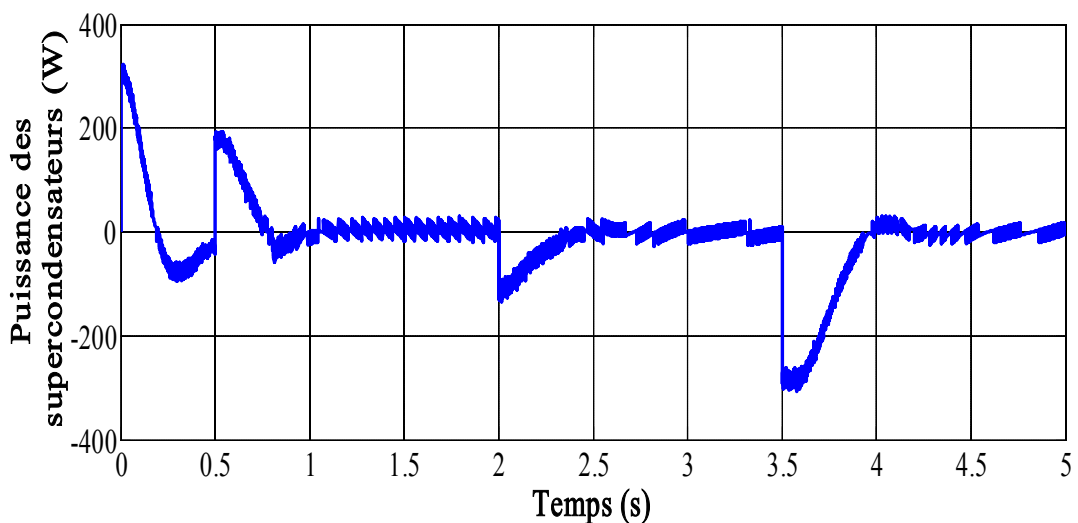


Figure3.13 Puissance des supercondensateurs (SC).

La figure (3.13) révèle le comportement de la puissance des supercondensateurs durant les variations de la charge. Les supercondensateurs sont utilisés comme une source de puissances afin de couvrir les changement énergétique transitoire de la charge, dont ils peuvent fournir ou absorber un courant très élevé, ce qui est très important pour la récupération de l'énergie lors un freinage, ainsi que

l'absorption de puissance aux instants de superflu engendré lorsque la puissance fournit par les sources primaires est supérieur à celle demandée par la charge. La tension des supercondensateurs est employée aussi dans la première boucle de régulation pour le réglage et l'ajustement de la tension de sortie au niveau du bus continu.

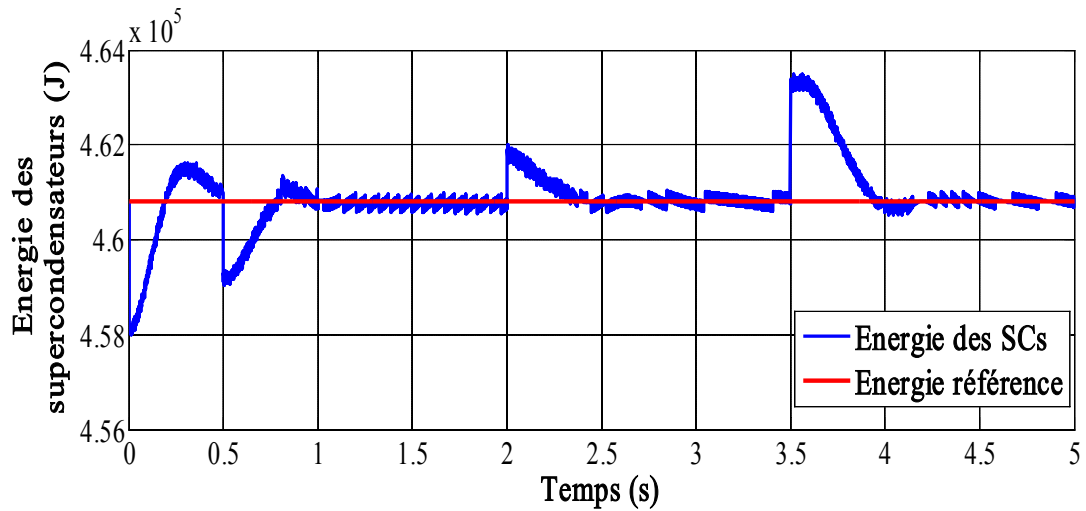


Figure3.14 Energie fournit par les supercondensateurs et sa référence.

La figure (3.14) montre l'évolution d'énergie électrostatique stockée sur les super-condensateurs et leurs références pendant les variations de charge. L'asservissement d'énergie à leur référence fonctionne parfaitement quel que soit le mode de fonctionnement afin de stabiliser le système à sa tension de sortie 200V.

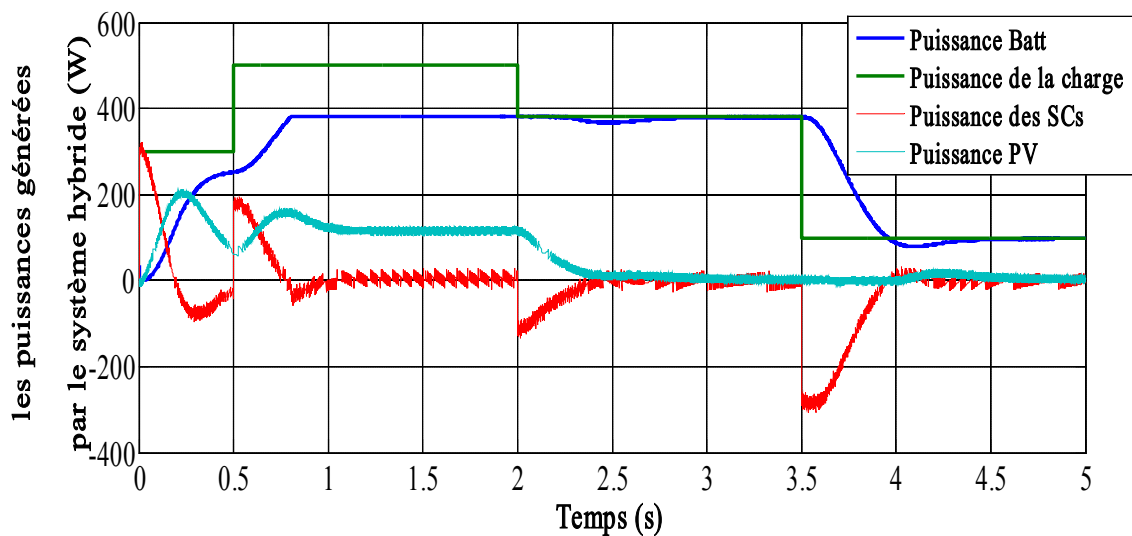


Figure3.15 les puissances générées par les différentes sources employées.

Les courbes relatives aux variations de puissances générées par notre système hybride sont présentées sur la Figure (3.15), ce qui permet d'interpréter le comportement des sources d'énergie et de vérifier le bilan de puissance des sources hybrides étudiées. Notons qu'une valeur positive de puissance de charge implique une accélération de VE et une valeur négative de charge représente un mode de freinage et aussi la recharge de l'élément de stockage (récupération d'énergie).

Nous remarquons que l'équilibre de la puissance exprimé par l'équation suivante est toujours conservé pour les différents cas d'utilisation.

$$P_{ch} = P_{Batt} + P_{PV} + P_{SC} \quad (3.158)$$

La valeur initiale de la puissance de charge est égale à 300W.

En revanche, lorsque les puissances de la source primaire et la source secondaire sont à zéro, le dispositif de stockage (qui est initialement complètement chargé) génère une puissance égale à 300W pour couvrir la puissance de charge demandée instantanément.

A $t=0,1s$, la commande plate oriente la batterie et la source photovoltaïque pour faire alimenter la charge et charger les super-condensateurs en utilisant le superflu de la puissance générée.

A $t = 0,5s$, la puissance de la charge passe de 300 W à 500W (mode d'accélération). Comme la puissance de la batterie n'atteint pas la valeur de charge requise (une limitation qui simule un mode économique afin d'exploiter une puissance PV disponible gratuitement), la source photovoltaïque et les super-condensateurs produisent le reste de la puissance de charge pour compenser la valeur demandée.

A $t=2s$, une diminution de la puissance de charge à une valeur constante de 380W (mode de freinage). D'un part, les supercondensateurs interviennent à la partie transitoire et absorbent le superflu de la puissance, d'autre part, on observe une stabilité de l'énergie produite par les batteries et une diminution de l'énergie provenant de la source photovoltaïque afin d'assurer l'équilibre entre les sources et la charge.

A $t=3.5s$ une autre variation de charge a été provoquée vers une valeur de 100W (mode de freinage), le SC continue à absorber le superflu de la puissance avec une diminution de l'énergie provenant des sources. Cependant, la source primaire génère la puissance demandée et la source secondaire tend vers le zéro.

Par conséquent, le bilan de puissance est toujours équilibré entre la production des sources hybrides et la consommation de la charge.

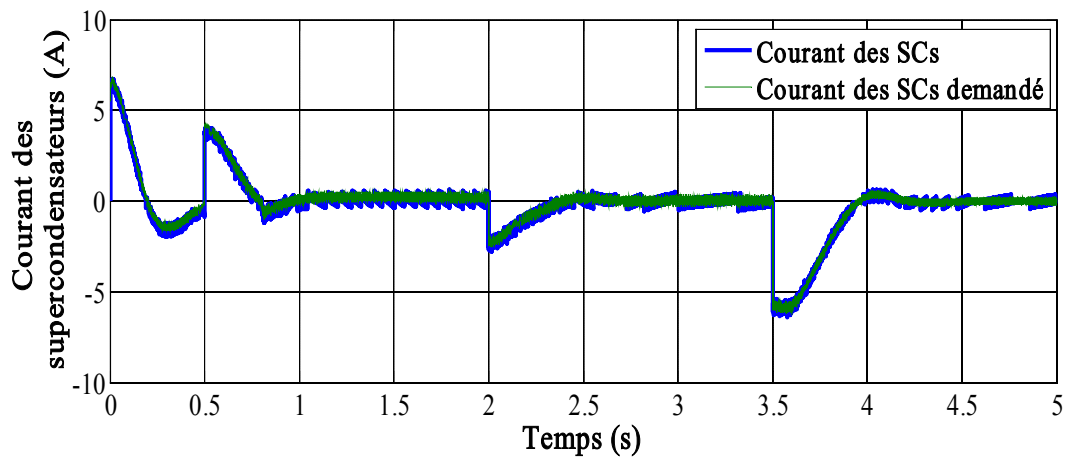


Figure3.16 Courant des supercondensateurs et le courant demandé par la commande plate.

La figure (3.16) montre les variations du courant produit par les supercondensateurs pour les différents modes de fonctionnement et pendant les perturbations de la charge.

A $t=0s$ et à $t=0.5s$ le courant du pack de super-condensateurs augmente rapidement pour couvrir l'appel d'énergie demandée par la charge.

A $t=2s$ et à $t=3.5s$ le courant du pack de super-condensateurs diminue rapidement pour récupérer l'énergie pendant la décélération.

On peut remarquer le bon comportement de régulateur PI, pour chaque instant des régimes transitoires et on observe que le courant fourni par les supercondensateurs suit parfaitement leur référence, par conséquent les supercondensateurs contribue à la stabilité de système.

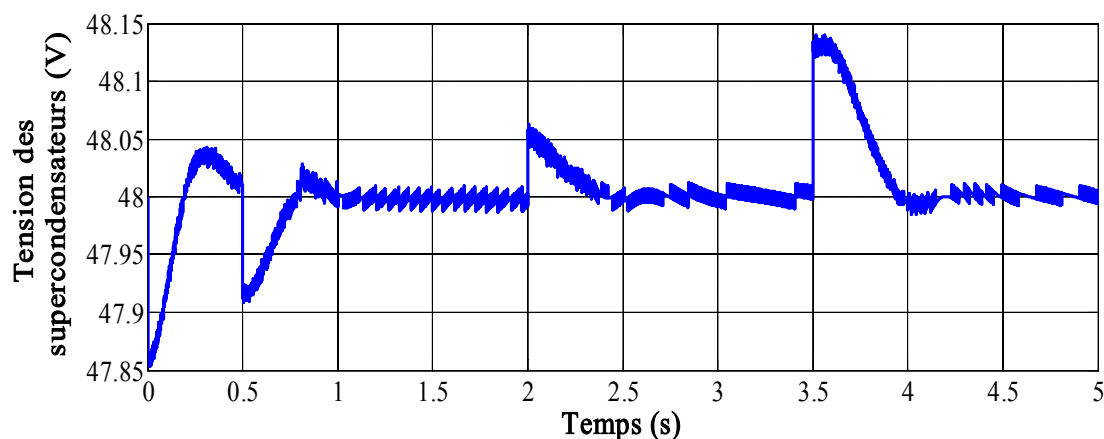


Figure3.17 Tension des supercondensateurs.

La figure (3.17) montre l'évolution de la tension mesurée aux bornes du pack de super-condensateurs.

La tension initiale des super-condensateurs est égale à 47,85V et sa référence est fixée à 48V. La tension du pack de super-condensateurs converge bien vers sa valeur de référence en régime permanent.

Une diminution de la tension aux bornes des super-condensateurs au démarrage engendrée par une augmentation du courant qui permet la fourniture d'énergie à la charge.

A $t=0.5s$ une autre diminution de la tension des SC à cause de forte demande du courant de la charge pour couvrir les pics de puissance pendant l'accélération.

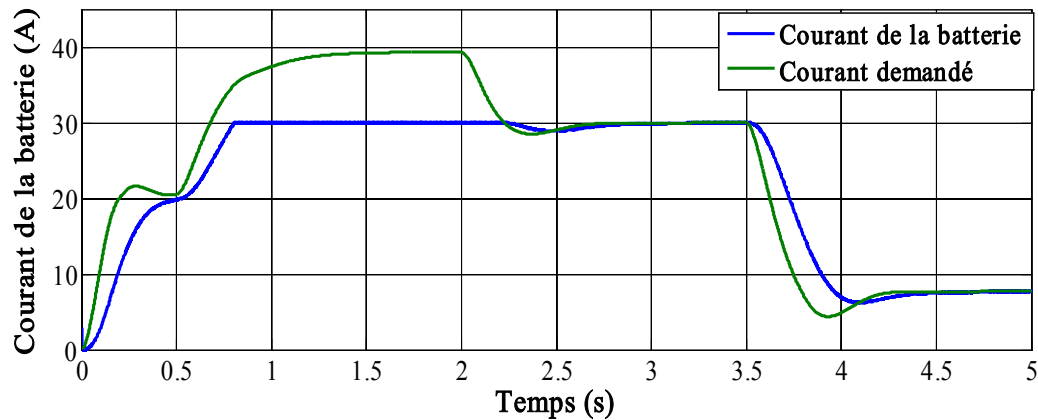


Figure3.18 Courant de la batterie et le courant demandé par la commande plate.

La figure (3.18) présente une comparaison entre le courant généré par la batterie avec celle obtenue par l'algorithme de contrôle. Cette comparaison valide les bonnes performances de la commande par platitude ainsi que le régulateur, du coup le courant de la batterie est limité pour activer le mode économique.

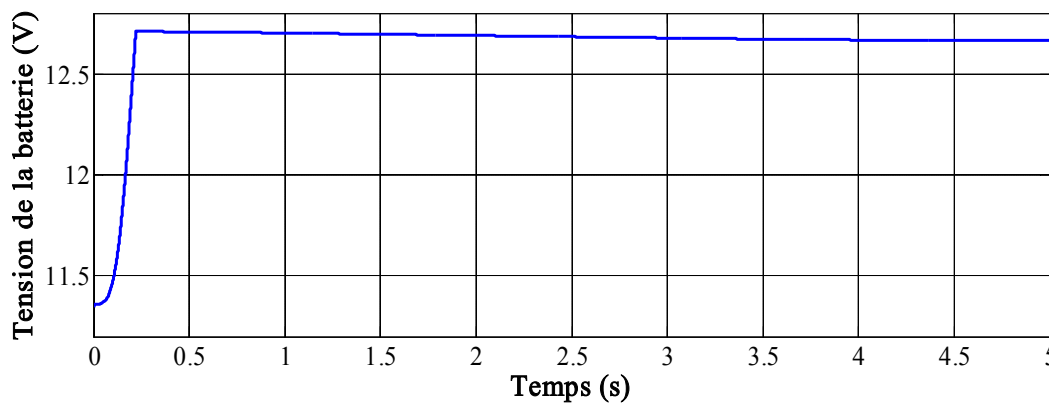


Figure3.19 Tension de la batterie.

La figure (3.19) montre l'évolution de la tension mesurée aux bornes de batterie. La tension initiale est égale à 11.4V au démarrage de système.

A $t=0.2$ s La tension de batterie commence à augmenter jusqu' à presque 12.8V et reste constante pendant les variations de la charge.

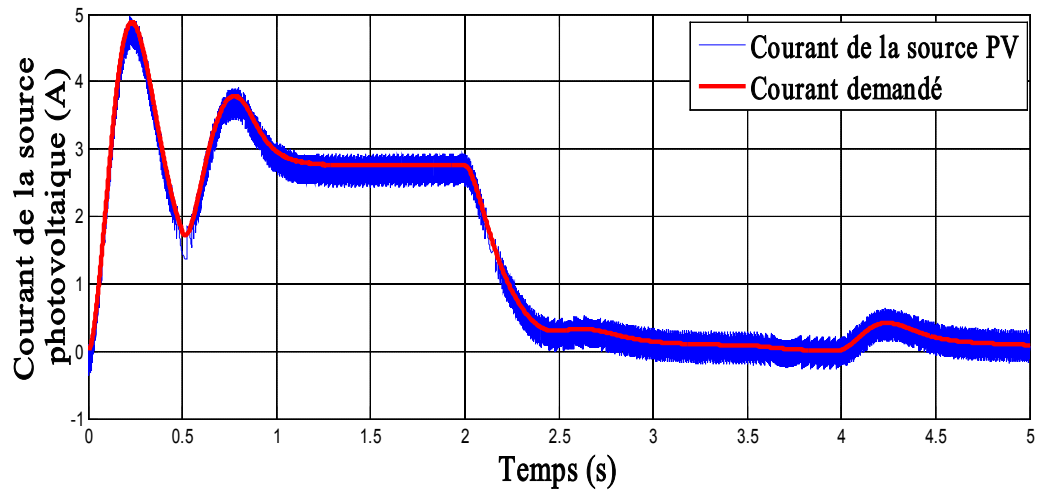


Figure3.20 Courant de la source PV et le courant demandé par la commande plate.

Cette figure (3.20) confirme que le courant produit par la source photovoltaïque est proche de sa référence sur une large plage de temps quel que soit le mode de fonctionnement de la charge.

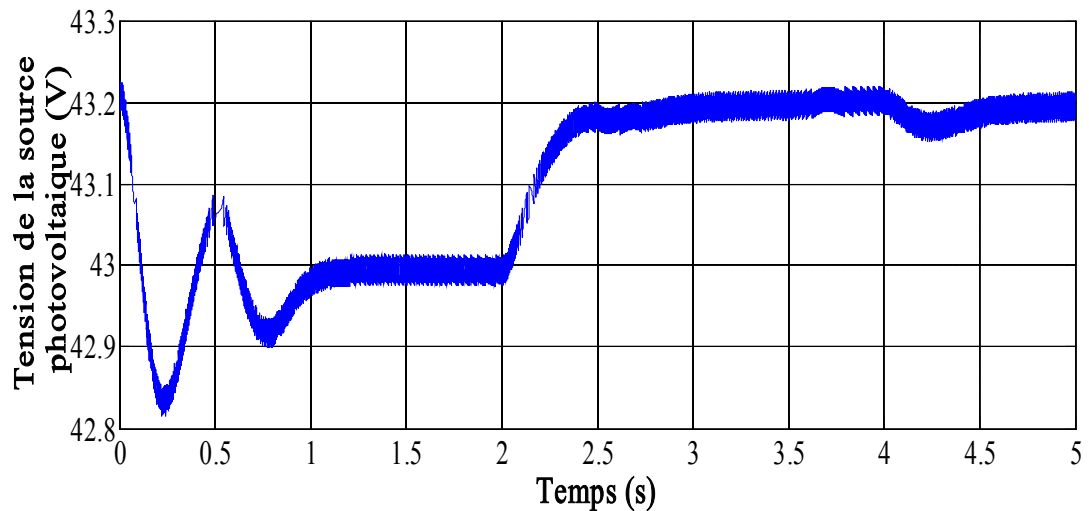


Figure3.21 Tension de la source PV.

La figure (3.21) affirme que la tension de PV suit le chemin inverse de son courant.

La tension de PV est supérieure à 43.2V au démarrage de système après elle commence à varier en dépend de comportement de la charge fixé précédemment.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux sources dans notre système hybride ont été modélisés, nous avons abordé aussi les formules mathématiques décrivant la commande plate, également les formules révélant la preuve de platitude de notre système et les signaux de commande des convertisseurs. Le système hybride et ces différents convertisseurs ont été dimensionnés afin de passer à l'étape de simulation, qui était implémentée sous l'environnement de Matlab-Simulink. Les mesures des différentes paramètres obtenus de notre commande présente des résultats intéressants, soit au niveau de la régulation de tension de bus continu, ou bien sur le plan d'un gestionnaire d'énergie produite par les diverses sources.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était de développer un gestionnaire d'énergie pour un système hybride qui se compose de deux différentes sources renouvelables et non renouvelables, à savoir les batteries et les cellules solaires, en utilisant un dispositifs de stockage, ce système est commandé, modélisé et dimensionné afin d'être destiner à une application d'alimentation d'un moteur du véhicule électrique.

Nous avons tout d'abord consacré la première partie à la modélisation dynamique du véhicule électrique à travers une description générale de cette dernière. Nous avons présenté aussi l'expression mathématique de la puissance de traction, ainsi que la notion de la consommation d'énergie dans un véhicule électrique. Après, nous avons défini les véhicules purement électriques et les véhicules à énergie solaire. Aussi, nous avons abordé le concept d'hybridation et le taux d'hybridation, présenté son importance dans l'économie des carburants et par conséquent dans la réduction des gaz à effet de serre et donné une classification et les différentes configurations des véhicules électriques hybrides existants.

Dans la seconde partie de ce mémoire qui concernait la présentation générale des sources d'énergies qui peuvent alimenter notre voiture électrique hybride. Puis nous avons exposé leur principe de fonctionnement, les types de chaque sources, leurs modélisations électriques et leurs avantages et inconvénients, ensuite nous avons abordé les notions suivantes : la puissance spécifique, l'efficacité énergétique ainsi que l'état de charge des batteries et des super-condensateurs. À la fin il s'agit d'une généralité sur le principe d'hybridation des sources d'énergie embarquées.

Dans le dernier chapitre, nous avons modélisé et dimensionné les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux différentes sources constituant notre système hybride, ainsi le dimensionnement des sources. La définition et le modèle mathématique du système, la commande par platitude appliquée par ses formules des signaux de contrôle. Afin de réguler les courants des convertisseurs, le

régulateur PID était employé dans ce travail. Les résultats de simulation ont montré une bonne performance de notre gestionnaire d'énergie avec une erreur statique au niveau de la tension de sortie du bus continu, qui est régulé à 200V, ne dépassait pas le 0.02%. L'implémentée sous l'environnement de Matlab/Simulink nous a permis d'examiner et étudier le comportement et la performance de notre gestionnaire qui a pour objectif de gérer le flux de puissance générée par le système hybride. Ces résultats aussi ont montré que notre approche établie sur la notion de platitude se contrôle de manière très robuste, avec laquelle, nous testions le système sous de fortes variations de charge échelonnées négativement et positivement.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Chelghoum, R. Haddad, A. Remli, and D. Aouzelag, "Véhicule électrique à base d'un moteur synchrone à aimants permanents double étoile," Université Abderahmane MIRA de Bejaia, 2019.
- [2] I. MARIF, "La commande en vitesse d'un véhicule électrique," 2019.
- [3] H. BENARIBA, "Contribution à la commande d'un véhicule électrique," 2018.
- [4] O. KRAA, "Commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique," Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [5] V. Mester, "Conception optimale Systémique des Composants des Chaînes de traction Electrique," 2007.
- [6] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, "Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles-fundamentals, theory, and design second edition," ed: China Machine Press, Beijing, 2010.
- [7] W. Liu, *Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control*: John Wiley & Sons, 2017.
- [8] J. Larminie and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*: John Wiley & Sons, 2012.
- [9] A. Neffati, "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride," Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [10] A. Florescu, "Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique," 2012.
- [11] I. Tegani, "Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque," Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [12] M. BERREKBIA and M. BENAOUADJ, "Gestion d'énergie dans une véhicule électrique hybride."
- [13] M. A. Camara, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs," 2011.

- [14] M. T. a. T.Hanancha, "Commande d'un Hacheur" BOOST" Alimenté par un Panneau Solaire à l'Aide d'une Carte Arduino," 2017.
- [15] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John wiley & sons, 2006.
- [16] S. Bensalem, "Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires," 2018.
- [17] B. Equer, "Energie solaire photovoltaïque," *Physique et technologie de la conversion photovoltaïque*,(Ellipses, UNESCO, 1993), pp. 66-137, 1993.
- [18] M. G. Gérard, "EPITAXIE EN PHASE VAPEUR DE SILICIUM SUR SILICIUM MESOPOREUX POUR REPORT SUR SUBSTRATS ECONOMIQUES ET APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE BAS COÛT," INSA de Lyon, 2003.
- [19] S. Benmansour, "Voiture solaire - Solar Car. Solar Car.," 2019.
- [20] R. JAVET, "Histoire des véhicules et des aventures solaires," 2016.
- [21] T. Mesbahi, "Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique," 2016.
- [22] F. Mudry, "Ajustage des paramètres d'un régulateur PID," *Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud-Département d'électricité et informatique*, 2002.
- [23] B. Laroche, P. Martin, and N. Petit, "Commande par platitude. Equations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles," 2008.
- [24] I. Tégni, A. Aboubou, M. Ayad, M. Becherif, R. Saadi, and O. Kraa, "Optimal sizing design and energy management of stand-alone photovoltaic/wind generator systems," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 163-70, 2014.