

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2022



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour obtenir le diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Présenté par :

Mr. FLIH ABOU BAKRE

Mr. HAMMOU ABDELHAKIM

THEME :

Utilisation des supercondensateurs et des batteries pour le
stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique

Soutenu le 11 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Présidente :	Mme. F. BECHIRI	MCB	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. M. BENDAHA	MAA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mme. H. NEDDAR	MCA	Université de Mostaganem

REMERCIEMENTS

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu ALLAH le plus Puissant qui a bien voulu nous donner la force et le courage pour effectuer ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Madame "**H. NEDDAR**", parce qu'elle nous a accompagnés tout au long de la période de réalisation de ce travail et qui a coopéré avec nous et ne nous a pas épargné ses conseils et ses connaissances dont nous avons grandement bénéficié.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce mémoire.

Merci aussi à tous les enseignants du département Génie Electrique qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous exprimons toute nos gratitude à nos familles et amis et tous ceux qui ont contribué avec nous à mener à bien ce travail de près ou de loin.

RESUME

Les composants de stockage de l'énergie électrique restent le point bloquant au développement des véhicules électriques. Les supercondensateurs stockent l'énergie électrique majoritairement sous forme de charges électriques (réservoirs de puissance) de manière complémentaire aux batteries électrochimiques (réservoirs d'énergie). C'est la raison pour laquelle l'association de ces deux composants est intéressante pour les applications traction électrique.

Ce travail s'intéresse essentiellement sur l'étude d'un modèle pour la source hybride (batterie/ supercondensateur) de stockage d'énergie. Les résultats de simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK montrent les performances du modèle et confirment l'efficacité de cette approche pour le stockage de l'énergie embarqué dans le véhicule électrique.

Mots clés : véhicule électrique, batterie, supercondensateur, énergie, stockage.

ملخص

تظل مكونات تخزين الطاقة الكهربائية العقبة الرئيسية أمام تطوير السيارات الكهربائية. تخزن المكثفات الفائقة بشكل أساسي على شكل شحنات كهربائية (خزانات الإستطاعة) بطريقة مكتملة للبطاريات الكهروكيميائية (خزانات الطاقة). هذا هو السبب في أن الجمع بين هذين المكونين مثير للإهتمام في تطبيقات الجر الكهربائي.

يركز هذا العمل على دراسة نموذج لمصدر تخزين الطاقة الهجين (البطارية/المكثف الفائق). كما تثبت نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB / SIMULINK أداء النموذج وتؤكد فعالية هذا النهج في تخزين الطاقة للسيارة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: سيارة كهربائية، بطارية، مكثف فائق، طاقة، تخزين.

ABSTRACT

Electrical energy storage components remain the main obstacle to the development of electric vehicles. Supercapacitors store electrical energy mainly in the form of electric charges (power tanks) in a complementary way to electrochemical batteries (energy tanks). This is why the combination of these two components is interesting for electric traction applications.

This work focuses on the study of a model for the hybrid source (battery/ supercapacitor) for energy storage. The simulation results in the MATLAB/SIMULINK environment show the

model's performance and confirm the efficiency of this approach for the storage of energy in the electric vehicle.

Keywords: electric vehicle, battery, supercapacitor, energy, storage.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Recherche bibliographie sur les supercondensateurs et les véhicules électriques	
I.1 Introduction	4
I.2 Etat de l'art des supercondensateurs.....	4
I.2.1 Historique.....	5
I.2.2 Principes de fonctionnement des supercondensateurs	6
I.2.2.1 Principes physiques de base	6
I.2.2.2 Couche double électrique	9
I.2.3 Technologie des supercondensateurs.....	11
I.2.3.1 Matériaux d'électrodes	11
I.2.3.2 Electrolyte	12
I.2.3.3 Séparateur.....	12
I.2.4 Principaux constructeurs	13
I.2.6 Utilisation des supercondensateurs.....	14
I.2.6.1 Informatique et télécommunication	14
I.2.6.2 Alimentations de secours.....	14
I.2.6.3 Secteur automobile	15
I.3 Etat de l'art du véhicule électrique	16
I.3.1 Définition	16
I.3.2 Historique.....	16
I.3.3 Principe de fonctionnement.....	19
I.3.4 Eléments constituant un véhicule électrique.....	19
I.3.4.1 Les sources d'énergie	20
I.3.4.2 Le systèmes de propulsion électrique	23
I.3.4.3 Les Auxiliaires	26
I.3.5 Les différentes architectures de traction	29
I.3.5.1 Véhicules électriques mono moteur (machine à courant continu)	29
I.3.5.2 Véhicules électriques bi moteur (machine à courant alternatif)	29
I.3.6 Les différents modes de charge pour véhicules électriques	30
I.3.6.1 Prise domestique	30
I.3.6.2 Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection	30
I.3.6.3 Prise spécifique sur un circuit dédié :	30
I.3.6.4 Connexion courant continu :	31

Table des Matières

I.3.7 Système de charge et niveaux de puissance.....	31
I.3.8 La distance parcourue avant d’avoir recharger le véhicule électrique	32
I.3.9 Les principales configurations des véhicules électriques.....	32
I.4 Conclusion	35
CHAPITRE II : Etude et Modélisation	
II.1 Introduction	37
II.2 Modélisation et identification des paramètres des supercondensateurs	37
II.2.1 Modèle de base RC	37
II.2.2 Modèle à deux branches de Zubieta	38
II.2.2.1 Détermination des paramètres du modèle	41
II.2.2.2 Limites du modèle à deux branches	43
II.2.3 Modèles tenant compte du comportement en fréquence en fonction de la nature des pores des électrodes	44
II.2.3 Modèle à constantes réparties de Belhachemi	45
II.2.4 Modèle fréquentiel de Buller	46
II.3 Modélisation de la batterie	48
II.3.1 Equation électrique de charge et décharge	48
II.3.2 Equation de l’état de charge	49
II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC	49
II.4.1 Convertisseur Boost (survolteur)	49
II.4.2 Convertisseur Buck-Boost (dévolteur-survolteur).....	51
II.5 Conclusion	53
CHAPITRE III : Etude et Simulation	
III.1 Introduction	56
III.2 Modèle de batteries et du supercondensateur.....	56
III.2.1 Modèle de batterie	56
III.2.2 Modèle du supercondensateur	57
III.3 Résultats de Simulation	58
III.4 Conclusion.....	63
CONCLUSION GENERALE.....	65
BIBLIOGRAPHIE	67

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma de principe des supercondensateurs

Figure I.2 : Principe d'assemblage des supercondensateurs

Figure I.3 : Circuit équivalent simplifié d'un supercondensateur

Figure I.4 : Supercondensateurs asymétriques ESMA (3200 F - 80000 F, 1,7 V, 1,4 kW)

Figure I.5 : Modèle de Helmholtz de la couche double électrique

Figure I.6 : Modèle de Stern de la couche double électrique

Figure I.7 : Module supercapacitif NEC 5 F - 24 V

Figure I.8 : Panasonic Gold Capacitor 0,02 - 70 F, 5,5 V

Figure I.9 : Topologie d'une motorisation de véhicule électrique alimentée par source hybride à supercondensateurs

Figure I.10 : Une des premières voitures électrique (Thomas Parker 1884)

Figure I.11 : Le Tesla Roadster I

Figure I.12 : Schéma fonctionnel de la batterie.

Figure I.13 : Diagramme de Ragone pour comparer les performances énergétiques de différents systèmes.

Figure I.14 : Schéma du fonctionnement pour un système de propulsion électrique.

Figure I.15 : Schéma des composantes et de fonctionnement d'un véhicule électrique.

Figure I.16 : Architecture d'un véhicule électrique mono moteur.

Figure I.17 : Architecture d'un véhicule électrique bi moteur.

Figure I.18 : Système de charge et niveaux de puissance pour véhicule électrique.

Figure I.19 : Architecture hybride proposée pour le véhicule électrique à supercondensateurs, Topologie A.

Figure I.20 : Architecture hybride proposée pour le véhicule électrique à Supercondensateurs, Topologie B.

Figure II.1 : Modèle de base du supercondensateur – Profil de décharge à courant constant

Figure II.2 : Modèle électrique des supercondensateurs

Figure II.3: Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A"

Figure II.4 : Capacité en fonction de la tension de charge pour les cellules de 650F, 1500F et 2600F

Figure II.5: Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A"

Figure II.6: Représentation poreuse d'électrode comme ligne de transmission de cinq éléments (KÖTZ, et al., 1999)

Figure II.7: Circuit du modèle à ligne de transmission représentant le phénomène de redistribution des charges

Figure II.8 : Circuit de base du modèle fréquentiel

Figure II.9 : Approximation de l'impédance de l'électrode poreuse à l'aide du schéma équivalent (le nombre de paramètres réduit à 2)

Figure II.10 : Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

Figure II.11 : Schéma de convertisseur Boost

Figure II.12 : Schéma de convertisseur Boost état ON

Figure II.13 : Schéma de convertisseur Boost état OFF

Figure II.14 : Schéma de convertisseur Buck- Boost

Figure II.15 : Schéma Buck-Boost d'un Interrupteur ON

Figure II.16: Schéma Buck-Boost d'un Interrupteur OFF

Figure III.1 : Modèle Simulink de la batterie

Figure III.2 : Modèle Simulink du supercondensateur

Figure III.3 : Modèle Simulink du supercondensateur et de batterie.

Figure III.4 : Les Caractéristiques du SOC, le courant et la tension de la batterie

Figure III.5 : Les caractéristiques du SOC, le courant et la tension du supercondensateur

Figure III.6 : La puissance du supercondensateur et de la batterie

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles

Tableau I.2 : Résume les performances du supercondensateur et de la batterie

Tableau I.3 : Temps de charge des batteries

Tableau I.4 : Puissances consommées par les auxiliaires des véhicules conventionnel

Tableau III.1 : Paramètres de la batterie

Tableau III.2 : Paramètres du supercondensateur

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

NEC	Nippon Electric Company
DOE	Department of Energy
C	La capacitance
Q	La charge électrique
V	La tension appliquée
E	La constante diélectrique du matériau isolant
A	La surface du matériau isolant
d	L'épaisseur du matériau isolant
W	L'énergie électrostatique stockée
C_{dl}	La capacité de la couche double électrique
C_H	La capacité associée à la couche compacte
C_{diff}	La capacité différentielle
GM	Général Motors
EV	Voiture électrique
LEAF	Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car
DC	Courant direct
AC	Courant alternatif
R	La résistance
MCC	Moteur à courant continue
MAS	Moteur Asynchrone
MSAP	Moteur Synchrone à aimant permanent
MRV	Moteur à reluctance variable
MSI	Medium-Scale Integration
R_s	La résistance série
VR	La variation de la tension au début de la charge ou de décharge
I	Un courant de charge/décharge constant
V_t	La tension en fonction de temps
$\frac{dV_t}{dt}$	La dérivée temporelle de la tension
Q_{tot}	La quantité de charge totale aux bornes du supercondensateur
K_v	Spectrométrie d'impédance
Vf	Fin de charge du supercondensateur

Liste de Symboles et des Abréviations

$Z(\omega)$	L'impédance de la ligne de transmission
n	Le nombre de pores
h	Hauteur de pores
r	Rayon de pores
K	La conductivité de l'électrolyte
R_i	La résistance de chaque branche
C_i	La capacité de chaque branche
$Z_{harm}(i\omega)$	L'expression mathématique de l'impédance
$Z_{harm}(p)$	La transformée de Laplace
SOCbat	État de charge de batterie
DoD	Profondeur de décharge de la batterie
V_{bat}	La tension en charge
Ebat	La tension à vide
r_{bat}	La résistance interne série
PWM	La modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation)
L	L'inductance
VC	Tension de sortie
i_L	L'inducteur
CCM	Le modèle moyenne de convertisseur à la condition continue
SOC	Etat de charge

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis son apparition l'automobile devient de plus en plus une nécessité principale à l'être humain qui lui permet de faciliter la vie et de minimiser le temps de déplacement, mais dans les dernières années le secteur automobile pose certains problèmes, comme les émissions des gaz à effet de serre et la dépendance au pétrole qui continue à se raréfier. Cette préoccupation a donné naissance aux efforts internationaux pour lutter contre le changement climatique, par exemple, le protocole de Kyoto : une convention entre 183 pays pour lutter contre le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Dans le domaine du transport en Europe, les constructeurs automobiles se sont engagés à réduire l'impact des véhicules sur l'environnement avec un objectif de moins de 95 g de CO₂/km d'ici 2020, contre plus de 130 g/km actuellement.

Afin de répondre à cet objectif, une rupture de technologie comme l'utilisation des véhicules électriques et véhicules électriques hybrides est nécessaire. Cette solution doit intégrer un rapport qualité prix convenable. Des véhicules électriques ont été réalisés et commercialisés. Fin 2018, plus de 5% des véhicules vendus dans le monde étaient électrifiés (véhicules électriques ou hybrides) et l'électrification des véhicules particuliers, ainsi que les fonctions d'autonomie partielle ou complète, sont l'objet de la majorité des nombreuses innovations des constructeurs automobiles. Rarement l'histoire aura vu une filière industrielle effectuer une mutation aussi rapide, d'une prédominance mécanique et thermique à une importance majeure donnée au génie électrique et à l'informatique embarquée.

Les véhicules électriques utilisent différents types de batterie pour le stockage de l'énergie (Pb, Ni-Cd, Li-Ion ...), mais leur durée de vie et leur coût d'entretien ont freiné le développement de ces véhicules. Le problème du stockage de l'énergie embarquée dans le véhicule peut être résolu en utilisant les supercondensateurs et les batteries. Une bonne gestion de l'énergie à bord entre les deux deniers éléments de stockage donnera certainement le véhicule de demain.

Les batteries ont une forte densité énergétique mais une faible densité de puissance. Leur durée de vie en nombre de cycles charge-décharge est relativement limitée. Le développement technologique et la maîtrise de fabrication de nouveaux matériaux ont permis la réalisation

d'autres systèmes modernes de stockage d'énergie électrique comme les supercondensateurs. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries. Un choix de complémentarité en termes de puissance instantanée disponible et de quantité d'énergie stockée permettra d'augmenter les performances des systèmes d'alimentation et minimiser le temps de recharge des véhicules électriques.

Pour atteindre ces objectifs, trois chapitres sont proposés :

Dans le premier chapitre, une étude sur les supercondensateurs et l'état actuel de cette technologie. Nous exposerons en premier lieu les principes physiques associés au fonctionnement de ce composant, ainsi que les différents modèles rencontrés dans la littérature. Nous nous pencherons ensuite sur les applications envisagées tel que l'automobile et la voiture électrique en particulier. Cette dernière est loin d'être une nouvelle idée, bien au contraire c'est une invention qui date depuis le XIXe siècle et qui est améliorée durant les années suivantes, ce qu'on va justement voir dans le premier chapitre ainsi quelques généralités sur cette dernière, un bref historique, et d'étudier son fonctionnement puis ses différentes architectures et les éléments constituant.

L'utilisation des supercondensateurs et des batteries dans les véhicules électriques nécessite de modéliser tous les phénomènes au mieux. Il est donc important d'établir des modèles précis permettant d'évaluer leur comportement en fonctionnement dans différents environnements. La modélisation et la caractérisation de la batterie et du supercondensateur ainsi que les convertisseurs DC/DC (boost et buck/boost) seront dans le deuxième chapitre.

Enfin, dans le dernier chapitre, à partir des lois et modèles obtenu dans le deuxième chapitre, des modélisations et simulations sont effectuées et présentées sous le logiciel MATLAB/Simulink afin d'analyser et de comparer les comportements de la batterie et du supercondensateur en fonctionnement.

A la fin on terminera notre manuscrit par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Recherche Bibliographie sur les Supercondensateurs et les Véhicules Electriques

1.1 Introduction

L'électricité est un vecteur d'énergie très pratique mais présente l'inconvénient d'être difficile à stocker, ce besoin de stockage augmente avec le marché de consommation et plus particulièrement celui de l'automobile. Les différentes batteries de traction utilisées jusqu'à présent ne permettent pas d'atteindre un niveau des performances satisfaisant pour les applications futures des véhicules électriques. Les fabricants des batteries n'étant pas très optimistes sur une évolution rapide des capacités et des performances des batteries de traction, il est intéressant de trouver d'autres solutions permettant de réaliser une source auxiliaire de puissance afin de moins solliciter la batterie pendant les régimes transitoires sévères. Donc quelle est la source auxiliaire nécessaire qui pourra augmenter les performances de véhicule électrique et résoudre ces problèmes de stockage ?

Parmi les solutions technologiques, les supercondensateurs paraissent très intéressants, il s'agit d'une technologie émergente promettant de meilleures performances, non seulement en raison des caractéristiques de ces composants, mais de surcroît parce que le stockage d'énergie est statique, et que ladite énergie est d'une part prête à l'emploi, et d'autre part aisément contrôlable par conversion électronique de puissance.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un état de l'art sur les supercondensateurs et les véhicules électriques et d'étudier l'intérêt des supercondensateurs dans les systèmes embarqués.

1.2 Etat de l'art des supercondensateurs

Un supercondensateur est un condensateur de technique particulière permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques.

On trouve ce composant sous diverses appellations : supercondensateur, bien sûr, mais aussi supercapacité, capacité à couche double électrique, et enfin des termes plutôt utilisés en anglais, comme ultracapacité, capacité électrochimique ou capacité à couche double électrochimique (respectivement "ultracapacitor", "electrochemical capacitor" et "electrochemical double-layer capacitor").

I.2.1 Historique

L'histoire de ce composant commence à la moitié du 19^{ème} siècle, avec la découverte en 1853, par le physicien Hermann von Helmholtz, du phénomène capacitif nommé couche double électrique [1]. La modélisation dudit phénomène s'étend jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, avec notamment les études de Helmholtz, Gouy et Chapman, Stern, et Grahame. Le premier brevet, déposé par la société General Electric pour un composant à électrolyte aqueux et électrodes carbonées poreuses, date de 1957 [2].

En 1969, un second brevet, de la société américaine Sohio Corporation, décrit des dispositifs supercapacitifs à tenue en tension plus élevée, par usage d'électrolytes non-aqueux. Ce brevet sera cédé à NEC en 1971, [3] société qui commercialisera avec succès les premières supercapacités à couche double électrique sous la dénomination "supercapacitor". Il s'agit de dispositifs de petite dimension (capacités de quelques farads, énergie spécifique modeste, de l'ordre de $0,5 \text{ Wh.kg}^{-1}$), destinés à des applications de faible puissance, telle que la sauvegarde mémoire [4].

A la fin des années 70 et au cours des années 80, plusieurs entreprises se lancent dans la production de supercondensateurs. Matsushita Electric Industrial Company, plus connue sous le nom de Panasonic, développe en 1978 la série "Gold Capacitor", également dédiée à la sauvegarde mémoire. En 1987, la société Elna sort une série baptisée "Dynacap", pour applications de faible puissance [5]. Les supercondensateurs de puissance apparaissent dans les années 90. Un programme de développement fut lancé en 1989 par le Department of Energy (DOE) américain avec, pour objectif à court terme, des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 5 Wh.kg^{-1} et de puissance spécifique supérieure à $0,5 \text{ kW.kg}^{-1}$, et pour objectif à long terme (après 2003), des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 15 Wh.kg^{-1} et de puissance spécifique supérieure à 2 kW.kg^{-1} [6]. Ces composants étaient supposés venir en complément de batteries ou de piles à combustible dans les véhicules hybrides, pour fournir la puissance nécessaire durant les phases d'accélération, et de permettre la récupération durant les phases de freinage.

I.2.2 Principes de fonctionnement des supercondensateurs

I.2.2.1 Principes physiques de base

Le principe de stockage d'énergie dans les supercondensateurs repose sur la structure de la couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait un fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classiques. Lesdites sont typiquement constituées de deux électrodes métalliques séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrode-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base s'écrivent, pour une capacité linéaire :

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad \dots \text{(I.1)}$$

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad \dots \text{(I.2)}$$

C étant la capacitance, Q la charge électrique, V la tension appliquée, ε la constante diélectrique du matériau isolant, A sa surface, d son épaisseur, et W l'énergie électrostatique stockée.

Le stockage d'énergie dans les supercondensateurs s'effectue de façon similaire, mais à l'interface entre l'électrode (conducteur électronique) et l'électrolyte (conducteur ionique), comme indiqué figure I.1 [7].

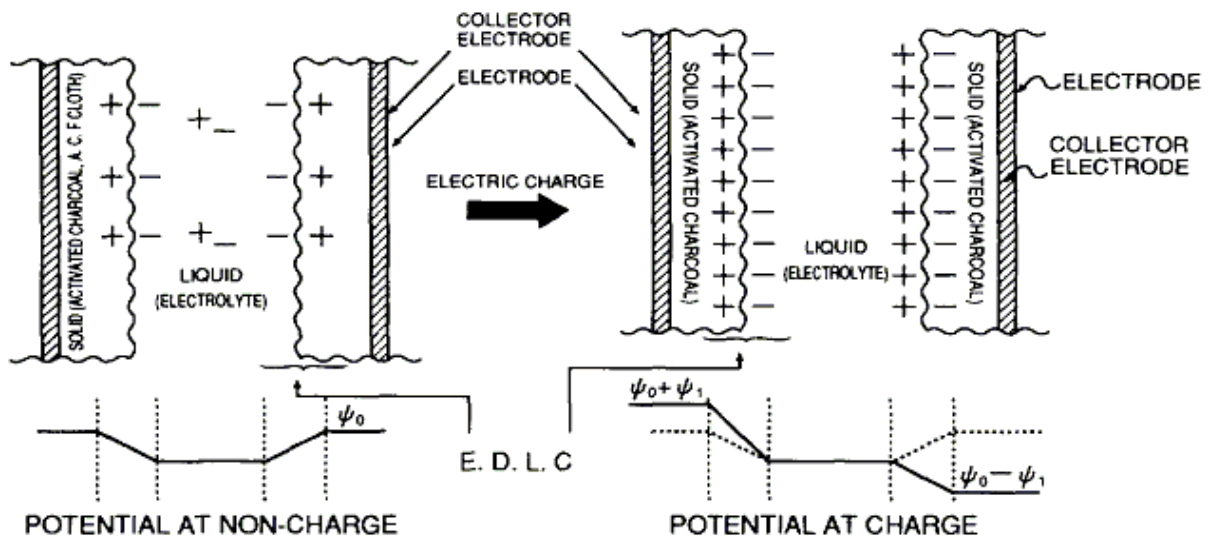


Figure I.1 : Schéma de principe des supercondensateurs [7].

Les molécules de solvant jouent le rôle de diélectrique, soit donc une épaisseur d'isolant de quelques Angströms. De sorte que la capacité surfacique de ces composants est élevée, typiquement de $10 \mu\text{F.cm}^{-2}$ à $30 \mu\text{F.cm}^{-2}$. C'est l'une des raisons de la grande capacitance des supercondensateurs, l'autre étant l'immense surface de contact entre électrode et électrolyte, obtenue par l'usage de matériaux d'électrode poreux. Par exemple, les charbons actifs utilisés actuellement présentent des surfaces spécifiques typiques de 1500 à 2000 $\text{m}^2.\text{g}$. Autre conséquence du rôle de diélectrique "moléculaire" joué par le solvant, une tenue en tension modeste, limitée par la décomposition du solvant, de l'ordre de 2,5 V pour un solvant organique.

Un supercondensateur se compose donc, de deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, et séparées par une membrane isolante et poreuse (pour assurer la conduction ionique). La couche double électrique se développe sur chaque interface électrode-électrolyte, de sorte que l'on peut voir, de façon simplifiée, un supercondensateur comme l'association série de deux capacités (cf. figure I.3) : l'une, C_1 , développée à l'électrode positive, et l'autre, C_2 , à l'électrode négative. La capacité totale vaut donc :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \dots (1.3)$$

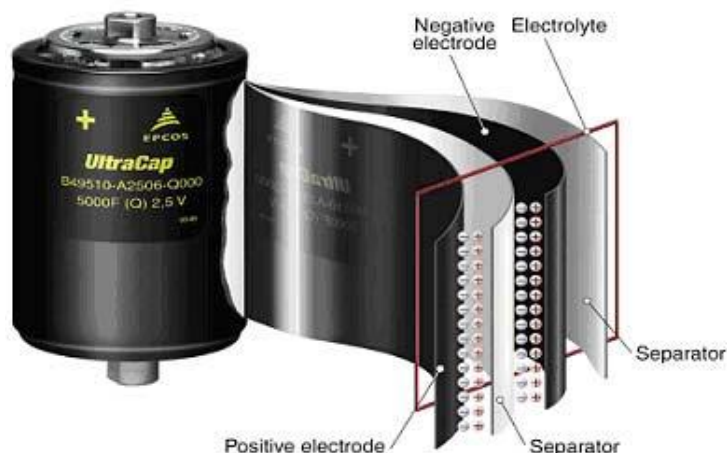


Figure I.2: Principe d'assemblage des supercondensateurs [8].



Figure I.3: Circuit équivalent simplifié d'un supercondensateur.

La technologie actuellement la plus répandue, côté matériau d'électrodes, est celle du charbon actif. Les supercondensateurs issus de cette filière fonctionnent sur le principe de la couche double électrique, et sont dits symétriques. Ce qui ne signifie nullement que les capacités développées à chaque électrode sont égales. En pratique, les anions étant généralement beaucoup moins hydratés que les cations, ils accèdent plus facilement à la microporosité et forment une couche d'épaisseur plus faible. De sorte que l'on observe des valeurs de capacité d'anode supérieures à celles de cathode.

On trouve également, nous en donnons un exemple figure I.4, des dispositifs dits asymétriques, pour lesquels les électrodes sont différentes : électrode négative polarisable en charbon actif, et électrode positive faradique contenant de l'hydroxyde métallique (de l'hydroxyde de nickel, par exemple). Le fonctionnement de ce type de dispositifs est hybride, électrostatique côté électrode négative, et électrochimique côté électrode positive. En conséquence, la capacitance de l'électrode positive est nettement supérieure à celle de son homologue négative, laquelle représente donc sensiblement la capacitance résultante.



Figure I.4: Supercondensateurs asymétriques ESMA (3200 F - 80000 F, 1,7 V, 1,4 kW) [9].

I.2.2.2 Couche double électrique

Le principe de base des supercondensateurs à couche double électrique repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide, propriétés découvertes par Helmholtz en 1853 [1]. Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace, appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. La couche double électrique est restée un pôle d'intérêt et d'activités de la société électrochimiste durant une centaine d'année, et constitue actuellement la principale direction suivie dans le développement des supercondensateurs. Plusieurs modèles ont été développés au cours des années pour expliquer et décrire le phénomène de couche double.

Hermann von Helmholtz, physiologiste et physicien allemand du 19^{ème} siècle, fut le premier à étudier la nature capacitive de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide, interface qu'il modélisa par deux répartitions superficielles de charges, l'une de nature électronique côté électrode, l'autre de nature ionique et de signe opposé côté électrolyte (figure I.5).

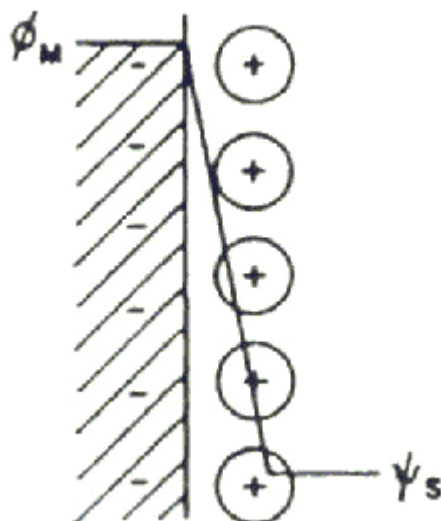


Figure I.5: Modèle de Helmholtz de la couche double électrique [1].

La capacité surfacique associée à cette représentation est d'une part linéaire, ce que dément l'expérience, et d'autre part supérieure de plus d'un ordre de grandeur à celles observées expérimentalement. Son problème majeur réside dans l'hypothèse de localisation des charges au voisinage immédiat de l'interface, laquelle hypothèse n'est pas vérifiée côté électrolyte, conséquence d'une faible conductivité électrique.

Gouy introduisit en 1910, dans l'interprétation du comportement capacitif de la couche double électrique, la statistique de Boltzmann, à savoir ici la probabilité de présence d'un ion en un point de l'espace, compte tenu de l'agitation thermique. Il envisagea ainsi une distribution volumique de charges dans l'électrolyte, distribution connue aujourd'hui sous le nom de couche diffusée (figure I.6).

La formulation mathématique de la couche diffusée de Gouy fut établie par Chapman en 1913, formulation basée sur le traitement conjoint de l'équation de Poisson et de la fonction de distribution de Boltzmann. La modélisation ainsi obtenue surestime la capacité associée à la couche double électrique, sauf pour les faibles valeurs de potentiel, dans le cas d'électrolytes dilués. A cela plusieurs raisons, dont la principale est liée à des ions traités comme des charges ponctuelles, sans dimension, et donc infiniment proche pour certains de l'interface.

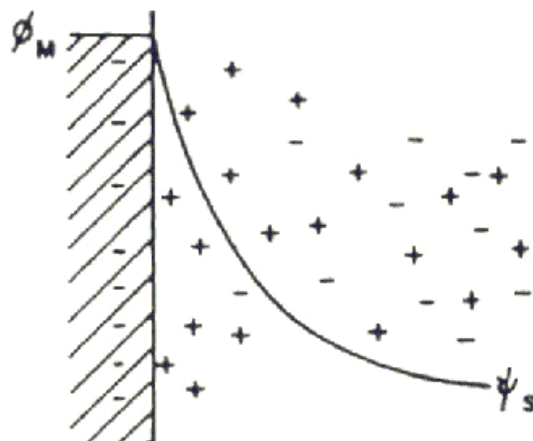


Figure I.6: Modèle de Stern de la couche double électrique [1].

La capacité surfacique C_{dl} de la couche double électrique est alors constituée d'une capacité C_H associée à la couche compacte, de même nature que celle préconisée par Helmholtz, en série avec la capacité C_{diff} de la couche diffusée :

$$\frac{1}{C_{dl}} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{diff}} \quad \dots (1.4)$$

I.2.3 Technologie des supercondensateurs

I.2.3.1 Matériaux d'électrodes

Les matériaux d'électrode sont principalement divisés en trois catégories : les charbons actifs, les oxydes métalliques, et les polymères conducteurs électroniques. Historiquement, les charbons actifs furent les premiers employés industriellement [10], et restent aujourd'hui la technologie d'électrode la plus répandue. Comme déjà dit auparavant, les dispositifs associés fonctionnent sur le principe électrostatique de la couche double électrique, et présentent à ce titre une puissance spécifique élevée, de plusieurs kW.kg⁻¹, et une durée de vie, théoriquement infinie, de plus de 100000 cycles en pratique. Les carbones utilisés peuvent se présenter sous différentes formes, suivant les constructeurs : carbone pulvérulent, fibre de carbone, nanotubes. Les surfaces spécifiques sont supérieures à 1000 m².g⁻¹, et peuvent atteindre 3000 m².g⁻¹. A noter que seule une fraction relativement faible de cette surface est utile (ions parfois

trop grands pour accéder à la microporosité, porosité plus ou moins fermée par la présence de liants ou d'impuretés). Les capacités spécifiques observées restent tout de même élevées, de l'ordre de 120 F.g⁻¹ à 180 F.g en milieu aqueux (acide sulfurique), et de 60 F.g⁻¹ à 100 F.g⁻¹ en milieu organique.

I.2.3.2 Electrolyte [2]

Le choix de l'électrolyte est aussi important que celui du matériau d'électrode. De fait, l'électrolyte conditionne la tenue en tension du dispositif, et donc son énergie spécifique et sa puissance spécifique, toutes deux variant comme le carré de la tension nominale. En outre, la puissance spécifique du dispositif est également fonction de sa résistance interne, laquelle dépend en partie de la conductivité de l'électrolyte, c'est-à-dire :

- de la concentration en porteurs de charge libres,
- de la mobilité de ces porteurs,
- de la solvation des ions,
- de la valence des ions.

Enfin, la capacité spécifique du dispositif, et ce faisant son énergie spécifique, dépend en autres choses de la taille effective des ions en solution. On trouve deux types d'électrolyte pour supercondensateurs : les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse, et les électrolytes organiques, tel que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile.

I.2.3.3 Séparateur

La construction des supercondensateurs fait également intervenir une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte [8]. On utilise généralement un polymère ou du papier en milieu organique, une céramique ou de la fibre de verre en milieu aqueux. Le séparateur introduit un terme supplémentaire dans la résistance totale du composant, terme dépendant de la porosité et de l'épaisseur de la membrane.

I.2.4 Principaux constructeurs

Un certain nombre d'entreprises ont investi dans la production industrielle de supercondensateurs. Citons en premier lieu les deux précurseurs japonais NEC (figure I.7 [4]) et Panasonic (figure I.8 [11]), dont l'activité "supercondensateurs" a plus de trente années. Citons également Epcos, Elna, Avx, Cooper, Evans et Maxwell, qui proposent pour certaines des modules supercapacitifs équipés d'un circuit d'équilibrage en tension. Kold Ban International Company a commercialisé, pour le démarrage des moteurs à combustion interne par temps froid, un module de 1000 F sous 13 V nominaux, avec une puissance maximale de 17 kW. L'australien Cap-XX offre une gamme de composants, de même que le coréen Ness Capacitor. Au Canada, Tavrma propose une gamme de modules. ESMA, en Russie, vend une large variété de modules supercapacitifs pour applications véhicules électriques, démarrage de moteurs à combustion interne, hybridation de puissance.



Figure I.7: Module supercapacitif NEC 5 F - 24 V [4].



Figure I.8: Panasonic Gold Capacitor 0,02 - 70 F, 5,5 V [11].

I.2.6 Utilisation des supercondensateurs

Dans les applications qui se précisent actuellement, les supercondensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles et accumulateurs électrochimiques pour assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante énergie délivrée en un temps bref. Les principaux secteurs concernés par les supercondensateurs sont :

- L'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique.
- Les alimentations de secours et l'automobile concernant les composants à haute énergie et haute puissance spécifiques.

Bien d'autres applications sont envisageables, et ce dans de nombreux secteurs d'activités : médical (défibrillateur), industriel (robotique), militaire (canon électromagnétique).

I.2.6.1 Informatique et télécommunication

Le secteur des télécommunications s'intéresse à ces composants en mémoire de sauvegarde pour remplacer les batteries, les supercondensateurs présentent également un intérêt en complément des batteries dans la radiotéléphonie où l'on doit disposer d'énergie durant des temps très courts (1 ms) excluant l'utilisation de batteries à forte impédance [12]. De même, ils pourraient être exploités comme sauvegarde de mémoire en informatique [13]. Leurs principaux avantages en comparaison avec les générateurs électrochimiques sont leur robustesse, leur grande fiabilité, leur importante puissance spécifique et une durée de vie équivalente à celle des composants passifs auxquels on les associe [14, 15].

I.2.6.2 Alimentations de secours

En raison de l'augmentation de la densité d'énergie, les supercondensateurs pourraient pour des moyennes et faibles puissances (inférieure à 10 kW) remplacer les accumulateurs au plomb dans les alimentations de secours, schématiquement constituées d'un chargeur, d'un élément de stockage d'énergie (l'élément typique est l'accumulateur au plomb), d'un onduleur et d'un dispositif actionnant le passage automatique sur l'alimentation de secours en cas de défaillance du réseau. [16]

I.2.6.3 Secteur automobile

Le secteur automobile, et le véhicule électrique en particulier, constitue un terrain fertile pour l'utilisation des supercondensateurs. Siemens-Matsushita et Saft estiment que ce secteur sera le premier marché véritablement de volume pour les supercondensateurs. [17]

Pour l'heure, le supercondensateur pour voiture électrique peut trouver plusieurs utilisations possibles :

- L'assistance au démarrage

Le principal obstacle à la pleine utilisation du supercondensateur pour voiture électrique reste à ce jour les modalités de restitution de l'énergie. Cet organe a la capacité d'accumuler une importante quantité d'énergie, mais la délivre trop rapidement. Si la batterie a une capacité moins grande, elle a par contre l'avantage de ne pas délivrer l'énergie trop vite. L'assistance au démarrage constitue pour l'heure donc une excellente application qui permet de préserver la batterie du véhicule et de gagner en autonomie. [18]

- La récupération d'énergie

Le supercondensateur pour voiture électrique peut également servir à la récupération d'énergie, et ce, à deux niveaux. Tout d'abord, au moment du freinage, l'énergie thermique est collectée par un récepteur. Puis, elle est transformée en énergie électrique avant d'être stockée. De la même façon, l'énergie thermique des gaz d'échappement est récupérée et transformée en énergie électrique. Le supercondensateur qui la stocke va ensuite la restituer au moment souhaité. [18]

La figure I.9 montre une des configurations permettant l'intégration de supercondensateurs dans un véhicule électrique [19, 20, 21].

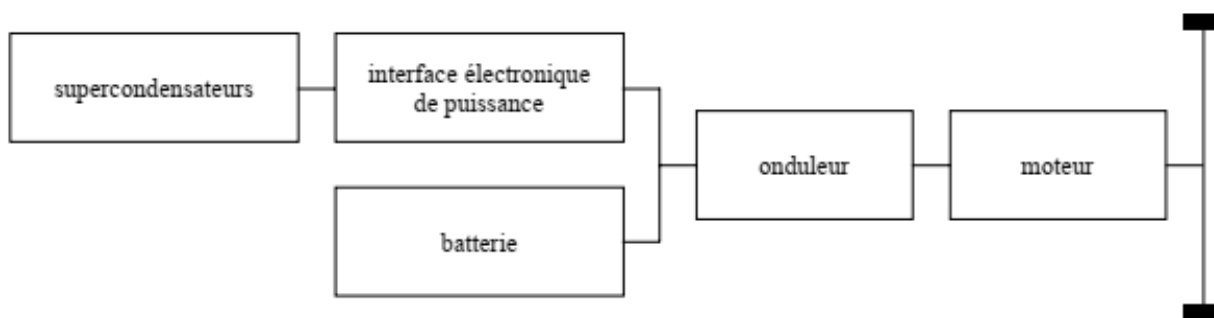


Figure I.9 : Topologie d'une motorisation de véhicule électrique alimentée par source hybride à supercondensateurs

I.3 Etat de l'art du véhicule électrique

I.3.1 Définition

La voiture électrique présente la particularité d'être partiellement ou totalement silencieuses par un ou plusieurs moteurs électriques qui transmettent la force motrice aux roues selon la solution de transmission retenue. Plus écologiques que les automobiles à essence, ces voitures existent depuis la fin du 19e siècle, mais sont commercialisées seulement depuis la fin du 20e.

I.3.2 Historique

A la fin du 19ème siècle, au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique). D'ailleurs, les performances des premiers prototypes de véhicule électrique n'avaient rien à envier à celles des véhicules à propulsion thermique de l'époque [22]. Ci-dessous on compte les véhicules électriques qui ont marqué l'histoire.

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.

Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique.

Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h.

En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881.

En 1884, Thomas Parker assis dans la première voiture électrique au monde.



Figure I.10: Une des premières voitures électrique (Thomas Parker 1884). [23]

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. 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.

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

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.

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.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride. [22]

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.

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

En 2008 Tesla à démarrer la production en série du premier véhicule, le Roadster Tesla (Figure I.11). [24]



Figure I.11 : Le Tesla Roadster I

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.

En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) la voiture électrique à cinq places annoncées 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.

I.3.3 Principe de fonctionnement

Le principe de la voiture électrique est finalement plus simple. Au lieu d'un moteur thermique (à essence ou diesel), elle est équipée d'un moteur électrique alimenté par une batterie intégrée au véhicule.

- Pas d'embrayage : il suffit d'appuyer sur la pédale d'accélérateur pour que la batterie libère du courant continu. Un convertisseur se charge alors de transformer ce courant continu en courant alternatif et de générer un champ électromagnétique qui traverse la bobine de cuivre mobile du moteur.
- Dans le moteur, un (ou plusieurs) aimant fixe oppose son propre champ magnétique au champ électromagnétique créé par la bobine. C'est cette opposition qui met l'aimant en rotation et permet au moteur de rouler.
- Pas de boîte de vitesse : l'axe du moteur tourne directement sur celui des roues motrices de la voiture sans recourir à des pistons.

Pour orchestrer parfaitement cette partition, un ordinateur embarqué permet de gérer, de contrôler et de réguler la puissance à développer. Le moteur peut ainsi développer sa pleine puissance à partir d'un rapport tour/minute bien inférieur à celui nécessaire aux véhicules thermiques.

I.3.4 Eléments constituant un véhicule électrique

Les composants présents dans les voitures électriques ne sont jamais les mêmes selon le constructeur du modèle et la technologie utilisée. Cependant certains sont indispensables pour pouvoir qualifier un véhicule automobile comme électrique.

Le véhicule électrique comporte une batterie haute tension dont le volume et la masse sont

importants (environ 300 kg). La batterie fournit l'énergie provenant soit de la charge par câble depuis une source extérieure, soit de la décélération du véhicule. La capacité des batteries est de l'ordre de 5 à 40 kWh, leur tension totale de 300 à 500 V.

La voiture est aussi équipée de plusieurs convertisseurs, des chargeurs de batterie et quelques accessoires ainsi d'un ou plusieurs moteurs électriques.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux éléments importants utilisés dans un véhicule électrique comme les sources d'énergie électrique et les systèmes de propulsion électrique. [25].

I.3.4.1 Les sources d'énergie

I.3.4.1.1 Les batteries

Les batteries constituent l'élément-clé limitatif du développement des véhicules électriques. 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.

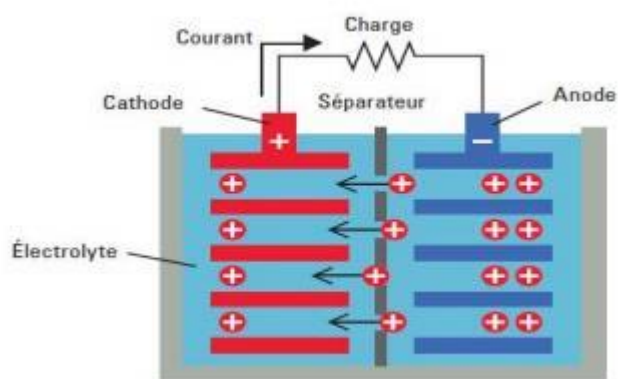


Figure I.12 Schéma fonctionnel de la batterie. [26]

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.) [27]

Le tableau I.1 présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques.

Tableau I.1 : Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles. [28]

Batterie	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion	Li-po
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200	100-130
Nombre de cycles (Chargedécharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200	400 à 600
Temps de charge	6 à 12h	1h à 2h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
Températurede Fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C

I.3.4.1.2 Les Supercondensateurs

Les supercondensateurs stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie. [29]

I.3.4.1.3 Batterie VS Supercondensateur

Les batteries et les supercondensateurs diffèrent considérablement dans leurs propriétés électriques. Le diagramme de Ragone est alors utilisé pour comparer leurs performances respectives. Il s'agit d'un graphique à axes logarithmiques. Nous portons en abscisse l'énergie massique et en ordonnée la puissance massique, deux grandeurs prépondérantes en matière de stockage embarqué. La Figure I.13 montre que les batteries ont une forte densité énergétique mais une faible densité de puissance. Quant aux supercondensateurs, disposent d'une puissance spécifique importante mais ils ont une capacité spécifique faible.

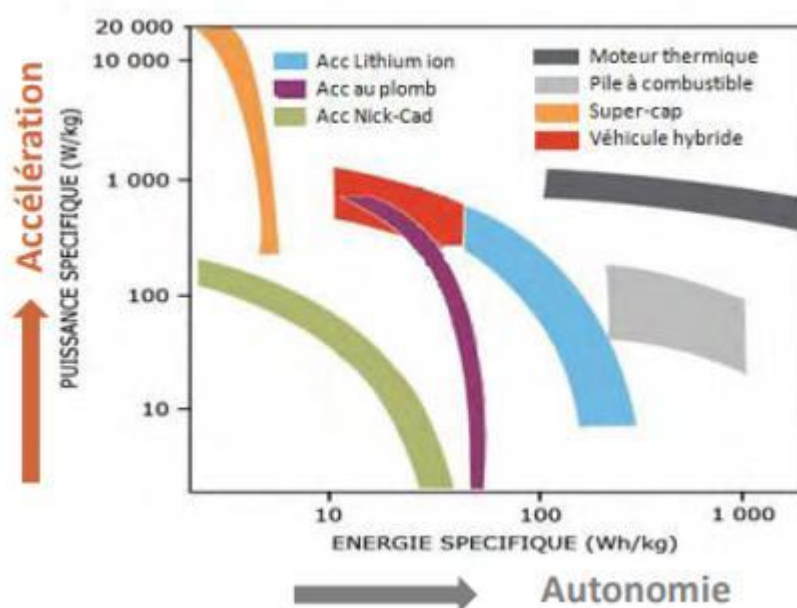


Figure I.13 : Diagramme de Ragone pour comparer les performances énergétiques de différents systèmes. [30]

En outre, la durée de stockage est l'une des différences évidentes entre eux. La durée de vie de la batterie est déterminée par le nombre de cycles de charge et de décharge, ce qui signifie qu'elle est relativement limitée, tandis que la durée de vie d'un supercondensateur est longue en raison de l'absence de réaction chimique à l'intérieur, car il peut être chargé et déchargé des milliers de fois. Le résumé des performances de deux éléments de stockage est donné dans le Tableau.

Tableau I.2 : Résume les performances du supercondensateur et de la batterie. [30]

	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge t	1s<t<30s	1 heure<t
Temps de décharge t	1s<t<30s	0.3 heure<3 heures
Rendement charge/décharge	entre 85% et 98%	entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/kg)	10 ⁴	<10 ³
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 1 et 10	entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10 ⁶	10 ³

I.3.4.2 Le systèmes de propulsion électrique

Le système de propulsion électrique est le cœur des véhicules électriques. Ils se composent des moteurs électriques, de convertisseurs de puissance et de leurs contrôles/commandes. Le moteur électrique est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source d'énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule ou inversement pour permettre la récupération d'énergie pendant le freinage. Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale devient le récepteur. Le convertisseur de puissance est alors utilisé pour alimenter le moteur électrique dans les limites admissibles de tension et de courant. [27]

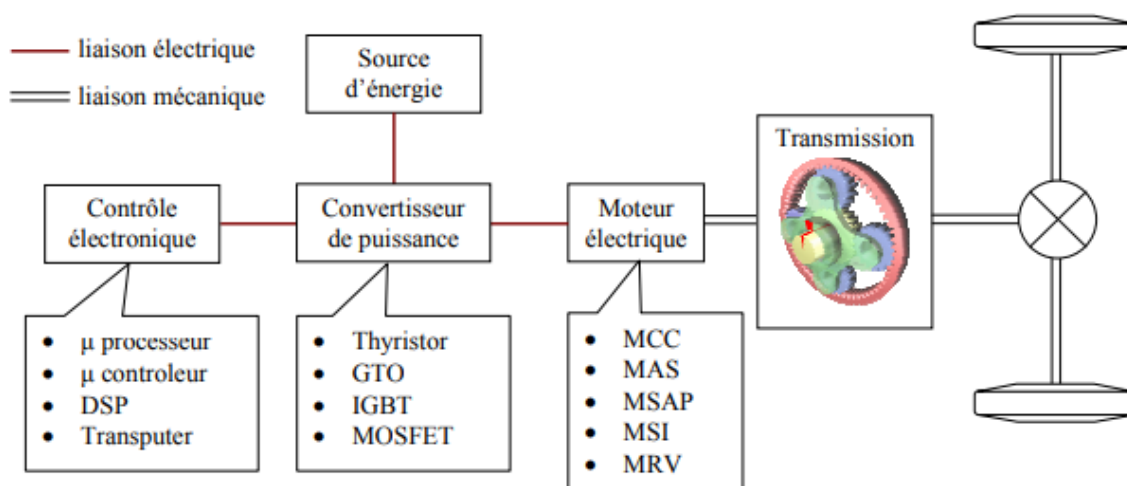


Figure I.14 Schéma du fonctionnement pour un système de propulsion électrique. [27]

I.3.4.2.1 Moteur électrique :

C'est un composant très simple au cœur de la voiture électrique, il joue sur les forces d'interactions (vecteurs forces) entre un électroaimant et un aimant permanent. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source, en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule durant les phases de traction, ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie (régénération).

I.3.4.2.2 Convertisseur de puissance

Le convertisseur de puissance est utilisé pour alimenter le ou les moteurs électriques dans les limites admissibles de tension et de courant. Actuellement il existe une grande diversité de structures envisageables pour les véhicules électriques. Dans ces applications, la structure se décompose en deux parties avec des rôles différents, DC et AC. Il faut utiliser des convertisseurs DC/DC, des convertisseurs DC/AC ou des convertisseurs AC/DC.

Les deux types de convertisseurs sont couplés via un bus continu et la distribution de l'énergie électrique dans les véhicules électriques est réalisée par le bus DC.

Les principaux composants dans les convertisseurs de puissance sont les semi-conducteurs. [31]

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories :

- Diode, état fermé ou ouvert contrôlé par le circuit de puissance.
- Thyristor, fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.
- Transistor (Interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture) ouvert et fermé par un signal de commande.

I.3.4.2.3 Commande des convertisseurs de puissances :

Chaque système d'électronique de puissance a besoin de dispositifs de réglage appropriés. Ils permettent de régler une grandeur au niveau de la charge et de limiter des grandeurs internes afin d'éviter des surcharges sur la charge et le convertisseur statique. Ainsi, les circuits de

réglage sont complexes et nécessitent des signaux, fournis par les organes de mesure.

Il est nécessaire également de compter des dispositifs de commande pour commander le convertisseur. [32]

Le système de contrôle-commande fournit des signaux de commande et des références à poursuivre en couple ou en vitesse suivant les desiderata du conducteur et de la mission pour permettre la bonne gestion de tous les composants qui constituent le système de propulsion électrique.

I.3.4.2.4 Le chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant [22]. Deux grands types des chargeurs ont été définis pour cette fonction :

- Les chargeurs de type " lents " : Le chargeur de type lent est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses.
- Les chargeurs de type " rapides " : Les structures, dont la puissance transitée est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits rapides. La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) une recharge partielle (80 %) des batteries [33].

Tableau I.3 : Temps de charge des batteries [22].

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 kw	230 VAC	16 A	Lente
2 à 3 heures	Triphasée 10 kw	400 VAC	16 A	Lente
3 à 4 heures	Monophasée 7 kw	230 VAC	32 A	Lente
1 à 2 heures	Triphasée 22 kw	400 VAC	32 A	Rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 kw	400 VAC	63 A	Rapide
20 à 30 minutes	Continue 50 kw	400 à 500 VAC	100 à 125 A	Rapide

I.3.4.3 Les Auxiliaires

Il s'agit de tous les équipements électriques, pneumatiques et hydrauliques qui ne participent pas à la traction du véhicule. Comme la voiture thermique, la voiture électrique possède les mêmes auxiliaires. De très nombreuses fonctions sont apparues au cours des trente dernières années. Citons le verrouillage centralisé et la protection contre le vol, la direction assistée, les vitres électriques, la climatisation, les airbags qui deviennent incontournables vers 1995, citons aussi les essuie-glaces électriques, l'éclairage intérieur, les clignotants, le poste radio, les tableaux de bord avec lampes témoin.

Dans le tableau I.4, nous listons la consommation des auxiliaires répertoriés dans la majorité des véhicules électriques. [32]

Tableau I.4 : Puissances consommées par les auxiliaires des véhicules conventionnel.

Ordres de grandeur De puissances électriques	Puissance (W)
Phares et éclairage additionnel	250
Feux de brouillard avant	110
Feux de brouillard arrière	30
Radio, système audio	15-100
Vitre arrière dégivrante	150
Chauffage de siège	150
Essuie-glace avant	50
Chauffage	5000

Les auxiliaires ne consomment pas toujours de façon simultanée leurs puissances maximales. Par exemple la consommation du chauffage est modifiable en fonction de la température extérieure.

La figure I.15 présente les différents éléments qui le composent le véhicule électrique et son fonctionnement.

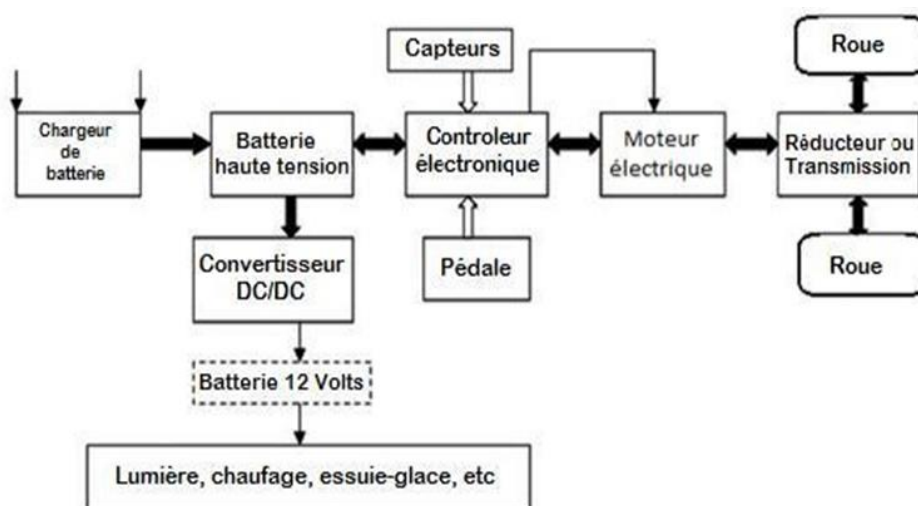


Figure I.15 : Schéma des composants et de fonctionnement d'un véhicule électrique.

La voiture électrique fonctionne à partir des trois éléments principaux dont elle est constituée : la batterie, le ou les moteurs électriques et le système de commande.

Le véhicule est alimenté par des batteries qui sont-elles mêmes rechargées par un chargeur à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos. Cette dernière est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un contrôleur et d'un convertisseur continu/continu (DC/DC). L'énergie des batteries est donc envoyée vers le contrôleur électronique et le convertisseur continu/continu (DC/DC). Le contrôleur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. [25]

Du convertisseur DC/DC, l'énergie est transformée et envoyée vers une batterie 12 volts si présente ou directement aux accessoires.

Du contrôleur, l'énergie est envoyée au moteur pour être convertie en mouvement qui passe dans un réducteur ou une transmission vers les roues.

En phase de décélération, l'électronique fait fonctionner le ou les moteurs électriques en générateurs, l'énergie délivrée par ces générateurs est utilisée pour recharger la batterie. Ainsi la consommation d'énergie est réduite.

I.3.5 Les différentes architectures de traction

Pour faire rouler un véhicule électrique, il existe deux types de moteurs : les moteurs à courant continu, et les moteurs à courant alternatif.

I.3.5.1 Véhicules électriques mono moteur (machine à courant continu)

C'est une architecture avec moteur à courant continu, une batterie, un variateur (un hacheur réversible), une machine à courant continu, un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple).

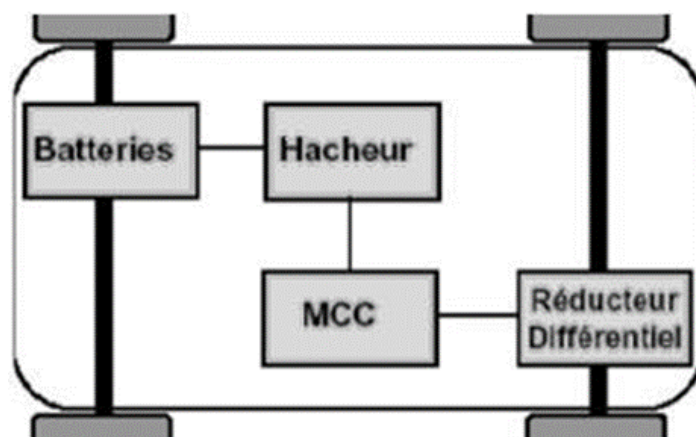


Figure I.16: Architecture d'un véhicule électrique mono moteur.

I.3.5.2 Véhicules électriques bi moteur (machine à courant alternatif)

Dans ce type, la chaîne énergétique est doublée, c'est une architecture avec moteur synchrone (dans la roue), une batterie, deux variateurs (onduleur), deux machines synchrones.

L'onduleur est utilisé pour convertir le courant électrique continu fourni par la batterie en courant alternatif nécessaire au moteur de la voiture électrique. [25]

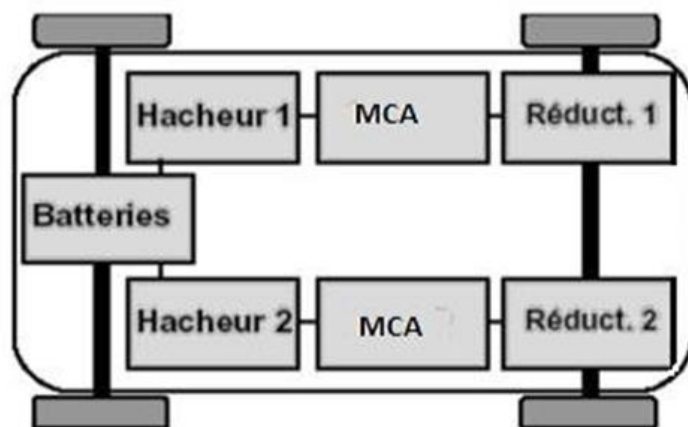


Figure I.17: Architecture d'un véhicule électrique bi moteur.

I.3.6 Les différents modes de charge pour véhicules électriques

I.3.6.1 Prise domestique

C'est une prise domestique toute simple. Le véhicule électrique est branché directement sur le réseau électrique de la maison. Il n'existe que très peu de véhicules dotés d'une 'simple' prise, la Renault Twizy en fait partie. Le temps de charge s'établit entre 8 et 11 heures, dépendant de l'état du réseau électrique de la maison. En tout état de cause, l'intensité de charge ne dépassera pas 8 A.

I.3.6.2 Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection

Constitué d'une prise domestique (1,8 kW) sur laquelle on trouve un boîtier intelligent. C'est à lui qu'incombent le bon déroulement et la sécurité de la charge. Depuis ce boîtier, il est possible de sélectionner l'intensité de charge désirée, sans que celle-ci ne dépasse les 8 A. Il existe néanmoins des prises en 3,2 kW/14 A, mais l'intensité restera bloquée à 8 A. En cas de problème, le boîtier peut stopper à tout moment le processus de recharge estimé entre 8 heures et 11 heures.

I.3.6.3 Prise spécifique sur un circuit dédié :

Branchement direct du véhicule électrique au réseau principal de distribution AC avec une fiche spécifique et un circuit dédié d'une puissance de 3,7 kW/16 A ou 22 kW/32 A (triphase). On peut avoir chez soi ce genre de matériel, appelé alors « Wallbox » et installé par un

électricien. Ce genre de borne particulière, préconisée par les constructeurs automobiles de voitures électriques ou d'hybrides rechargeables, doit posséder sa propre ligne électrique dédiée afin « d'apporter » le courant adéquat. Le temps de charge (normale ou rapide) oscille entre 1 heure et 8 heures.

I.3.6.4 Connexion courant continu :

Le véhicule est alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un chargeur externe lui-même raccordé à l'installation électrique fixe. Dans ce mode, le câble de recharge du véhicule est fixé à demeure à l'installation. Les connecteurs de raccordement sont spécifiques. Le mode de charge en courant continu est réservé à la charge rapide (de l'ordre de 30 min), à des niveaux de puissance et de tension élevés (50 kW sous 500 V).

I.3.7 Système de charge et niveaux de puissance

Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur d'une même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électrique de convertisseurs électroniques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement. De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

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

La figure I.18 représente le schéma qui montre les différents convertisseurs utilisés dans les véhicules électriques. [25]

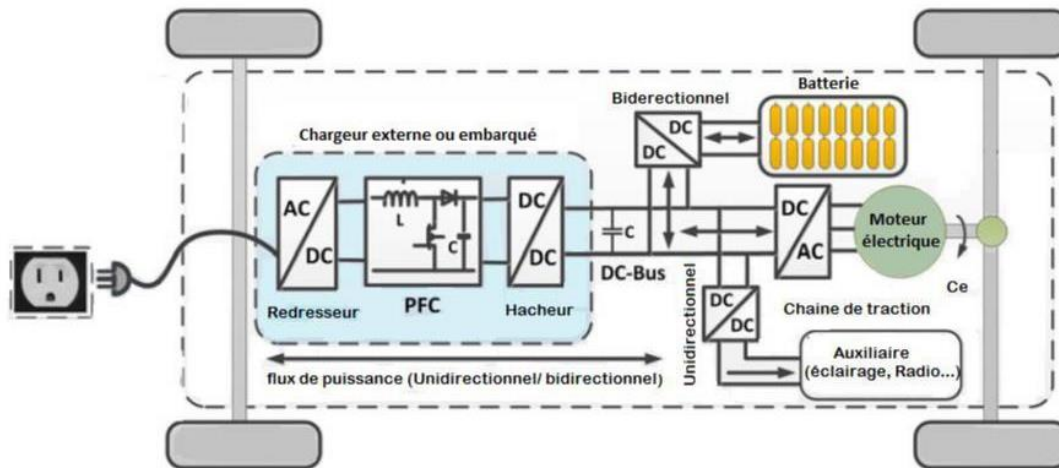


Figure I.18 : Système de charge et niveaux de puissance pour véhicule électrique.

I.3.8 La distance parcourue avant d'avoir recharger le véhicule électrique

La distance pouvant être parcourue est variable en fonction des conditions routières et des habitudes de conduite, mais la moyenne observée à ce jour va de 140 à 450 km d'autonomie théorique selon la marque de voiture. Les conducteurs de véhicules électriques finissent par adopter des habitudes de conduite par exemple, laisser la voiture perdre naturellement de la vitesse jusqu'à un arrêt, ce qui permet de réduire la consommation électrique et de parcourir des distances nettement plus grandes avant d'avoir besoin de recharger. [25]

I.3.9 Les principales configurations des véhicules électriques

Aujourd'hui l'une des solutions pour limiter la variation du courant de décharge et de charge dans les batteries consiste à utiliser des sources auxiliaires de puissance comme les supercondensateurs. Ensuite, l'étude d'un système d'assistance en puissance avec un système de stockage d'énergie embarqué est présentée. Son but principal est d'alléger les contraintes en puissance qui sont appliquées sur les batteries et donc de supprimer les inconvénients. De plus, la solution retenue permet de récupérer l'énergie de freinage et de limiter les variations du courant de charge/décharge dans les packs de batteries de manière optimale. [27]

Nous présenterons ci-dessous deux topologies pour un véhicule électrique (Figure I.19 et Figure I.20), topologie A et B.

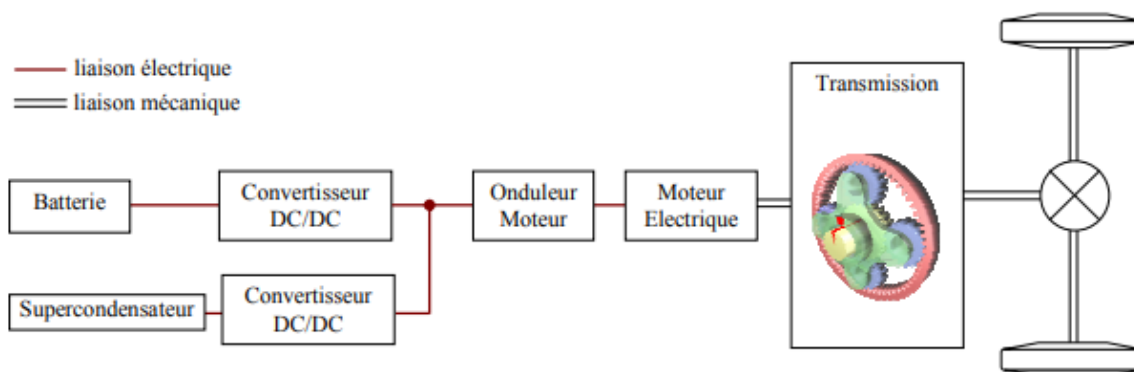


Figure I.19 : Architecture hybride proposée pour le véhicule électrique à supercondensateurs, Topologie A. [27]

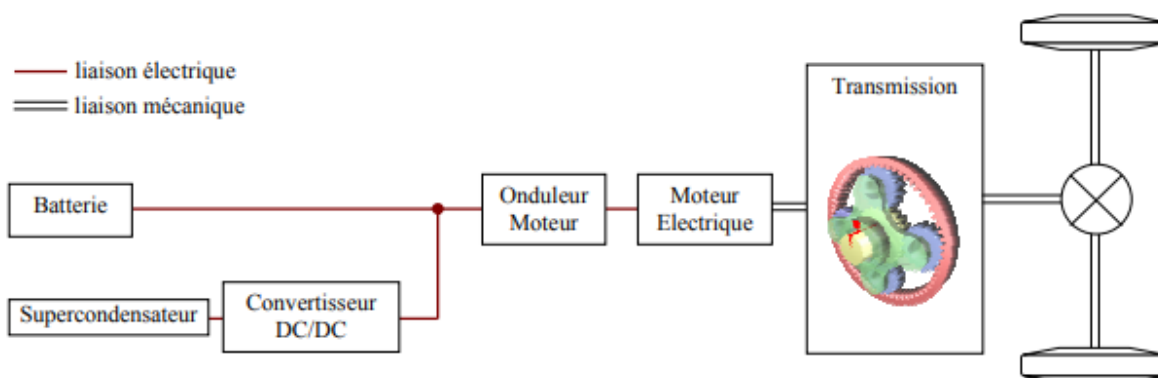


Figure I.20 : Architecture hybride proposée pour le véhicule électrique à supercondensateurs, Topologie B. [27]

La topologie A est la topologie qui nous donne le plus de degrés de libertés. Elle assure également une tension stable sur le bus DC. La topologie B avec un étage de conversion en moins a une tension du bus DC variable mais moins de pertes. La variation de la tension du bus DC est due à une variation de charge en fonction du cycle de roulage. [27]

Le fonctionnement de la voiture électrique est pratiquement la solution idéale pour de nombreux points :

- L'absence de pollution : les émanations sont inexistantes, tout comme la pollution sonore.
- Les performances : contrairement à ce que l'on peut croire, le moteur électrique est très performant, son rendement théorique avoisine 100 % (35 % pour les moteurs thermiques). Il possède un couple maximal sur toute la plage de régime moteur, favorisant les accélérations (en comparaison dans un moteur thermique, le couple est maximal seulement à un régime moteur donné, soit entre 1 500 et 2 000 t/mn).
- L'entretien : le moteur électrique est d'une conception simple, avec peu d'éléments mécaniques en mouvement, contrairement aux voitures thermiques, notamment les dernières générations et leur systèmes antipollution, complexes onéreux à l'entretien.

En plus d'être écologique, le véhicule électrique est économique, il ne consomme pas d'énergie pendant les phases de ralenti, et les batteries se rechargent pendant les phases de décélération. Et les dépenses d'entretien sont réduites (pas de vidange ni de filtre).

Le véhicule électrique est un véhicule très fiable, son moteur électrique est quasi-incroyable, et aussi un véhicule agréable à conduire puisque le moteur ne cale jamais.

Bien que le véhicule électrique présente de nombreux avantages, mais possède aussi des points critiques :

- Une voiture électrique n'est réellement écologique que si l'énergie électrique qu'elle consomme est produite à partir de centrales solaires, hydrauliques ou éoliennes et, dans le cas extrême, nucléaires.
- Le prix important des véhicules électriques, ainsi celui des batteries et leurs entretiens, représente un problème d'économie, La voiture revient donc assez chère, ce qui n'encourage pas beaucoup à en faire l'acquisition lorsque l'on se base sur ses performances.
- Le volume du coffre est plus petit que celui du véhicule thermique comparable, en raison du volume des batteries placées pour l'instant sous le plancher, une conception nouvelle

du véhicule électrique permettra de porter remède à cet inconvénient.

- Une des principales faiblesses des véhicules électriques réside dans la recharge qui représente un investissement en temps beaucoup plus important. Alors que la plupart des moteurs de voitures électriques mettent environ quatre heures pour atteindre une charge complète, certains prennent un temps fou de 15 à 20 heures, ce qui peut s'avérer une problématique majeure sur les longs trajets.

I.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous sommes focalisés tout d'abord sur les supercondensateurs. Nous avons explicité les systèmes de stockage embarqués dans les véhicules électriques, ses sources d'énergie ainsi que son principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients ont été aussi discutée.

Ensuite, nous avons décrit l'intérêt des supercondensateurs dans les systèmes embarqués. Les supercondensateurs représentent une source de puissance capable de fournir des pics de puissance au moment opportun. Etant donné la complémentarité entre batterie et supercondensateurs apporte des solutions réalistes à la problématique de limitation de performances des systèmes de stockage dans les véhicules électriques.

Le supercondensateur est la solution idéale pour le problème de recharge des véhicules électriques, il peut être rechargé en seulement quelques secondes, contre des heures pour un accumulateur.

Le chapitre suivant, a pour but la modélisation de la batterie et le supercondensateur ainsi que les convertisseurs DC/DC (Boost et Buck/Boost).

CHAPITRE II :

Etude et Modélisation

II.1 Introduction

L'utilisation des supercondensateurs et des batteries dans les véhicules électriques nécessite de modéliser tous les phénomènes au mieux. Il est donc important d'établir des modèles précis permettant d'évaluer leur comportement en fonctionnement dans différents environnements. Nous nous intéresserons aux modèles électriques les plus utilisés et à l'identification de leurs paramètres.

Ce chapitre, a pour but la modélisation de la batterie et le supercondensateur ainsi que les convertisseurs DC/DC (Boost et Buck/Boost).

II.2 Modélisation et identification des paramètres des supercondensateurs

Selon leur degré de complexité, plusieurs modèles comportementaux existent ; certains représentent le comportement du supercondensateur lors d'une charge et/ou décharge, d'autres prennent en compte les sollicitations du supercondensateur et en particulier la fréquence de charges/décharges. [34]

II.2.1 Modèle de base RC

Le modèle le plus simple est celui proposé en général par le constructeur, il s'agit d'un circuit RC en série. R représente la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet Joule dans le supercondensateur et C la capacité principale du supercondensateur. Dans ce modèle on ne tient compte ni de l'influence de la tension de charge sur la capacité du composant ni du phénomène de redistribution des charges internes dans le supercondensateur.

La résistance série est déterminée à partir de la variation de la tension au début de la charge ou de décharge suite à une application d'un courant de charge/décharge constant :

$$R_S = \frac{V_R}{I} \quad \dots \text{(II.1)}$$

Dans ce type de modèle, l'évolution de la tension de décharge de la cellule suite à un courant constant a une représentation linéaire. Ainsi, le comportement du supercondensateur est

assimilé à celui d'un condensateur classique (capacité constante en fonction de la tension). La capacité C est déterminée directement à partir de la caractéristique de réponse suite à une décharge à courant constant de la cellule (Figure II.1), elle vaut :

$$C = \frac{I}{\frac{\Delta V_c}{\Delta t_d}} \quad \dots \text{(II.2)}$$

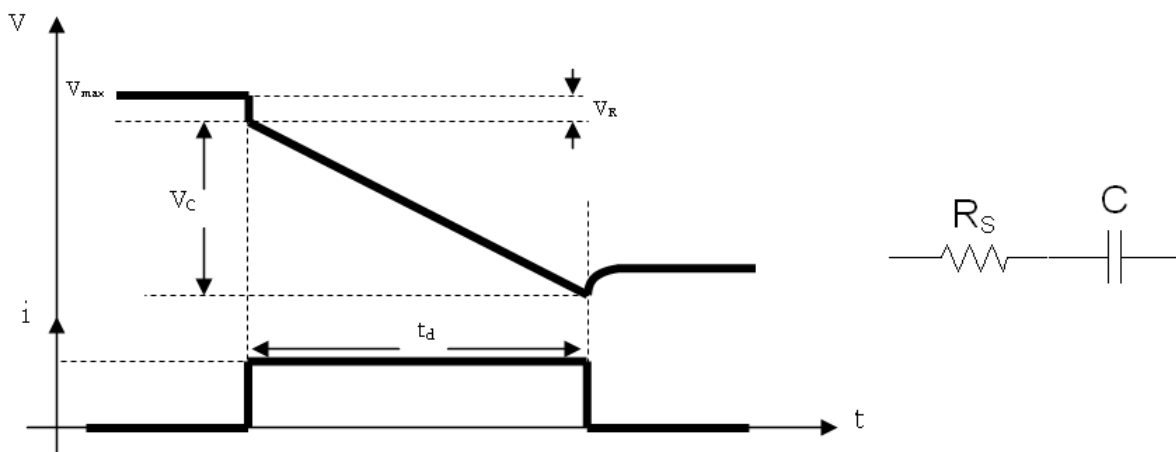


Figure II.1 : Modèle de base du supercondensateur – Profil de décharge à courant constant

Le modèle constructeur est le modèle de base le plus simple, ses paramètres sont facilement déterminés mais ne tient compte ni de la variation de la capacité en fonction de la tension ni des autres paramètres comme la fréquence et la température.

II.2.2 Modèle à deux branches de Zubieta

Dans la référence [35], les auteurs proposent à partir du profil de charge à courant constant d'une cellule de supercondensateur un modèle appelé modèle à deux branches. Il s'agit de représenter le comportement du supercondensateur à l'aide de deux circuits RC. Le premier circuit RC représente une énergie rapidement stockée et la deuxième cellule RC correspond à une énergie lentement stockée et représente en principe le phénomène de redistribution des charges à la fin de chaque charge ou décharge du supercondensateur (Figure II.2).

Durant les opérations de charge/décharge, la branche lente est considérée inactive du fait de la constante de temps $R_1 C_1$ qui est beaucoup plus grande que $R_1 C_1$.

On obtient donc un modèle à deux cellules RC qui décrit l'évolution de l'énergie électrostatique stockée dans le supercondensateur :

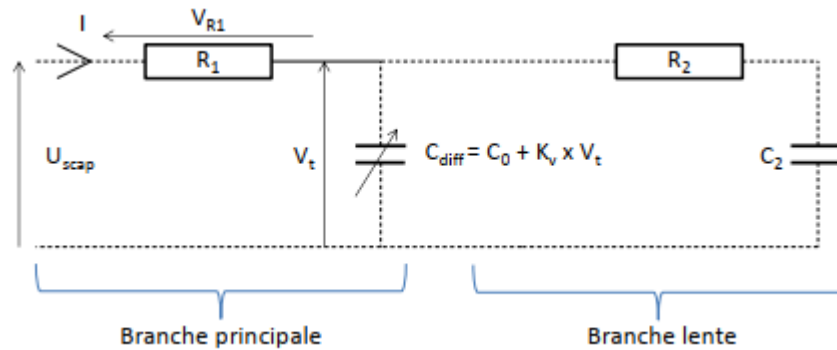


Figure II.2 : Modèle électrique des supercondensateurs

Il est à noter que la capacité principale qui correspond à la première cellule RC est variable en fonction de la tension de polarisation du fait de la non linéarité de la courbe de l'évolution de la tension de charge aux bornes de la cellule suite à l'application d'un courant de charge constant (Figure II.3). [36]

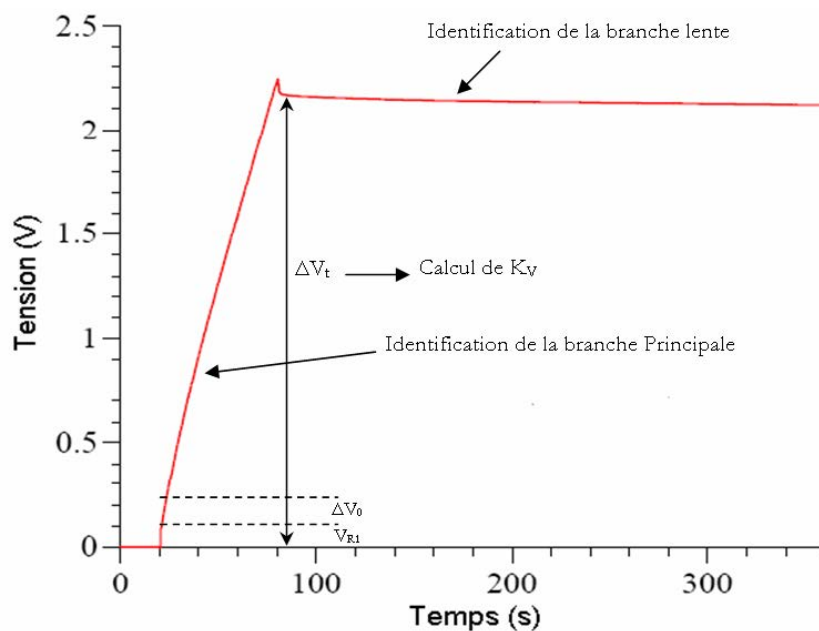


Figure II.3 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A"

La Figure II.4 représente l'évolution de la capacité différentielle donnée par l'Équation 3 en fonction de la tension de charge de la cellule de supercondensateur mesurée par spectrométrie d'impédance à une fréquence de 10 mHz. Cette variation est quasi linéaire dans le domaine d'utilisation du supercondensateur (entre 1,25V et 2,5V), puisque 75% de l'énergie emmagasinée par un supercondensateur l'ait entre 1.25V et 2.5V de sa tension de charge.

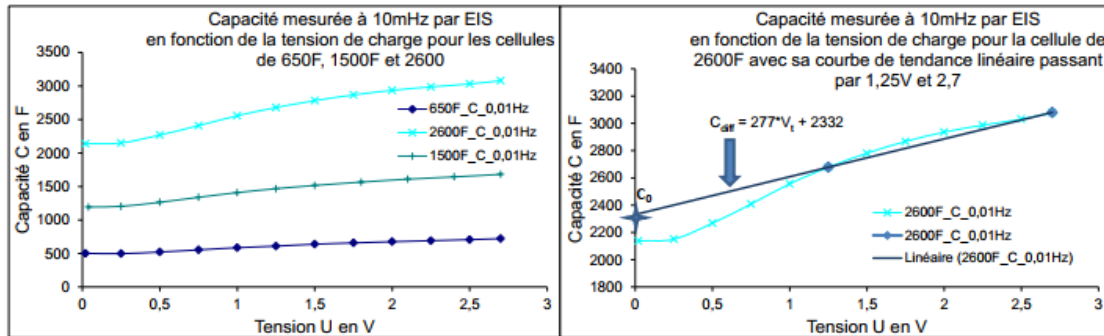


Figure II.4 : Capacité en fonction de la tension de charge pour les cellules de 650F, 1500F et 2600F

Nous rappelons que la spectrométrie d'impédance permet de déterminer la capacité différentielle du supercondensateur qui s'écrit sous la forme suivante :

$$C_{diff} = C_0 + K_v \times V_t \quad \dots (II.3)$$

Le courant de charge circulant dans la capacité différentielle du supercondensateur en fonction de la dérivée temporelle de la tension est donné par :

$$I = C_{diff}(V_t) \times \frac{dV_t}{dt} \quad \dots (II.4)$$

La relation entre la quantité de charge totale aux bornes du supercondensateur et le courant est donnée par :

$$Q_{tot} = \int I. dt = \int C_{diff}(V_t) \times dV_t \quad \dots (II.5)$$

En combinant l'Équation 3 et l'Équation 5, on obtient :

$$Q_{tot} = \int (C_0 + kv \cdot V_t) \cdot dV_t = \left(C_0 + \frac{kv}{2} \cdot V_t \right) \cdot V_t \quad \dots \text{(II.6)}$$

La capacité totale de charge de la cellule calculée pour une référence de tension nulle vaut donc :

$$C_{tot} = C_0 + \frac{Kv}{2} V_t \quad \dots \text{(II.7)}$$

II.2.2.1 Détermination des paramètres du modèle

II.2.2.1.1 Paramètres de la branche principale

A partir de la courbe obtenue nous avons identifié les différents éléments formant le modèle. La résistance R1 est la cause de la chute de tension de charge à l'instant initial :

$$V_{R1} = R_1 \cdot I \quad \dots \text{(II.8)}$$

$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I} \quad \dots \text{(II.9)}$$

C_0 est déterminée directement à partir de la caractéristique en charge à courant constant de la cellule, elle traduit la pente initiale de la courbe :

$$C_0 = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}(0)} \quad \dots \text{(II.10)}$$

On calcule alors la valeur de C_0 à partir de la courbe de charge à courant constant d'un supercondensateur. En pratique, on fait l'approximation que la pente initiale de $V(t)$ par une pente $\frac{\Delta V_0}{\Delta t_0}$, choisie au voisinage immédiat de l'instant initial (Figure II.3).

La charge totale d'un supercondensateur vaut :

$$\Delta Q_{tot} = C_0 \cdot \Delta V_t + \frac{Kv}{2} \cdot (\Delta V_t)^2 \quad \dots \text{(II.11)}$$

$$C_0 \cdot \Delta V_t + \frac{Kv}{2} \cdot (\Delta V_t)^2 = I \cdot \Delta t \quad \dots \text{(II.12)}$$

Donc :

$$Kv = 2. \frac{(I.\Delta t - C_0.\Delta V_t)}{(\Delta V_t)^2} \quad \dots \text{(II.13)}$$

II.2.2.1.2 Paramètres de la branche lente

À la fin de la charge de la cellule, le phénomène de redistribution de charges internes débute. Ce phénomène apparaît sous forme d'une chute de tension exponentielle à constante de temps assez grande [37]. Ceci peut être assimilé à une charge lente par le supercondensateur d'une autre capacité C_2 à travers la résistance R_2 . (Figure II.2)

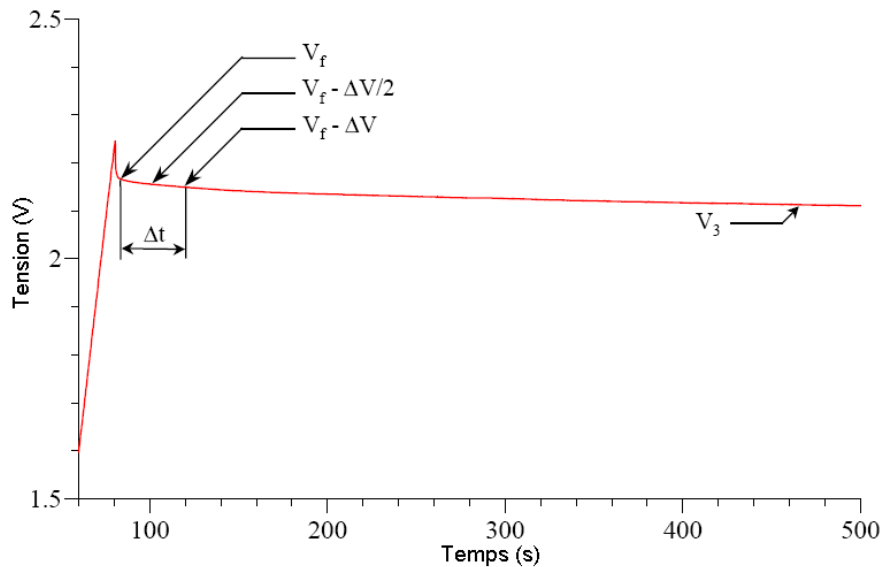


Figure II.5 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A"

Identification de R_2

L'identification de la branche lente débute à une nouvelle origine située après la chute de tension brusque en fin de charge du supercondensateur noté V_f .

Le courant initial de la branche lente $i(0)$ est donné par :

$$i(0) = \frac{V_f}{R_2} \quad \dots \text{(II.14)}$$

$$i(0) = -C_1 \frac{dV_t}{dt} (0) \quad \dots \text{(II.15)}$$

Pour le calcul de R_2 , on réalise l'approximation que la pente initiale observée sur $V_t(t)$ est égale à $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, et on évalue les termes $i(0)$ et C_1 pour le niveau médian de tension, à savoir (Figure 14) : $V_f - \frac{\Delta V}{2}$ de sorte que R_2 s'exprime par :

$$R_2 = \frac{V_f - \Delta V/2}{C_1(V_f - \Delta V/2)} \times \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad \dots \text{(II.16)}$$

Identification de C_2

La capacité C_2 peut être calculée en fin de redistribution, ou plus exactement après une durée généralement de plusieurs minutes, au-delà de laquelle la tension aux bornes du composant n'évolue que plus lentement. Les tensions V_1 et V_2 aux bornes des capacités C_1 et C_2 sont alors supposées à une même valeur V_3 et l'équation de conservation de la charge stockée permet d'établir l'expression de C_2 en fonction de Q_{tot} et V_3 . Ainsi on détermine C_2 pour un composant complètement déchargé par la relation suivante.

$$C_2 = \frac{Q_{tot}}{V_3} - (C_0 + \frac{1}{2} \cdot K \cdot v \cdot V_3) \quad \dots \text{(II.17)}$$

II.2.2.2 Limites du modèle à deux branches

Le modèle à deux branches, comme il a été réalisé sur la base d'un courant de charge constant ne peut représenter d'une façon fidèle le comportement du supercondensateur dès que les conditions de test s'écartent de celles utilisées pour l'identification des paramètres du modèle.

Les auteurs de la référence [38], ont montré les limites du modèle à deux branches sur des intervalles de charges et de décharges très courts et aussi pour des courants différents de celui de la modélisation. Il est montré que la capacité du supercondensateur est fortement dépendante d'autres paramètres et notamment des phases transitoires comme le phénomène de redistribution des charges internes.

II.2.3 Modèles tenant compte du comportement en fréquence en fonction de la nature des pores des électrodes

De Levie fut le premier à étudier la nature poreuse des électrodes du supercondensateur [39]. Il a modélisé théoriquement la capacité de l'électrode poreuse par une distribution de résistances et de capacités dont le comportement électrique correspond à celui d'une ligne de transmission.

Le modèle de la ligne de transmission permet de discrétiser la capacité totale du supercondensateur en le représentant par plusieurs circuits RC en séries. Cette représentation s'avère très logique comme représenté sur la Figure II.6. En effet, elle présente l'accès des ions à la capacité en profondeur des pores dépendant ainsi de la fréquence de fonctionnement. La résistance distribuée représente celle de l'électrolyte. Pour estimer l'effet capacitif de double couche, De Levie a supposé que les pores soient droits et cylindriques de diamètre uniforme et l'électrode est un conducteur parfait.

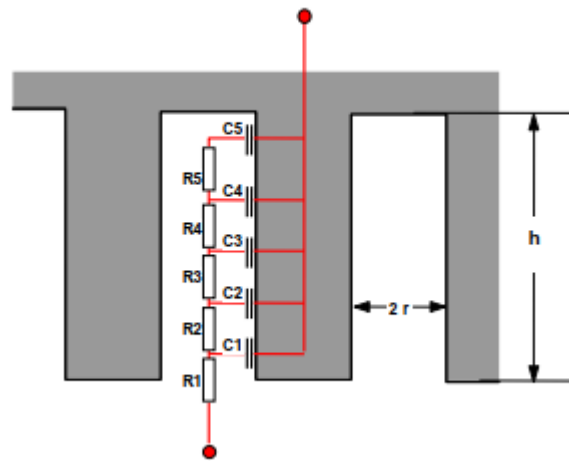


Figure II.6 : Représentation poreuse d'électrode comme ligne de transmission de cinq éléments. [40]

Le modèle équivalent utilisé pour rendre compte de cette dépendance est la ligne de transmission présentée dans la Figure II.6. Chaque pore de profondeur h et de rayon r est uniformément distribué le long d'une ligne de transmission de résistance linéique R et de capacité linéique C .

L'impédance de la ligne de transmission est donnée par la relation suivante :

$$Z(\omega) = R_w \frac{\coth \sqrt{j\omega R_w C}}{\sqrt{j\omega R_w C}} \quad \dots \text{(II.18)}$$

Avec

$$R_w = \frac{h}{3\pi r^2 n K} \quad \dots \text{(II.19)}$$

K est la conductivité de l'électrolyte, C la capacité à basse fréquence d'un pore, n le nombre de pores, h leur hauteur et r leur rayon. Ce modèle ne tient pas compte de la variation de la capacité en fonction de la tension.

II.2.3 Modèle à constantes réparties de Belhachemi

Sur la base du modèle à deux branches qui a pour inconvénient de ne pas tenir compte de la fréquence, les auteurs de la référence [41] [38] proposent un modèle qui représente le comportement du supercondensateur pour les différentes gammes de fréquences d'utilisation. En effet, la branche principale du modèle à deux branches a été remplacée par le modèle de la ligne de transmission et cela pour décrire la non-linéarité de la capacité de la double couche et la distribution spatiale de la capacité de stockage. Il propose également une méthode pour déterminer les paramètres du modèle de la ligne de transmission.

La Figure II.7 représente le modèle final composé d'une partie sous forme d'une ligne de transmission et une autre partie qui modélise la redistribution des charges.

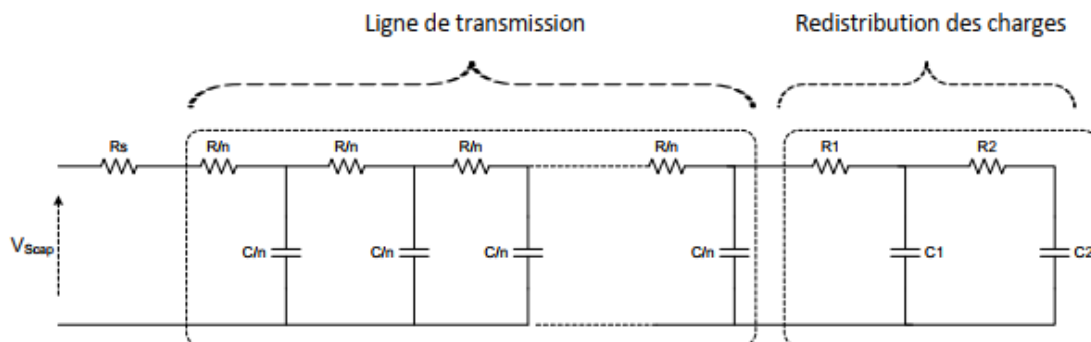


Figure II.7 : Circuit du modèle à ligne de transmission représentant le phénomène de redistribution des charges.

La résistance R et la capacité C de la ligne de transmission du modèle ont été identifiés par des essais de charges partielles à courant constant. Ces essais ont été effectués à différentes tensions initiales. La méthode est détaillée dans la référence [38]. En ce qui concerne la méthode de détermination des paramètres de la branche représentant la redistribution des charges, elle est similaire à celle utilisée dans le modèle à deux branches. Pour n branches de la ligne de transmission, la capacité de chaque branche vaut :

$$C_i = \frac{C}{n} \quad \dots \text{(II.20)}$$

Et la résistance de chaque branche s'écrit :

$$R_i = \frac{R}{n} \quad \dots \text{(II.21)}$$

- Avec R : Résistance totale de la ligne de transmission
- C : Capacité totale de la ligne de transmission

L'augmentation du nombre de branches de la ligne de transmission n , provoque une diminution de l'erreur entre l'impédance du modèle et celle réelle du supercondensateur. La représentation du modèle sous forme de filtres RC représente bien le comportement fréquentiel du supercondensateur même pour des fréquences élevées. Plus le nombre de branches RC augmente, plus précis est le modèle.

II.2.4 Modèle fréquentiel de Buller

Les auteurs de la référence [42] proposent un modèle qui se base sur les résultats de la réponse fréquentielle du supercondensateur suite à une application d'une tension sinusoïdale à fréquence variable (Figure II.8). Le courant obtenu permet d'établir une loi de variation de l'impédance du supercondensateur en fonction de la fréquence.

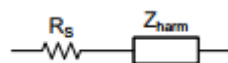


Figure II.8 : Circuit de base du modèle fréquentiel

L'expression mathématique de l'impédance Z_{harm} est donnée par l'expression suivante :

$$Z_{harm}(i\omega) = \tau \cdot \frac{\coth\sqrt{j\omega r}}{c \cdot \sqrt{j\omega r}} \quad \dots \text{(II.22)}$$

Avec : $\tau = R_W \cdot C$

La transformée de Laplace de cette impédance s'écrit :

$$Z_{harm}(p) = R_W \cdot \frac{\coth\sqrt{p \cdot R_W \cdot C}}{\sqrt{p \cdot R_W \cdot C}} \quad \dots \text{(II.23)}$$

L'impédance d'une électrode poreuse peut être écrite sous la forme de circuit de la Figure II.9

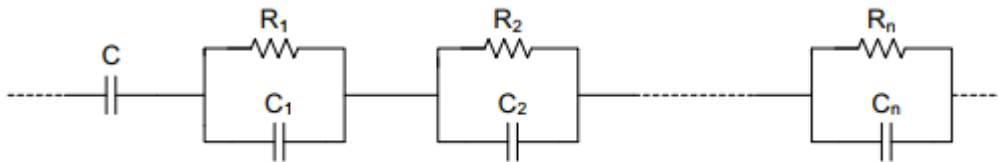


Figure II.9 : Approximation de l'impédance de l'électrode poreuse à l'aide du schéma équivalent (le nombre de paramètre se réduit à 2)

Telle que :

$$R_n = \frac{2 \cdot R_W}{n^2 \cdot \pi^2} \quad \text{et} \quad C_n = \frac{C}{2} \quad \text{avec : } 1 \leq n \leq +\infty$$

Plus le nombre « n » est important et plus précise est l'estimation de l'impédance de l'électrode poreuse. Comme pour le modèle à constantes réparties, le modèle de Buller représente fidèlement le comportement du supercondensateur dans tout le domaine fréquentiel. Le principal inconvénient de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte le phénomène de redistribution des charges internes. Ce phénomène est accentué pour les courants de charge élevés. Par comparaison de la réponse fréquentielle du modèle avec celle mesurée expérimentalement dans la référence [43], en basse fréquence l'écart est relativement important.

II.3 Modélisation de la batterie

Le modèle de la batterie adopté est celui permettant de prédire l'autonomie du système, c'est-à-dire permettre à chaque instant d'estimer l'énergie restante (état de charge SOC_{bat} profondeur de décharge DoD) dans la batterie [44]. Le modèle choisi est un modèle équivalent électrique (figure II.10) composé d'une source de tension en série avec une résistance (résistance interne). [45]

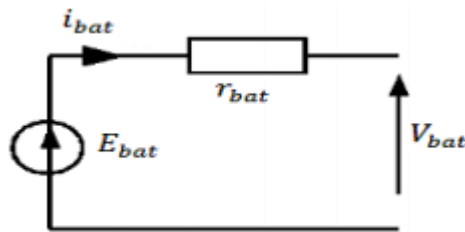


Figure II.10 : Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

II.3.1 Equation électrique de charge et décharge

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série [46]:

$$V_{bat} = E_{bat} - r_{bat} \cdot i_{bat} \quad \dots \text{(II.24)}$$

La tension à vide E_{bat} est approximativement proportionnelle à l'état de charge de la batterie [29]. En considérant la variable DoD comme paramètre variant entre 0 et 1, selon que la batterie est chargée ou déchargée pleinement, l'équation (II.24) présente un modèle valide l'équation électrique.

$$E_{bat} = n (2.15 - \text{DoD} (2.15-2.00)) \quad \dots \text{(II.25)}$$

$$\text{DoD} = 1 - \text{SOC}_{bat} \quad \dots \text{(II.26)}$$

II.3.2 Equation de l'état de charge

L'état de charge de la batterie est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC_{bat} est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation [47].

$$SOC_{bat} = \frac{C_{actuelle}}{C_{totale}} = SOC_{bat\ int} + \frac{100}{CN} \int i(t) dt \quad \dots (II.27)$$

II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC

Dans cette partie nous présentons la modélisation des deux types de convertisseurs DC/DC (Boost et Buck-Boost), utilisés pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie.

II.4.1 Convertisseur Boost (survoleur)

Convertisseur Boost présenté dans la (Figure II.11), comporte un condensateur et une bobine d'inductance avec le rôle de stockage d'énergie, et deux commutateurs complémentaires. En le cas du convertisseur élévateur de tension, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux de fréquence de commutation PWM. Tant que le transistor est ON, la diode est éteinte, en train de s'inverser biaisée. La tension d'entrée, appliqué directement à l'inductance L. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée à la fois par la source d'entrée et le filtre LC. La sortie qui en résulte est un marché réglementé tension de grandeur supérieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement du convertisseur sera analysé selon l'état des interrupteurs [48].

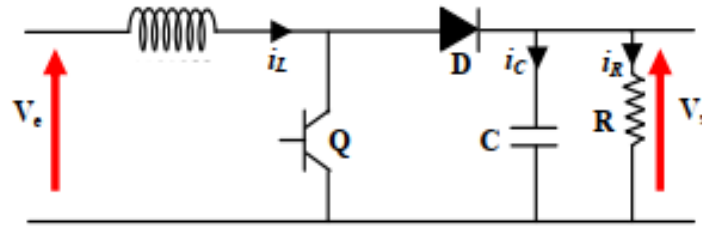


Figure II.11 : Schéma de convertisseur Boost

La première période ($0 \leq t \leq dT$) : Le transistor est à l'état ON et la diode OFF

Durant cette période, correspondant au cycle de PWM signal de conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette période l'inductance stocke l'énergie.

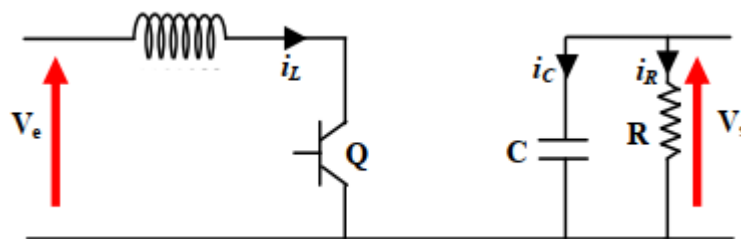


Figure II.12 : Schéma de convertisseur Boost état ON

Pour cette période d'exploitation, la VC tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfait les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_C}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q : \text{ON} \quad \dots \text{(II.28)}$$

La deuxième période ($dT \leq t \leq T$) : le transistor OFF et la diode ON

Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux bornes de l'inductance va changer la polarité et diode passera à l'état. Le schéma équivalent du convertisseur au cours de cette période est indiqué dans la figure ci-dessous :

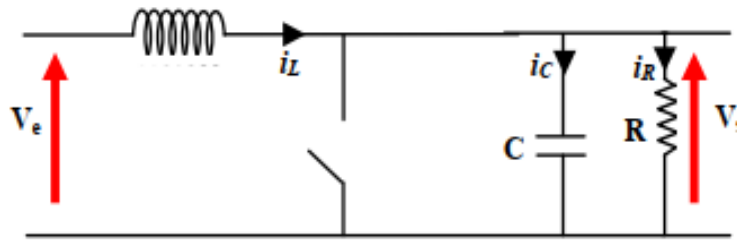


Figure II.13 : Schéma de convertisseur Boost état OFF

Pour cette période d'exploitation, le VC tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{V_c}{R}\right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q : \text{OFF} \quad \dots \text{(II.29)}$$

À partir de l'équation (II.28) et (II.29) on obtient le modèle moyenne de convertisseur à la condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_e - (1 - u)\frac{1}{L}V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}\left((1 - u)i_L - \frac{V_c}{R}\right) \end{cases} \quad \dots \text{(II.30)}$$

II.4.2 Convertisseur Buck-Boost (dévolteur-survolteur)

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux de fréquence de commutation PWM. Tant que le transistor est ON, la diode est éteinte, en train de s'inverser biaisée. La tension d'entrée, appliqué directement à l'inductance L , détermine un courant ascendant linéaire. Le condensateur est déchargé sur le circuit de charge. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée par le filtre LC. La sortie qui en résulte est une tension régulée de grandeur inférieure ou supérieure à l'entrée tension, en fonction de la valeur de cycle de service, mais il a une polarité inverse. Le convertisseur opération sera analysée en fonction de l'état ON ou OFF des interrupteurs [49].

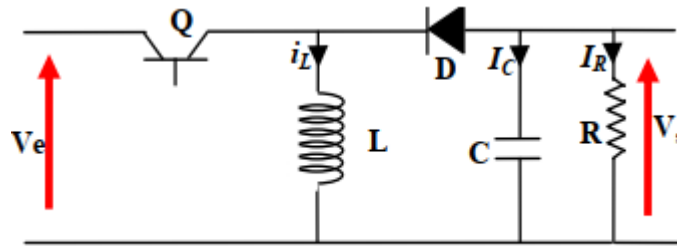


Figure II.14 : Schéma de convertisseur Buck- Boost

La première période ($0 \leq t \leq dT$) : Le transistor est à l'état ON et la diode OFF. Durant cette période, correspondant au cycle de PWM signal de conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette période l'inductance stocke l'énergie.

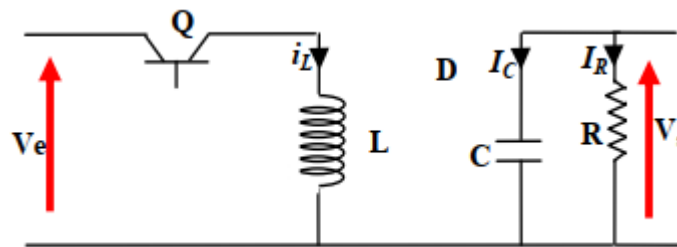


Figure II.15 : Schéma buck-Boost d'un Interrupteur ON

Pour cette période d'exploitation, la VC tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_C}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: ON \quad \dots \text{(II.31)}$$

La deuxième période ($dT \leq t < T$) : le transistor OFF et la diode ON

Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux bornes d'inducteur sera changée la polarité et la diode s'allume à l'état. Le schéma équivalent de convertisseur cours de cette période est indiquée dans la figure ci-dessous :

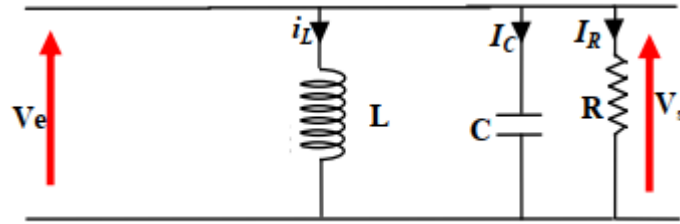


Figure II.16: Schéma Buck-Boost d'un Interrupteur OFF

Pour cette période d'exploitation, le VC tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: OFF \quad \dots(\text{II.32})$$

À partir de l'équation (II.31) et (II.32) on obtient le modèle moyenne de convertisseur à la condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - u) \frac{1}{L} V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left((1 - u) i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad \dots (\text{II.33})$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles comportementaux des supercondensateurs et des batteries. Ces modèles ne prennent pas en considération tous les phénomènes physiques liés au supercondensateur ou à la batterie à cause de leur caractère relativement complexe. Ensuite, nous avons présenté une modélisation sur les différents convertisseurs DC/DC (Boost et Buck-Boost).

La principale difficulté rencontrée sur ce sujet concerne les méthodes d'identification des paramètres de supercondensateur qui s'avèrent équivalent entre eux, tout en ayant des approches très différentes en termes de caractérisation. Pour cela, on a cherché et trouvé un lien direct entre les modèles à constante répartie de type « ligne de transmission ».

Quant à la modélisation, cette dernière nous permettra de prédire les performances du système en appliquant la simulation dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III :

Etude et Simulation

III.1 Introduction

Après avoir connu les lois et modèles de contrôle qui ont été développés pour les différents éléments du système du véhicule électrique dans le chapitre précédent, nous utiliserons ces lois et modèles de contrôle pour conduire les résultats de simulation obtenus au cours de ce chapitre.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de comparer l'efficacité de batterie et du supercondensateur en fonctionnement.

III.2 Modèle de batteries et du supercondensateur

III.2.1 Modèle de batterie

Le modèle de batterie utilisé est celui d'une batterie au lithium-ion disponible dans la bibliothèque « Simscape » sous Matlab/Simulink.

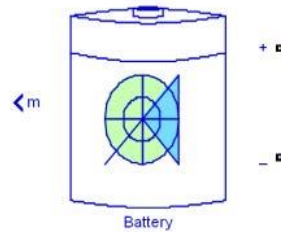
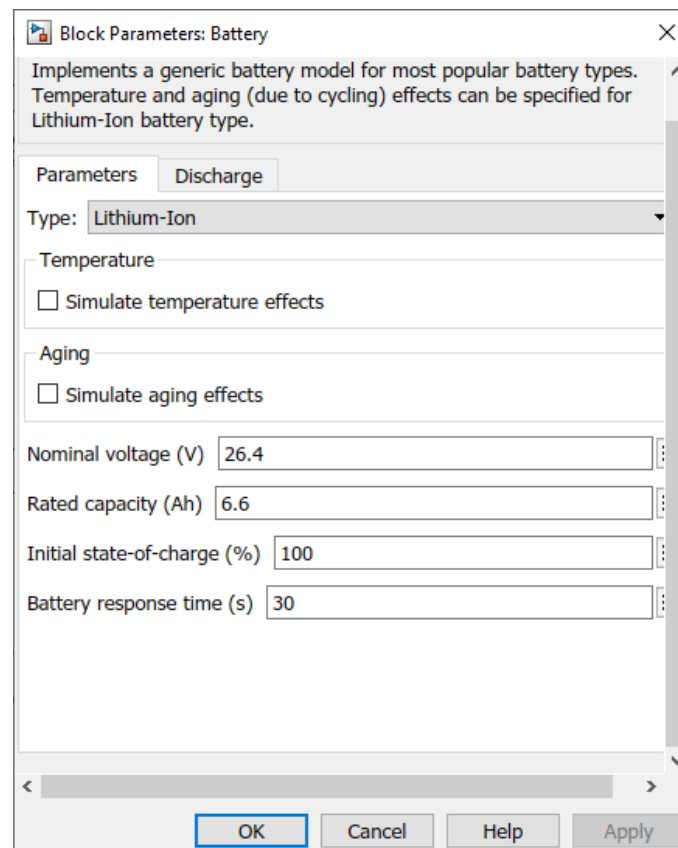


Figure III.1 : Modèle Simulink de la batterie

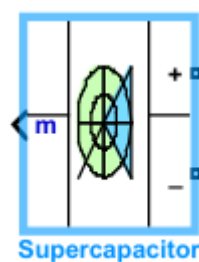
Le tableau suivant présente les paramètres déterminés pour la batterie.

Tableau III.1 : Paramètres de la batterie

III.2.2 Modèle du supercondensateur

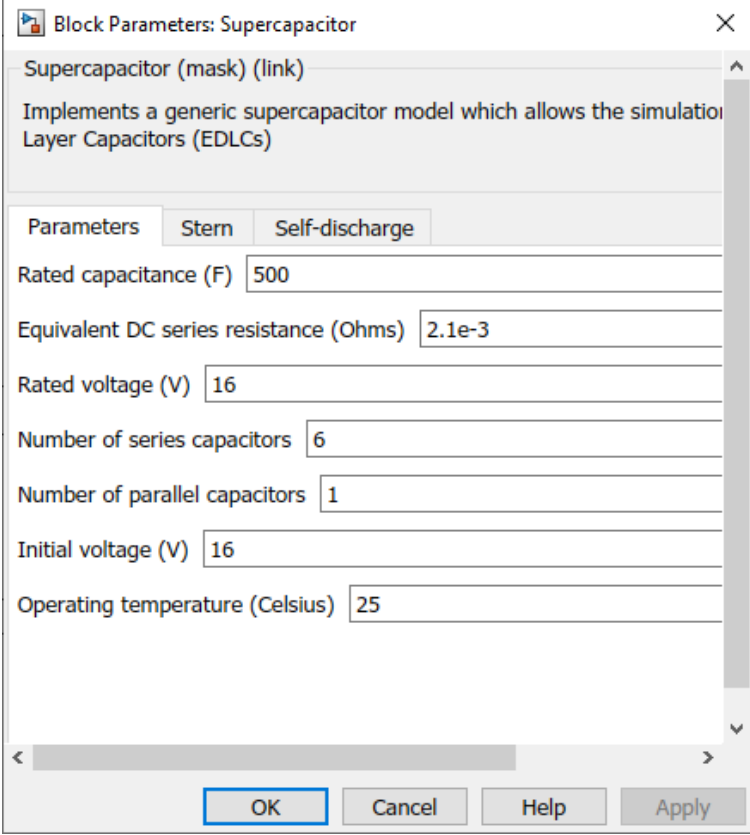
Le modèle de supercondensateur utilisé est un modèle à couche double électrique, explicité au chapitre 1.

Ce modèle est disponible dans la bibliothèque « Simscape » sous Matlab/Simulink.

**Figure III.3** : Modèle Simulink du supercondensateur

Le tableau suivant présente les paramètres déterminés pour le supercondensateur

Tableau III.2: Paramètres du supercondensateur



The screenshot shows a dialog box titled "Block Parameters: Supercapacitor". It contains the following parameters and values:

Parameter	Value
Rated capacitance (F)	500
Equivalent DC series resistance (Ohms)	2.1e-3
Rated voltage (V)	16
Number of series capacitors	6
Number of parallel capacitors	1
Initial voltage (V)	16
Operating temperature (Celsius)	25

The dialog also includes tabs for "Parameters", "Stern", and "Self-discharge", and buttons for "OK", "Cancel", "Help", and "Apply".

III.3 Résultats de Simulation

Cette section est une étude comparative entre la sortie de la batterie et la sortie du supercondensateur, avec leur puissance, tension, état de charge (SOC) et le courant de sortie. En utilisant la modélisation sur MATLAB Simulink comme indiqué sur la Figure III.4.

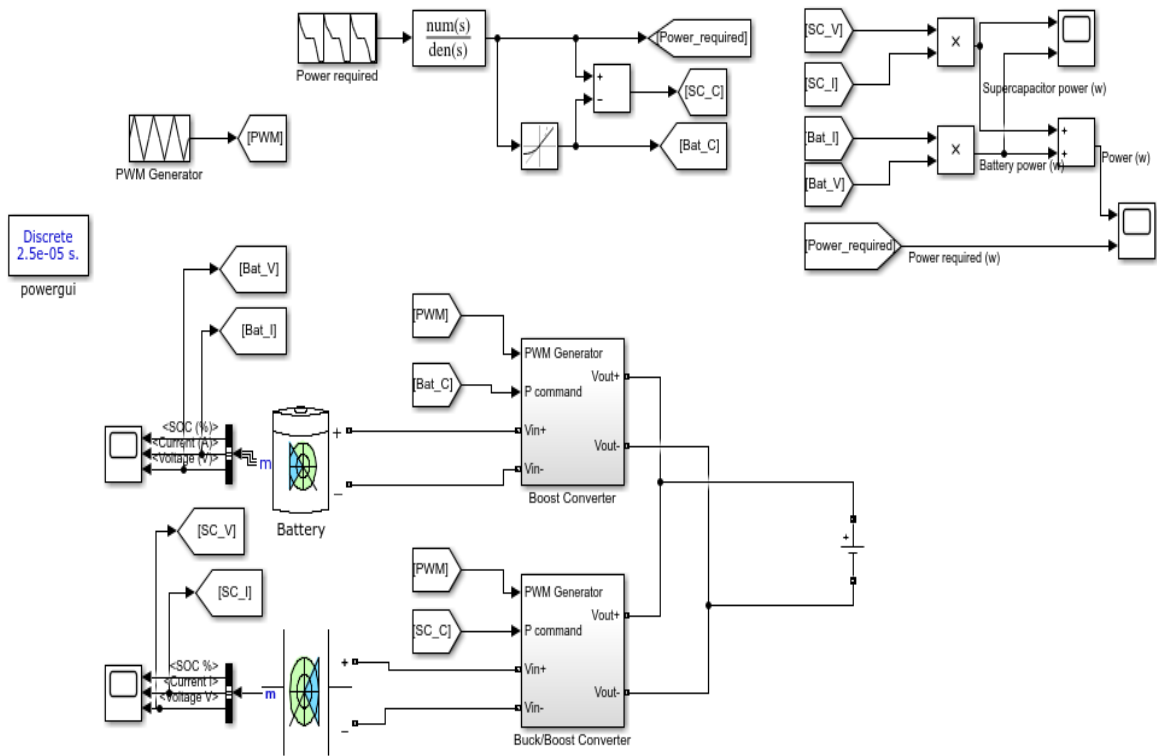


Figure III.4 : Modèle Simulink du supercondensateur et de batterie.

La batterie et le supercondensateur sont chargés par une source de tension 48V DC est connectés avec un convertisseur boost et buck/boost respectivement.

Le résultat de simulation est analysé dans 5s pour obtenir le SOC, la tension et le courant de sortie de la batterie et du supercondensateur sont montrés dans Figure III.5 et III.6 respectivement. Leur puissance est indiquée sur la Figure III.7

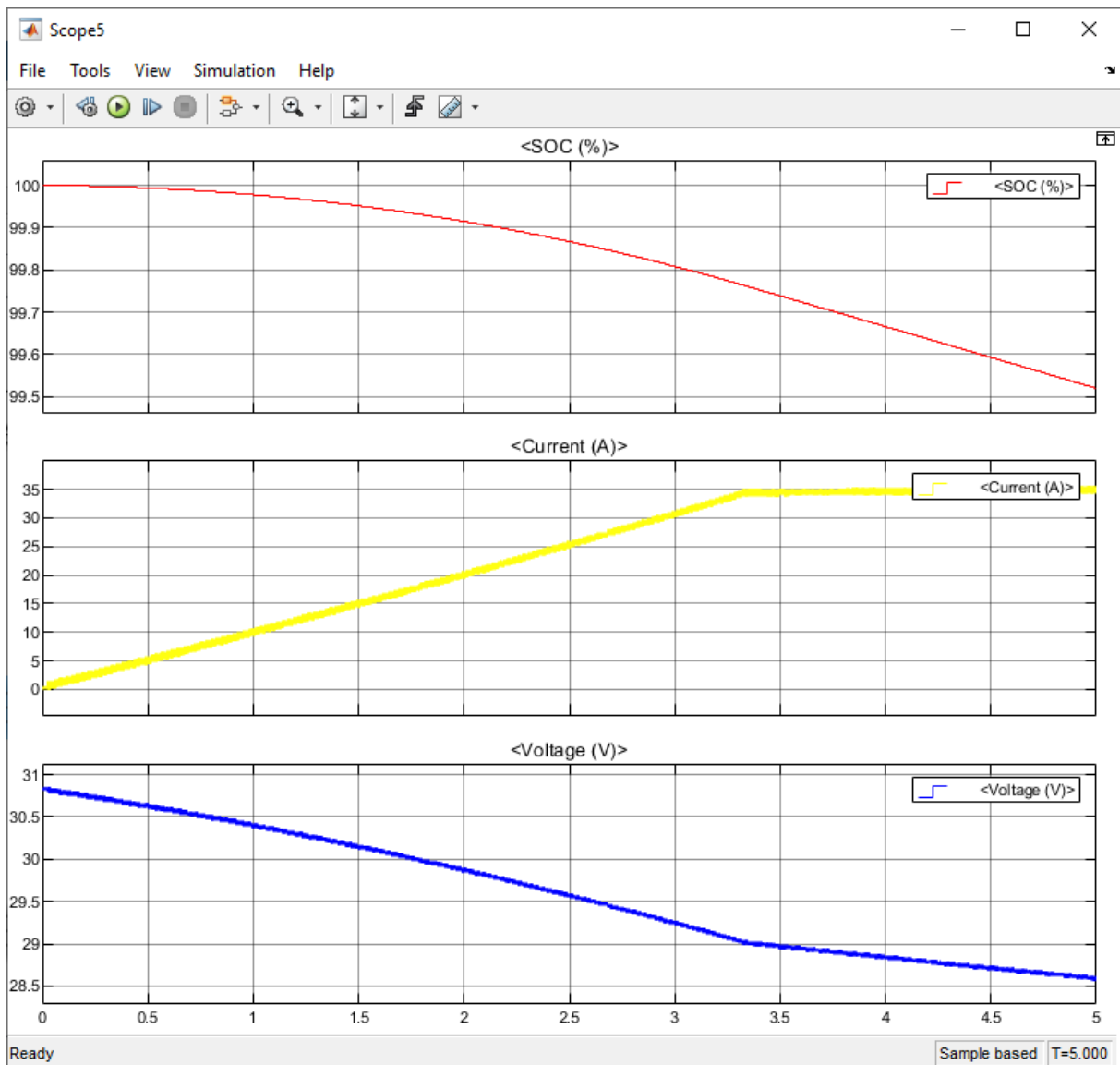


Figure III.5 : Les Caractéristiques du SOC, le courant et la tension de la batterie

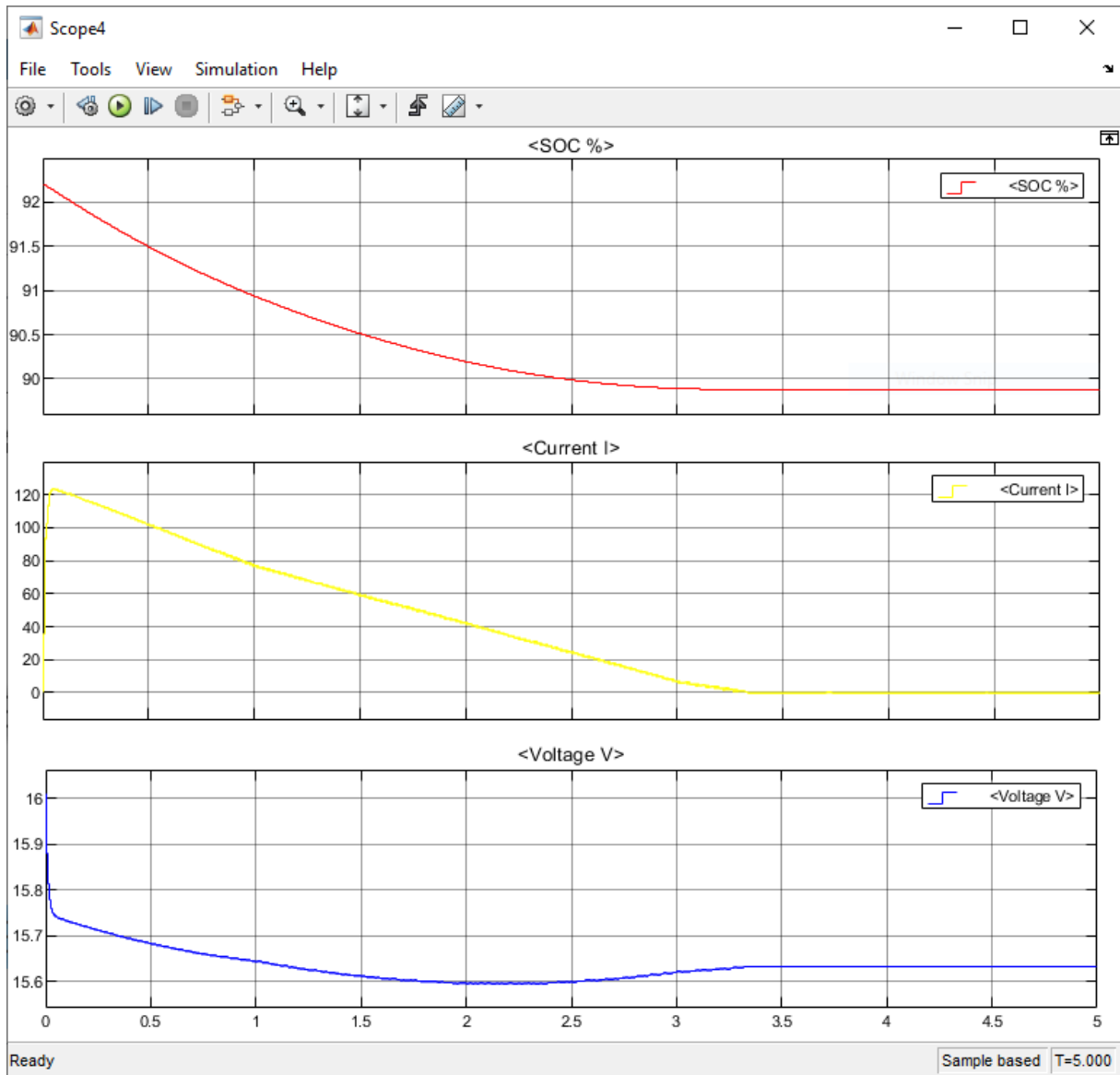


Figure III.6 : Les caractéristiques du SOC, le courant et la tension du supercondensateur

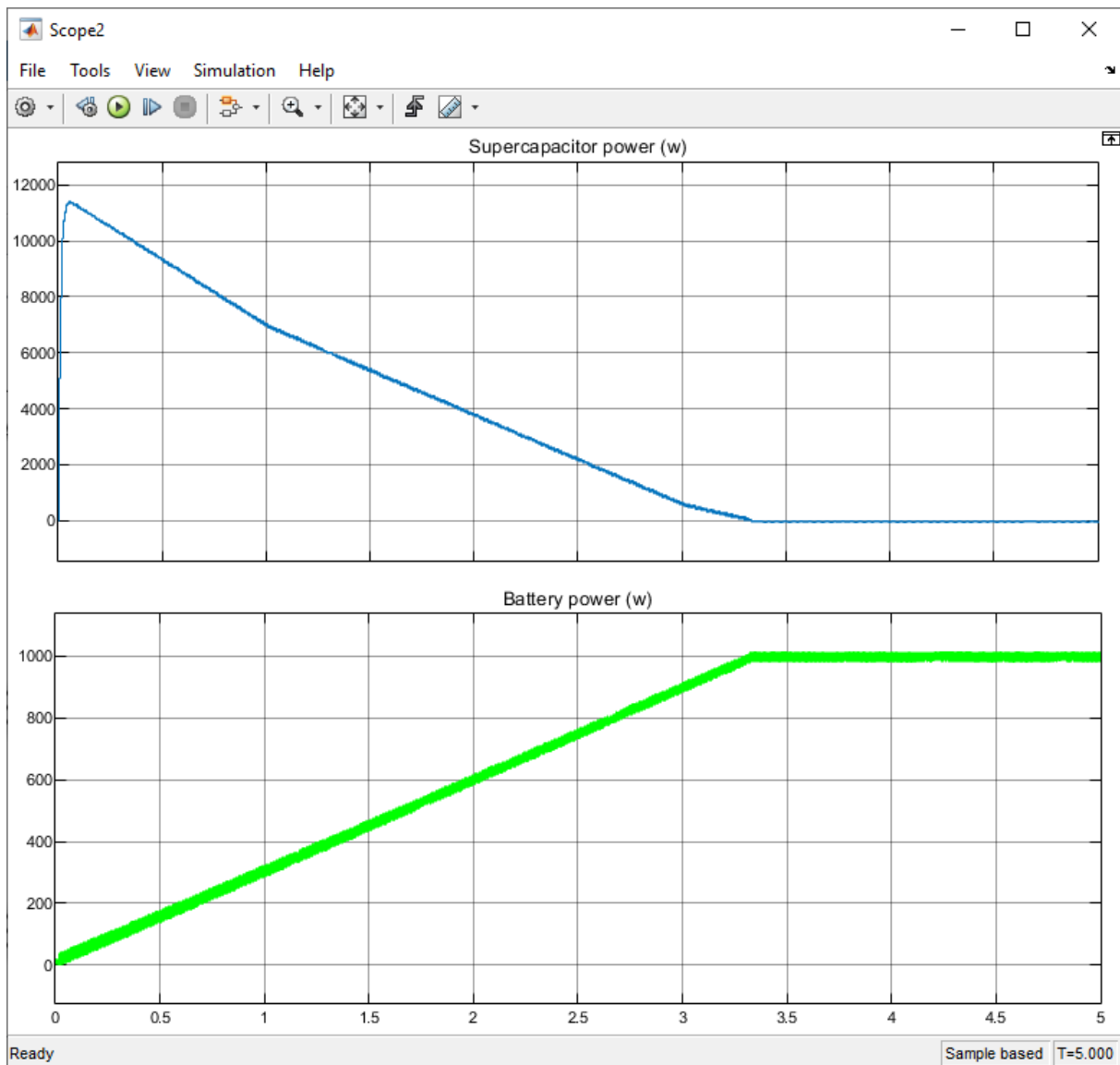


Figure III.7 : La puissance du supercondensateur et de la batterie

De Figure III.5, la batterie fournit une tension et un courant presque constants et il décharge d'environ 40% pendant la performance.

De Figure III.6 il est vu que le supercondensateur décharge complètement avec une chute de tension, mais au moment initial, il fournit un courant très élevé.

La figure III.7 montre que le supercondensateur fournit une puissance crête pour une courte durée et diminue à zéro, mais la batterie fournir une puissance constante pour plus de temps. La puissance de sortie du supercondensateur est très élevée par rapport à la batterie.

Selon le SOC de la batterie et du supercondensateur montré, le SOC de la batterie diminue lentement à un niveau relativement stable, tandis que le supercondensateur SOC a changé radicalement. Puisque le courant des supercondensateurs baisse avec leur tension de fonctionnement, mais la batterie fournit un courant constant.

L'efficacité de chargement et de déchargement est généralement considérée comme le principal facteur. Par comparaison, seulement la moitié de l'énergie à la puissance crête de la batterie est sous forme d'énergie électrique à la charge. C'est-à-dire que l'efficacité des batteries est d'environ 50 %. Pour les supercondensateurs, la puissance crête est habituellement de 95 % de décharge efficace.

III.4 Conclusion

A travers ce chapitre nous concluons que les supercondensateurs sont utilisés comme source pour les demandes de fortes puissances pendant quelques secondes jusqu'à quelques dizaines de secondes. Ils peuvent supporter un nombre de cycles de charge/décharge environ 1 000 fois plus élevé que les batteries. De plus, ils peuvent fournir ou absorber un courant très élevé.

Cela révèle que le supercondensateur fournit une puissance crête élevée, mais sa densité d'énergie est faible. La batterie a une densité d'énergie plus élevée, mais sa densité de puissance est plus faible.

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire de master contribue l'utilisation des batteries et des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée dans le véhicule électrique. Nous avons démontré au cours de cette étude que les supercondensateurs représentent une source énergétique capable de fournir des appels de puissance au moment opportun.

Le supercondensateur se caractérise d'ordinaire par sa capacité à se charger et se décharger beaucoup plus rapidement qu'une batterie, mais il n'est pas capable de stocker autant d'énergie qu'une batterie. Il a une densité d'énergie moins élevée que les batteries électrochimiques. Etant donné la complémentarité entre batterie et supercondensateurs, cette association peut apporter des solutions réalistes à la problématique de limitation des performances des systèmes de stockage et la réduction de la consommation énergétique d'un véhicule grâce à la récupération de l'énergie lors du freinage et à sa durée de vie très élevée.

Pour arriver à ce résultat, nous avons été amenés dans un premier temps une étude détaillée sur le supercondensateur et son intérêt dans les systèmes embarqués. Nous avons explicité les systèmes de stockage embarqués dans les véhicules électriques, ses sources d'énergie ainsi que son principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients ont été aussi discutée.

Dans un second temps, nous avons développé la modélisation électrique de batterie et du supercondensateur ainsi que les convertisseurs DC/DC pour comprendre la difficulté et la nécessité de caractériser ces éléments pour les intégrer dans des applications véhicule.

En dernier temps, les résultats obtenus par notre simulation (dans l'environnement Simulink /Matlab) prouvent que le supercondensateur peut être utilisé comme une source pour les demandes de fortes puissances pendant quelques secondes jusqu'à quelques dizaines de secondes et il se charge/décharge rapidement alors que la batterie fourni une puissance constante et se charge/décharge lentement.

Le domaine d'étude des véhicules électriques est tellement vaste, nous sommes focalisés dans notre mémoire par l'étude et simulation de la batterie et du supercondensateur dans le stockage de l'énergie embarquée, il existe d'autres façons d'étudier et simuler l'efficacité de leur puissance sur la puissance du moteur électrique. Nous espérons que cette étude sera l'un des objectifs des mémoires pour les futurs étudiants.

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus sont très satisfaisantes et montrent l'efficacité du supercondensateur et sa complémentarité avec la batterie pour le stockage de l'énergie embarquée pour le véhicule électrique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. B. E. Conway, *Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
- [2]. R. Kötz et M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 45, n° 15-16, 3 mai 2000, pp. 2483-2498.
- [3]. M. Endo, T. Takeda, Y. J. Kim, K. Koshiba et K. Ishii, "High power electric double layer capacitor (EDLC's); from operating principle to pore size control in advanced activated carbons.," *Carbon Science*, vol. 1, n° 3-4, 2001, pp. 117-128.
- [4]. NEC TOKIN Corp., SuperCapacitor, <http://www.nec-tokin.com/english/product/supercapacitor/outline01.html>
- [5]. ELNA, 2003, *The company information of ELNA Co.*, <http://www.elna-america.com/company.htm>.
- [6]. R. Kötz, S. Müller, M. Bäertschi, B. Schnyder, P. Dietrich, F. N. Büchi, A. Tsukada, G. G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia1, P. Barrade, V. Hermann et R. Gallay, "Supercapacitors for peak-power demand in fuel-cell-driven cars," ECS vol. PV 2001-21, pp. 564, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ (2003).
- [7]. A. Nishino, "Capacitors: operating principles, current market and technical trends," *Journal of Power Sources*, vol. 60, n° 2, juin 1996, pp. 137-147.
- [8]. Epcos Corp., UltraCap technology, <http://www.epcos.com/inf/20/35/ds/technology.pdf>
- [9]. ESMA Co, Supercapacitor Design. [Online], Available: <http://www.esmacap.com/Design/Design2/?lang=English>.
- [10]. R. Z. Ma, J. Liang, B. Q. Wei, B. Zhang, C. L. Xu et D. H. Wu, "Study of electrochemical capacitors utilizing carbon nanotube electrodes," *Journal of Power Sources*, vol. 84, n° 1, novembre 1999, pp. 126-129.
- [11]. Panasonic Corp., Gold Capacitor, http://www.panasonic.com/industrial/components/gold_cap.htm.
- [12]. J.R. MILLER, "Battery-capacitor power source for digital communication applications : simulations using advanced electrochemical capacitors", *The Electrochemical Society Proceedings*, Vol. 95-29, pp. 246-254, USA, 1995
- [13]. Y. MORI, "Electric double-layer capacitors replace backup batteries for microcomputers", *Journal of Electronic Engineering*, pp. 60-62, Japan, April 1992

- [14]. T. HASHIMOTO, "Electric double –layer capacitors back up momentary power cut", Journal of Electronic Engineering, Vol. 28, Fasc. 298, pp. 116-118, Japan, October 1991
- [15]. C. FRANZO, "Double layer capacitor technology overview and IC memory card application", Masters of Applied Science, University of Toronto, 1993
- [16]. S.M. HALPIN, S.R. ASHCRAFT, "Design considerations for single-phase uninterruptible power supply using double-layer capacitors as the energy storage element", IEEE-IAS'96, Vol. 4, pp. 2396-23403, USA, 1996
- [17]. R. BONERT, S. REICHERT, "Super-capacitors for peak load shaving of batteries", EPE'97, pp. 1.055-1.060, Trondheim, September 1997
- [18]. E. LUCA, "Supercondensateur pour voiture électrique : de quoi s'agit-il ? ", Juin 2020, <https://autopassion.net/articles/supercondensateur-voiture-electrique/>
- [19]. A.F. BURKE, J.E. HARDIN, E.J. DOWGIALLO, "Application of ultracapacitors in electric vehicle propulsion systems", 34th International Power Sources Symposium, pp. 328-333, USA, 1990
- [20]. A.F. BURKE, E.J. DOWGIALLO, "Ultracapacitors technology update and electric drive vehicle evaluations", 11th International Electric Vehicle Symposium, Vol. 2, pp. 19.07 (1-13), Italy, August 1997
- [21]. E.J. DOWGIALLO, A.F. BURKE, "Ultracapacitors for electric and hybrid vehicles – A technology update", 11th International Electric Vehicle Symposium, Vol. 3, pp. 19.07/1-13, Italy, 1992
- [22]. H. Benariba, "Contribution à la commande d'un véhicule électrique", Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.
- [23]. HASSAINE Zakaria et ZEGHOUDI Soufiane, "Commande latérale d'un véhicule électrique", mémoire de master, université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2020
- [24]. Tesla(automobile).
- [25]. Bordji Abdelmalek et Flitti Hamza, "Etude et simulation des éléments de chargeurs intégrés pour véhicule électrique", mémoire de master, université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019
- [26]. Rania MKAHL Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique, thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD, 2015

- [27]. Adrian Florescu. Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique. Energie électrique. Université de Grenoble, 2012
- [28]. Kevin Tanguy, « Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier », Québec, Canada, 2013
- [29]. S. Butterbach, Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd, Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, septembre 2012
- [30]. A. Neffati. Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride. Thèse de doctorat, Université Toulouse III, Paul Sabatier, 2013
- [31]. K. AMMOUS, « Contribution à la construction systématique des modèles moyens de convertisseurs de puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [32]. Ahmed BOUCHERIT, « Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources », thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard, France, 2011.
- [33]. B. Chauchat, Chargeur de batteries intégrée pour véhicule électrique, Thèse de doctorat, Novembre 1997.
- [34]. AKANKSHA, Dixit, et al. 2014. Introduction to the zigzag modeled ultracapacitor. PUNE, INDIA : Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014.
- [35]. ZUBIETA, L. et BONERT, R. 1998. Characterization of double layer capacitors for power electronics applications. s.l. : IEEE, 1998.
- [36]. Guven ALCICEK, " Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des applications véhicule électrique", Thèse de doctorat, université de technologie de Belfort Montbéliard, 08 Décembre 2014 .
- [37]. GUALOUS, Hamid, GALLAY, Roland et BERTHON, Alain. 2004. Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée: Application transport. s.l. Revue de l'Electricité et de l'Electronique REE, 2004. pp. 83-90.
- [38]. BELHACHEMI, Farid. 2001. Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance. INPL. Nancy : s.n., 2001 Thèse de doctorat .
- [39]. DE LEVIE, R. 1963. On porous electrodes in electrolyte solutions. s.l. : Electrochimica, 1963. pp. 751-780. Vol. 8.

- [40]. KÖTZ, R. et CARLEN, M. 1999. Principles and applications of electrochemical capacitors. s.l. : Electrochimica, 1999. pp. 2483-2498. Vol. 45.
- [41]. BELHACHEMI, F., RAËL, S. et DAVAT, B. 2000. Modelisation énergétique des supercondensateurs à couche double électrique. Lille : EPF'00, 2000.
- [42]. BULLER, S., et al. 2002. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy. s.l. : IEEE Trans. Industry Applications, 2002. Vol. 38.
- [43]. REZOUG, Nassim. 2006. Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: Application au cyclage d'un module de supercondensateur basse tension en grande puissance. Lille : Ecole centrale de Lille, 2006. Thèse de doctorat.
- [44]. Damien Paire, « Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie », Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, soutenue le 6 décembre 2010.
- [45]. Yann Riffonneau, « gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – Application à l'habitat », Thèse de doctorat de l'Université de JOSEPH FOURIER, soutenue le 23 octobre 2009.
- [46]. Mohamed A. Ould Yahya 1, A. Ould Mahmoud 1 et I. Youm 2, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) », Revue des Energies Renouvelables, CDER, Vol. 10 N°2, 2007.
- [47]. Redha Sadoun, « Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », Thèse de doctorat de l'ECOLE CENTRALE DE LILLE, soutenue publiquement le 03/06/2013.
- [48]. Yao, Kai, Weijie Tang, Xiaopeng Bi, and Jianguo Lyu. "An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter." IEEE Transactions on Power Electronics IEEE Trans. Power Electron. 31.8 pp. 5944-951,2016.
- [49]. Wu, Weimin, Yuan Liu, Houqing Wang, Min Huang, and Frede Blaabjerg. "Modelling and Control Design of a Dual Buck-Boost AC/DC Converter Used in the DC Nano-grid." IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) pp.1-6, 2016.