

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA Bejaïa  
Faculté de technologie  
Département de Génie Electrique



## *Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master en*

*Électrotechnique option Energies Renouvelables*

## *Thème*

**Modélisation et application d'un supercondensateur**

**Présenté par :**

**Mr : SENOUNE Massinissa**

**Mr : BOUTEGRABET Yacine**

**Devant le jury :**

**Mr : TAZERART**

**Mr : BOUGHANI**

**Encadré par:**

**Mr : REKIOUA.T**

**Co-Encadré par :**

**Mr : MEBARKI.N**

**Année universitaire  
2019/2020**

## **Remerciement**

*Ce mémoire a été réalisé à Bejaia, dans le laboratoire de recherche (L.T.I.I) de l'université A-Mira campus Targa Ouzemour, faculté de technologie département de génie électrique.*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à luice Travail a pu être réalisé.*

*Merci à nos parents d'avoir su nous écouter et nous motiver. Merci à l'ensemble de nos amis(e), qui ont été là pendant les périodes de doute et de stress.*

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promoteur MrREKIOUA.T professeur à l'université de Béjaia pour avoir accepté de nous encadrer, et pour le thème qu'il nous a proposé.*

*Nous remercierons particulièrement notre Co-promoteur Mr Mebarki.N pour son aide précieuse, ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*A toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Merci à vous qui allez lire ce mémoire.*



# ***Tables Des Matières***



## **CHAPITRE I : Généralités sur les supercondensateurs**

Introduction .....	2
I.1 structure des supercondensateurs .....	4
I.2 différentes technologies des supercondensateurs : .....	5
I.3 Constituants du supercondensateur .....	6
I.3.1 Les électrodes .....	6
A. Présentation des technologies .....	6
B. Technologies de fabrication .....	6
C. Catégories de supercondensateurs- Electrodes .....	7
C.1 Supercondensateurs à stockage d'énergie électrostatique .....	7
C.2 Supercondensateur à stockage d'énergie électrochimique .....	9
I.3.2 Electrolyte .....	10
I.3.3 Séparateur .....	11
I.4 Techniques d'assemblage .....	11
I.5 Etat de l'art et Performances .....	12
1.5.1 Premières productions .....	12
1.5.2 Etat actuel .....	13
I.6 Domaine d'applications des supercondensateurs .....	13
I.6.1 Domaine militaire .....	13
I.6.2 Domaine des transports .....	14
I.6.3 Domaine de la logistique .....	15
I.6.4 Domaine réseau électrique .....	15
I.6.5 Domaine électronique .....	16
I.7 Avantage et inconvénient .....	16

- Avantages..... 16
- Inconvénients ..... 16

Conclusion..... 17

## **CHAPITRE II : Modélisation et identification des paramètres des supercondensateurs**

Introduction ..... 18

II .1 Modèles de supercondensateur : ..... 18

    II.1.1. Modèle de base RC..... 18

    II.1.2. Modèle à deux branches de Zubieta ..... 19

        II.1.2.1. Détermination des paramètres du modèle ..... 22

            II.1.2.1.1. Paramètres de la branche principale ..... 22

            II.1.2.1.2. Paramètres de la branche lente ..... 23

                II.1.2.1.2.1. Identification de R2 ..... 23

                II.1.2.1.2.2. Identification de C2 ..... 24

    II.1.2.2. Limites du modèle à deux branches ..... 24

    II.1.3. Modèles tenant compte du comportement en fréquence en fonction de la nature des pores des électrodes ..... 25

    II.1.4. Modèle à constantes réparties de Belhachemi..... 26

    II.1.5. Modèle fréquentiel de Buller ..... 27

II.2. Intérêt et l’usage des supercondensateurs ..... 30

Conclusion :..... 31

## **CHAPITRE III : Application des supercondensateurs dans le véhicule électrique**

Introduction : .....	32
III.1 Modélisation de la batterie .....	32
<b>a.</b> Modélisation de Capacité $C_{batt}$ : .....	33
<b>a.1</b> Equations de la tension de décharge : .....	34
<b>a.2</b> Equations de la tension de charge .....	34
III.2 Convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	35
<b>a.</b> Hacheur survolteur .....	35
<b>b.</b> Hacheur parallèle réversible en courant.....	36
III.3 Modélisation de la MSAP .....	37
<b>a .</b> Modélisation dans le repère triphasé.....	38
<b>a.1</b> Equations Magnétiques .....	38
<b>a.2</b> Equation Mécanique.....	39
<b>b.</b> Mise en équation de la MSAP en diphasé.....	40
<b>b.1</b> Modélisation dans le repère diphasé (d,q) .....	40
III.4 Opération de commande du MSAP .....	41
<b>a-</b> Commande Vectorielle.....	41
<b>a.1</b> Contrôle du courant.....	41
<b>a.2</b> Contrôle de la vitesse.....	42
III.5 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	43
<b>a .</b> L'onduleur de tension.....	44
III.6 Modélisation du véhicule électrique .....	46
Conclusion :.....	48

## **CHAPITRE IV : Résultats de simulation**

Introduction .....	49
IV.1 Dimensionnement des éléments du système étudié :.....	50
IV.1.1 Caractéristiques du véhicule :.....	50
IV.1.2 Dimensionnement des supercondensateurs .....	50
IV.1.3 Caractéristiques des batteries :.....	51
IV.1.4 Gestion de puissance.....	52
IV.2 Résultats de la simulation : .....	52
.Mode traction .....	55
.Mode Freinage .....	56
.Mode arrêt .....	56
.Autres résultats .....	57
Conclusion.....	58



## *Tables des figures*





## Tables des figures

Figure I.1 : Diagramme de Ragone .....	3
Figure I.2 : Structure d'un supercondensateur .....	4
Figure I.3 : Structure microscopique d'une électrode au charbon actif .....	8
Figure I.4 : Structure microscopique d'une électrode en tissu activé .....	9
Figure I.5 : Constitution de base d'un supercondensateur. ....	11
Figure I.6: Application de supercondensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...).....	14
Figure I.7 : Application des supercondensateurs dans le domaine du transport. (a) "Blue Car" (b) SITRA SES de Siemens .....	14
Figure I.8 : Grues aéroportuaires au Japon combinant un moteur diesel et des modules Supercondensateurs.....	15
Figure I.9 : (a) souris sans fils (b) Carte graphique équipées de supercondensateur. ....	16
Figure II.1 : Modèle de base de supercondensateur – Profil de décharge à courant constant.....	19
Figure II.2 : Modèle électrique des supercondensateurs .....	20
Figure II.3 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A".	20
Figure II.4 : Capacité en fonction de la tension de charge pour les cellules de 650F, 1500F et 2600F .....	21
Figure II. 5 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge.....	23
Figure II. 6 : Représentation poreuse d'électrode comme ligne de transmission de cinq éléments.	25
Figure II. 7 : Circuit du modèle à ligne de transmission représentant le phénomène de redistribution des charges.....	26
Figure II.8 : Circuit de base du modèle fréquentiel.....	27
Figure II. 9 : Approximation de l'impédance de l'électrode poreuse à l'aide du schéma équivalent (le nombre de paramètres réduit à 2).....	28
Figure II.10 : Modèle de super-condensateur sur Matlab-simulink .....	29
Figure II.11 : Tension super-condensateur.....	29

## Tables des figures

Figure II.12 : SOC du super-condensateur .....	30
Figure III.1 : schéma équivalent du système étudié. ....	32
Figure III.2 : schéma électrique équivalent de la batterie .....	33
Figure III.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost .....	35
Figure III.4 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert .....	35
Figure III.5: Hacheur parallèle réversible en courant.....	36
Figure III.6 : Schéma bloc de la régulation de $I_d$ .....	42
Figure III.7: Schéma bloc de la régulation de $I_q$ . ....	42
Figure III.8 : Schéma d'un onduleur de tension .....	44
Figure III.9 : Schéma bloc de la MSAP avec commande vectorielle.....	45
Figure III.10 : Représentation des forces agissant sur le véhicule .....	46
Figure IV.1 : Schéma globale de simulation .....	49
Figure IV.2 : Vitesse de référence en km/h.....	52
Figure IV.3 : Vitesse du moteur électrique en km/h .....	53
Figure IV.4 : Profil de la puissance demandé .....	53
Figure IV.5 : Puissance délivrée par la batterie(a) .....	54
Figure IV.6 : Puissance du super-condensateur (b).....	54
Figure IV.7 : tension au niveau du bus continu.....	55
Figure IV.8 : Profil des puissances durant le mode de traction.....	55
Figure IV.9 : Profil des puissances durant le mode de freinage.....	56
Figure IV.10: profile de toutes les puissances.....	57
Figure IV.11 : Etat de charge des supercondensateurs.....	57
Figure IV.12 : état de charge des batteries .....	58

## Nomenclature

$K$  : la conductivité de l'électrolyte.

$C$  : la capacité à basse fréquence d'un port.

$N$  : le nombre de ports.

$h$  : hauteur.

$r$  : rayon.

$R$  : Résistance totale de la ligne de transmission

$C$  : Capacité totale de la ligne de transmission

MSAP : machine synchrone a aimant permanent

$I_{10}$ : Courant nominal de la batterie (en A) donne par le constructeur ;

$C_{10}$ : Capacité nominale de la batterie.

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C.

$L_{rev}$  : l'inductance du hacheur réversible.

$i_L$  : courant et la tension de l'élément de stockage.

$V_{EC}$  : la tension de l'élément de stockage

$L_{ii}$ : l'inductance propre de la phase statorique

$\theta$  : la position mécanique du rotor.

$p$  : le nombre de paires de pôles

$J$  : l'inertie du rotor.

$C_m$  : le couple moteur fourni par le stator.

$C_r$  : le couple résistant de la charge .

$F_v$  : le coefficient de frottement visqueux.

$m$  : la masse totale du véhicule en [kg] .

$g$  : la gravité en [m/s<sup>2</sup>] .

$f_{r0}$ : la constante de la force de résistance due au déplacement .

$\rho_{\text{air}}$  : la densité de l'air en [kg/m<sup>3</sup>].

$A_f$ : la surface frontale du véhicule [m<sup>2</sup>].

$C_d$  : le coefficient de trainée aérodynamique.

$V_e$  : la vitesse du véhicule en [m/s].

$\beta$ : l'angle de pente de la route en [rad].

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> : Caractéristiques des premiers supercondensateurs commercialisés.....	12
<b>Tableau I.2</b> : Caractéristiques des supercondensateurs de la série Power Capacitors.....	13
<b>Tableau II.1</b> : comparaison entre divers dispositif de stockage .....	31
<b>Tableau IV.1</b> : principales caractéristiques du VEH.....	50
<b>Tableau IV.2</b> : Caractéristiques du super condensateur utilisé.....	51
<b>Tableau.IV.3</b> : Caractéristiques de la batterie utilisé.....	51



***INTRODUCTION GENERALE***



# Introduction générale

Les supercondensateurs ou supercapacités constituent une nouvelle génération des composants électrochimiques destinés au stockage d'énergie. Ces composants relativement nouveaux occupent une position véritablement intermédiaire entre les condensateurs électrolytiques et les accumulateurs électrochimiques en termes d'énergie et de puissance spécifiques. Leur intérêt réside dans l'énergie importante, contrairement aux condensateurs, qu'ils sont capables de stocker directement sous sa forme électrique, conservant ainsi la disponibilité immédiate de l'énergie.

Les supercondensateurs possèdent une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries

L'objectif principal de ce travail de recherche modélisation de supercondensateur et appliqué au véhicule électrique

Les points abordés au premier chapitre concernent une présentation des éléments constitutifs du supercondensateur. Ils seront détaillés afin de présenter leurs caractéristiques, ce qui permettra de donner leur performances et domaine d'application.

Dans un second chapitre, on va présenter les modèles et les méthodes d'identifications des supercondensateurs afin de présenter le modèle appliqué dans notre système étudié.

Dans le troisième chapitre, une présentation globale de notre application dans le véhicule électrique, afin de modéliser la chaîne de conversion, à savoir la source (batteries et supercondensateurs), les convertisseurs de l'électronique de puissance et la machine à aimant permanent.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats de notre application des supercondensateurs dans le véhicule électrique obtenu par le logiciel MATLAB simulink, ainsi le dimensionnement des sources et la gestion de puissance.



***Chapitre I***  
***Généralités sur les supercondensateurs***





**Introduction**

Le supercondensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (plusieurs centaines de milliers de cycles). Le diagramme de Ragone représente les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique/énergie spécifique. Ce diagramme montre que les condensateurs électrolytiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la minute. Entre les batteries et les condensateurs électrolytiques on trouve les supercondensateurs qui sont utilisés pour une utilisation de stockage de l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. L'intégration des supercondensateurs dans des applications nécessitent de les caractériser et de les modéliser.

Du fait de leur durée de vie et de leurs cycles de charge/décharge très élevés, le supercondensateur voit son insertion s'accroître de plus en plus dans des utilisations spécifiques qui allient énergie et puissance. Initialement, les supercondensateurs ont été utilisés pour la sauvegarde de mémoire pour les ordinateurs. Son succès actuel repose sur sa capacité de charge/décharge rapide avec des courants très élevés. Il permet de filtrer les appels de puissance en régime transitoire permettant ainsi aux sources primaires une longévité et un dimensionnement adapté pour répondre seulement à la demande énergétique en régime permanent. C'est le cas lorsqu'il est associé à des batteries d'énergie ou à une pile à combustible par exemple. Ce composant peut aussi être utilisé pour absorber les pics de puissance et permettre le stockage optimal de l'énergie dans les dispositifs d'énergies renouvelables tels que les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Dans les applications de traction routière ou ferroviaire, il constitue une solution de stockage d'énergie intéressante pour satisfaire des applications concernant les différents modes de fonctionnement d'un véhicule, que sont le démarrage, l'accélération et le freinage. Ainsi lors du freinage, une partie de l'énergie, habituellement dissipée en chaleur, peut être récupérée et stockée dans des supercondensateurs pour être restituée plus tard. On peut citer l'exemple de leur association avec des alerno-démarrateurs où le supercondensateur fournit l'énergie nécessaire au démarrage pour le concept du « Stop and Start » et où il peut récupérer l'énergie de freinage du véhicule[1].

Outre leur rendement énergétique très élevé, les supercondensateurs présentent de nombreux avantages : une durée de vie de plusieurs centaines de milliers de cycles de charge décharge, une relativement faible sensibilité aux variations de température et de courant, et un contrôle d'état de charge en corrélation directe avec la tension du supercondensateur qui est facilement mesurable.

La plage de fonctionnement de ce composant est de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $65^{\circ}\text{C}$  en température, de 0 à 2,7V en tension, et jusqu'à approximativement 1 Hz en fréquence (comportement en filtre passe-bas). La surface spécifique de l'électrode implique un courant maximal qui peut atteindre quelques centaines d'Ampère.

Ci-dessous en constate le diagramme de Ragone qui nous montres quelques différences entres les supercondensateurs et batteries et condensateurs :

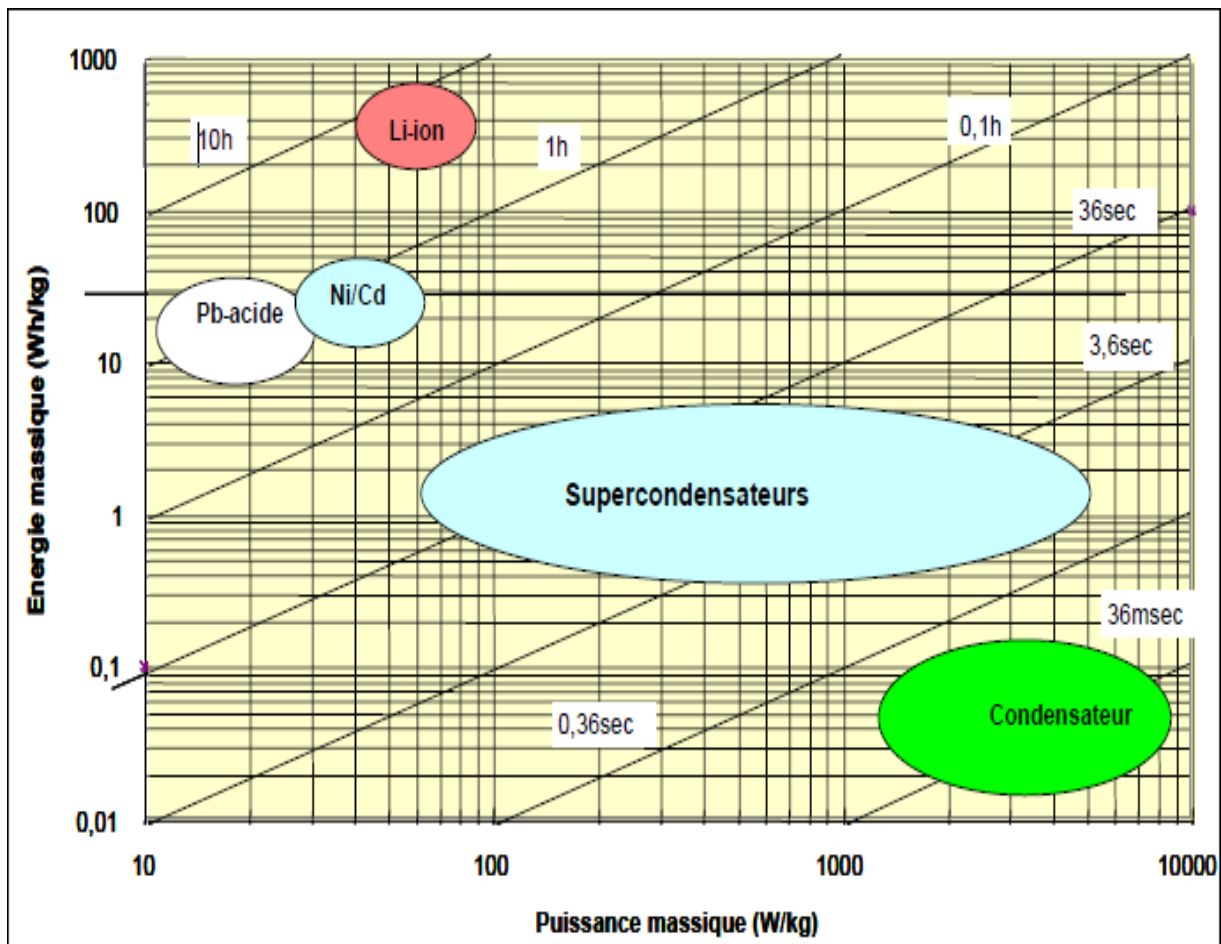
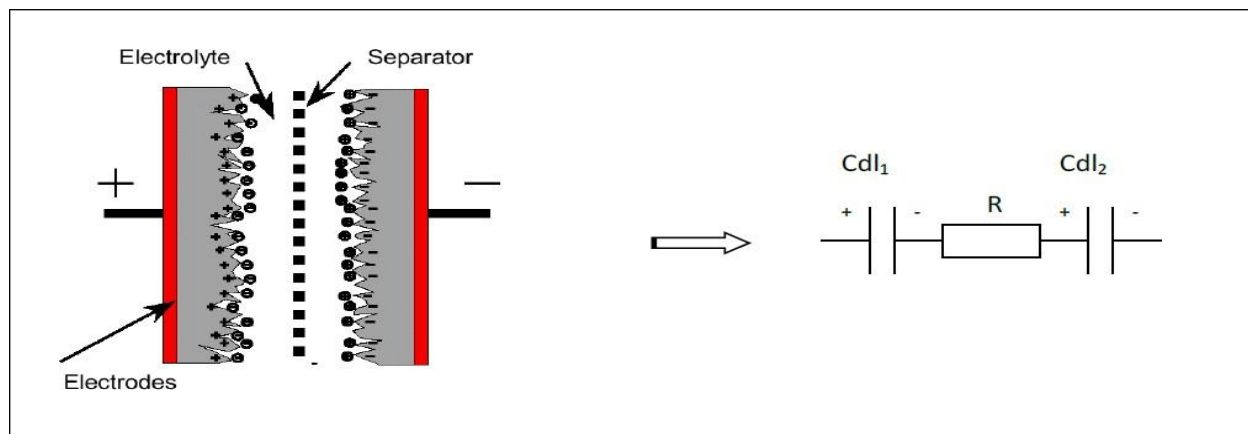


Figure I.1 : Diagramme de Ragone

## I.1 Structure des supercondensateurs

Un supercondensateur est un réservoir de puissance dont la constitution est similaire à celle d'un condensateur électrolytique. Le stockage des charges électriques est basé sur la polarisation d'un électrolyte. Son principe de fonctionnement est basé sur les propriétés capacitives des interfaces entre un conducteur électronique solide et un électrolyte ionique liquide.

La structure élémentaire d'un supercondensateur en charbon actif est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (Figure I.2). L'assemblage est réalisé par les mêmes techniques que pour les condensateurs classiques. [2]



**Figure I.2** : Structure d'un supercondensateur

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels. Cette surface associée à la faible épaisseur de la double couche permet d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000F). L'utilisation de structures série-parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés.

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-

électrolyte. C'est cette zone de charge d'espace qui est appelée double couche électrique. On peut donc considérer la structure élémentaire d'un supercondensateur comme deux condensateurs en série séparés par une résistance équivalente (Figure I.2). Le stockage de l'énergie est principalement électrostatique, le stockage de l'électricité s'effectuant par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. Il est estimé que le taux de réactions faradiques à la surface du carbone est compris entre 1 et 5%.

## I.2 Différentes technologies des supercondensateurs :

**A)** à base de charbons actifs. Ils sont constitués de deux armatures sur lesquelles une fine couche de charbon en poudre est déposée. Cette couche de carbone est ensuite activée afin de rendre la surface extrêmement poreuse. Le charbon actif possède une surface spécifique très élevée qui davantage augmenté avec les structures à base de nanotubes. En effet, leur caractère méso poreux leur confère des propriétés de stockage électrochimique intéressantes en valorisant le transport des ions de l'électrolyte vers l'interface chargée.

**B)** aqueux qui sont caractérisés par une conductivité ionique élevée, ce qui donne une résistance série équivalente très faible. L'inconvénient majeur de ces électrolytes est leur tenue en tension limitée à environ 1,2V. Les électrolytes organiques présentent une faible conductivité ionique et donc une résistance série équivalente relativement élevée comparée aux électrolytes aqueux. Par contre leur tenue en tension est relativement élevée, puisqu'elle est de l'ordre de 3V. Les supercondensateurs à charbon actif sont les plus développés industriellement.

**C)** à base d'oxydes métalliques stockent de l'énergie par une réaction chimique à la surface des électrodes. Ceci entraîne un transfert de charge et on parle alors de pseudo-capacité. L'oxyde métallique le plus utilisé est le dioxyde de ruthénium ( $\text{RuO}_2$ ). Ce système fonctionne en milieu acide ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et présente une faible résistance interne. Cependant, le coût très élevé des oxydes métalliques les cantonne à des applications militaires ou spatiales.

**D)** à base de polymères conducteurs stockent de l'énergie par des processus de dopage des polymères. Ceux-ci possèdent des capacités entre 200 et 300 F/g. Cependant, le dopage impliquant un transfert de charge, il s'agit encore une fois de pseudo-capacité. Ces systèmes de supercondensateurs sont les plus récents et ne sont pas encore au niveau du développement industriel car de nombreux problèmes subsistent, parmi lesquels le coût de synthèse, la mise en œuvre, la cyclable ...

E) les plus utilisés sont ceux qui utilisent la technologie au charbon actif. Ils sont particulièrement destinés à fournir des pics de puissance pendant un temps très court, à compenser les déséquilibres entre la puissance disponible et la puissance instantanée nécessaire. Ils peuvent permettre de réduire la taille, d'améliorer les performances dynamiques et la fiabilité des systèmes de stockage.

## I.3 Constituants du supercondensateur

### I.3.1 Les électrodes

#### A. Présentation des technologies

Pour augmenter la capacité d'une cellule de puissance, il faut augmenter la surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte. C'est pour cette raison que beaucoup de recherches sont effectuées afin de trouver des matériaux de grandes surfaces spécifiques. Le charbon actif déjà très connu dans le domaine de dépollution, est choisi pour son faible coût comparé à d'autres matériaux. Il permet d'obtenir des surfaces spécifiques pouvant aller jusqu'à 3000 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. D'autres études dans ce domaine ont montré que la résistance est plus faible et les caractéristiques électrochimiques meilleures lorsque la taille des pores est adaptée à la taille des ions actifs présents dans la double couche et qu'un taux d'impuretés métalliques trop important entraîne une autodécharge importante.

#### B. Technologies de fabrication

Afin de réduire la résistance de contact électrode électrolyte, le charbon actif subit des traitements à hautes températures (> 2300°C) sous une atmosphère de gaz contrôlée qui modifie la morphologie de ses pores. Il existe trois technologies pour la fabrication des électrodes à base de charbon actif [3] :

**Enduction:** Le charbon actif est imprégné d'un liant (typiquement du téflon ou une cellulose), puis pressé pour obtenir des pastilles, ou une pâte. C'est la technologie Maxwell et Alcatel A.R. Un supercondensateur est alors obtenu par addition d'unités montées en parallèle. L'intérêt de ce système réside dans la possibilité d'obtenir des capacités importantes, la quantité de matière active utilisée étant importante.

**Extrusion:** Le charbon actif est mis sous forme de film après ajout à un polymère de type thermoplastique, qui sert de liant. L'extrusion du mélange permet d'obtenir des films homogènes de grande longueur (de l'ordre de plusieurs mètres), de faible épaisseur (50 à 800  $\mu\text{m}$ ) pouvant être enroulés en spirale (technologie *Bolloré*).

**Tissus:** Il est possible d'utiliser également des tissus (ou des feutres) de carbone. Typiquement, on utilise un tissu obtenu à partir de poly acrylonitrile et activé physiquement, avec dans certains cas une Co-activation chimique pour obtenir une porosité adéquate. Cette Co-activation chimique se fait au moyen de produits comme des hydroxydes de terre rare, de nickel, qui en réagissant avec le carbone, crée une porosité particulière. Ce procédé est connu, mais coûteux. Cette technologie est en développement.

### C. Catégories de supercondensateurs- Electrodes

On peut classer les supercondensateurs en deux groupes suivant la nature des électrodes [4] :

- supercondensateurs à stockage d'énergie électrostatique : technologie d'électrodes au charbon actif.
- supercondensateurs à stockage d'énergie électrochimique : technologie d'électrodes aux oxydes métalliques ou aux polymères conducteurs.

#### C.1 Supercondensateurs à stockage d'énergie électrostatique

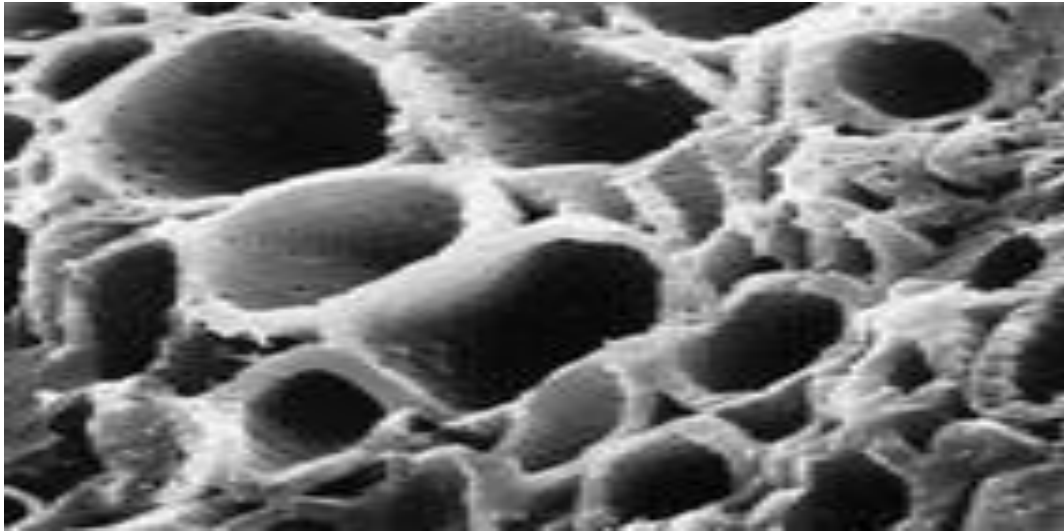
Actuellement, la technologie la plus répandue est celle au charbon actif, Ces supercondensateurs fonctionnent selon un principe du type électrostatique : l'électricité est stockée par accumulation d'ions dans la couche double électrique existant à l'interface électrode-électrolyte. L'absence de véritables réactions chimiques permet une excellente réversibilité,. Citons deux autres particularités de ces supercondensateurs :

- ✓ le stockage d'énergie principalement électrostatique leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à celle des condensateurs électrolytiques,
- ✓ le faible coût des procédés de fabrication et surtout de la matière première.

Le charbon actif est obtenu par calcination et activation de matières hydrocarbonées comme le bois de pin. Il existe deux types d'activation : physique ou chimique. Dans le premier cas, les produits végétaux sont broyés, concassés et carbonisés à 600 °C. L'activation

est réalisée par un mélange de vapeur d'eau et de gaz carbonique CO<sub>2</sub>. Le charbon obtenu est relativement exempt d'impuretés et présente une porosité peu distribuée.

Dans le second cas, une sciure de bois de pin est imprégnée avec de l'acide orthosympathique et puis chauffée à haute température. Ces charbons ont une distribution de porosité importante (figure I.3).



**Figure I.3 :** Structure microscopique d'une électrode au charbon actif  
(Porosité de type cylindrique)

D'autres technologies sont basées sur l'utilisation de tissu de carbone (super capacités Maxwell). C'est un produit ayant comme précurseur des fibres polymères ayant subi une calcination et une activation physique, avec dans certains cas une co-activation chimique. Cette dernière se fait au moyen de produits comme des hydroxydes de terres rares ou de nickel, qui en réagissant avec le carbone créent une porosité particulière (figure I.4). Les surfaces spécifiques sont dans ce cas aussi importantes, typiquement de  $2000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Ces produits présentent des porosités bien supérieures aux charbons actifs, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés. Les procédés de fabrications restent toutefois onéreux.



**Figure I.4 :** Structure microscopique d'une électrode en tissu activé

Notons à ce niveau que, même si la surface spécifique de ces matériaux est relativement élevée, seule une fraction de cette surface, celle accessible aux ions de l'électrolyte, est utile. En effet les ions peuvent être trop grands pour accéder à la microporosité (pores de taille inférieure à 2 nanomètres). De plus, la porosité peut être plus ou moins fermée par la présence de liants ou d'autres impuretés.

### **C.2 Supercondensateur à stockage d'énergie électrochimique**

Cette technologie utilise des matériaux d'électrodes permettant d'obtenir une interface électrode-électrolyte pseudo-capacitive. Deux types de matériaux sont utilisés [3et4] :

- les oxydes métalliques conducteurs électroniques,
- les polymères conducteurs électroniques.

Concernant les oxydes métalliques, il est impératif que ceux-ci ne se dissolvent pas dans le milieu électrolytique, ce qui limite le nombre de candidats possibles. On utilise principalement l'oxyde de ruthénium ou l'oxyde d'iridium en milieu acide sulfurique [5]. Cette technologie est relativement onéreuse, aussi bien au niveau de la matière première qu'à celui des procédés de fabrication. En outre, le comportement électrique de ces supercondensateurs est complexe. Quant aux polymères conducteurs électroniques, tels que le poly pyrole [6], le poly thiophène ou la poly aniline, ils permettent d'obtenir des capacités spécifiques élevées, de l'ordre de  $200 \text{ F.g}^{-1}$  et pouvant atteindre  $400 \text{ F.g}^{-1}$ . De nombreux problèmes restent cependant à résoudre, eu égard notamment à la stabilité en température, ainsi qu'à une puissance et une cyclabilité limitées.



### I.3.2 Electrolyte

La puissance maximale que peut fournir une source d'énergie électrique dépend directement de sa résistance interne. Dans le cas des supercondensateurs, cette dernière est composée de deux termes, l'un associé à la conduction électronique et donc dépendant de la qualité électrique des électrodes, et l'autre associé à la conduction ionique. Ce second terme, dans lequel intervient la conductivité de l'électrolyte, ainsi que l'aptitude des ions à migrer plus ou moins aisément dans la porosité de l'électrode jusqu'à la couche double, est par conséquent essentiellement lié aux caractéristiques de l'électrolyte, telles que :

- la concentration en porteurs de charge libres (fonction de la solubilité du sel dans le solvant, et du taux de dissociation du sel).
- la mobilité de ces porteurs (fonction de la viscosité du solvant et de la taille effective des ions en solution).
- la solvation des ions.
- la valence des ions.

Rappelons de plus que la densité d'énergie des supercondensateurs dépend fortement de leur tenue en tension, paramètre étroitement lié à la stabilité électrochimique du solvant électrolytique. C'est le second critère, majeur, guidant le choix des électrolytes utilisés dans la fabrication des supercondensateurs. Ainsi trouve-t-on deux types d'électrolyte pour supercondensateurs [7et8] :

- les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse,
- les électrolytes organiques, tels que le carbonate de propylène.

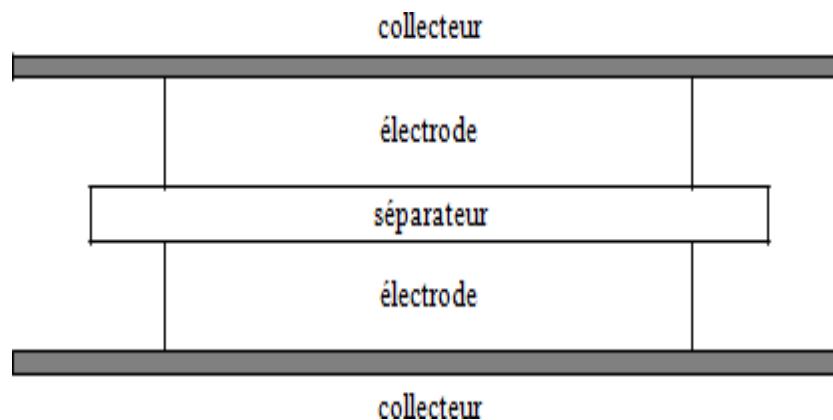
L'utilisation d'électrolytes organiques a eu pour but l'obtention de tensions de polarisation, sans effets faradiques, plus importantes : jusqu'à 4 V, voire 5 V pour certains électrolytes. La densité d'énergie, de l'ordre de  $5 \text{ Wh.kg}^{-1}$ , est donc considérablement accrue. Cependant, la conductivité ionique de ces composés étant médiocre (elle dépasse difficilement  $0,03 \text{ S.cm}^{-1}$ ), le gain en tension de service ne se traduit que par une augmentation modérée de la puissance spécifique. Plusieurs travaux,[9], sont actuellement menés pour améliorer la conductivité des électrolytes organiques.

### I.3.3 Séparateur

La construction des supercondensateurs fait également intervenir une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. Généralement, on utilise des séparateurs en plastique permettant d'obtenir des épaisseurs et des porosités variables. D'autres matériaux sont aussi employés, comme le polypropylène, le celgard ou le papier cellulosique avec fibres polymères de renfort. Élément indispensable pour le fonctionnement correct des supercondensateurs, le séparateur introduit un terme supplémentaire, dépendant de son taux de porosité, dans la résistance totale du composant [10].

### I.4 Techniques d'assemblage

Les différents constituants d'un supercondensateur. On y trouve, outre les éléments déjà mentionnés, des collecteurs métalliques (généralement en aluminium) servant d'amenées de courant pour la matière active. La puissance spécifique du produit final dépendra de la qualité du contact collecteur-électrode.



**Figure I.5 :** Constitution de base d'un supercondensateur.

Les premières productions de supercondensateurs présentaient des puissances spécifiques modérées, certes déjà supérieures à celles des accumulateurs, mais largement inférieures à celles des condensateurs électrolytiques, conséquence de la piètre qualité du contact collecteur-électrode. Par la suite, l'utilisation de nouvelles technologies a permis de réduire considérablement la résistance totale associée aux électrodes et d'obtenir des puissances spécifiques comparables à celles des condensateurs électrolytiques [11].

Actuellement, la technologie de supercondensateurs la plus intéressante est celle combinant charbon actif et électrolyte organique. Plusieurs procédés, visant à optimiser le rapport coût de production-surface de carbone activé par unité de poids et de volume, sont en concurrence pour la réalisation des électrodes [12]. Les techniques d'assemblage sont tout aussi variées. Nous présentons dans ce qui suit deux techniques, prônées par deux sociétés phares dans la fabrication des supercondensateurs, à savoir Matsushita-Panasonic (bobinage) et Maxwell (empilement). De plus amples informations concernant ces deux constructeurs et leurs produits sont présentées dans les références [13] et [14].

## I.5 Etat de l'art et Performances

Nous mettons en lumière, dans cette partie, l'historique du développement industriel des supercondensateurs, les sociétés ayant une activité avérée dans ce domaine et les performances des dispositifs réalisés.

### 1.5.1 Premières productions

**Tableau I.1** : Caractéristiques des premiers supercondensateurs commercialisés.

Constructeur (dénomination)	Matsushita (Gold Capacitor)	NEC (Super Capacitor)	Elna / Asahi Glass (Dynacap)
Matériau d'électrode	charbon actif	charbon actif	charbon actif
Electrolyte	organique	acide sulfurique	organique
Tension nominale	1,8V-5,5V	3,5V-11V	2,4V-6,3V
Capacité	0,022 F - 22 F	0,022 F - 2,2 F	0,033 F - 2,2 F

## 1.5.2 Etat actuel

Tension Nominale	Capacité	Volume	Résistance série	Courant de court-circuit
2,3 V	100 F	54 cm <sup>3</sup>	25 m	100 A
	470 F	255 cm <sup>3</sup>	2,5 m	400 A
	800 F	255 cm <sup>3</sup>	2,5 m	400 A
	1500 F	610 cm <sup>3</sup>	1,5 m	1200 A

**Tableau I.2 :** Caractéristiques des supercondensateurs de la série Power Capacitors

Ces deux dernières années, les annonces pour des modèles de forte valeur de capacité et de haute densité d'énergie se sont succédées. Citons, à titre d'exemple, Asahi Glass avec des dispositifs spécifiés à 5 Wh.kg<sup>-1</sup>, et JSB et Saft qui ont réalisé en 1997 des composants atteignant 7 Wh.kg<sup>-1</sup>. Nous résumons (Tableau I.2) les caractéristiques des principaux dispositifs carbonés déjà développés [15].

## I.6 Domaine d' applications des supercondensateurs

Grace à leur large gamme de capacité (de quelques farads a plus de 5000 Farads), les supercondensateurs ils peuvent être utilisés dans nombreux domaines, militaire ou civil, stationnaire ou embarque quand un pic de puissance sur une courte période (quelques secondes) doit être fourni.

### I.6.1 Domaine militaire

Ils équipent déjà de nombreux dispositifs militaires comme les émetteurs radios, les alimentations électrique de secours et de capteurs autonomes, les détonateurs, les systèmes d'orientation des radars de suivi des missiles balistique.

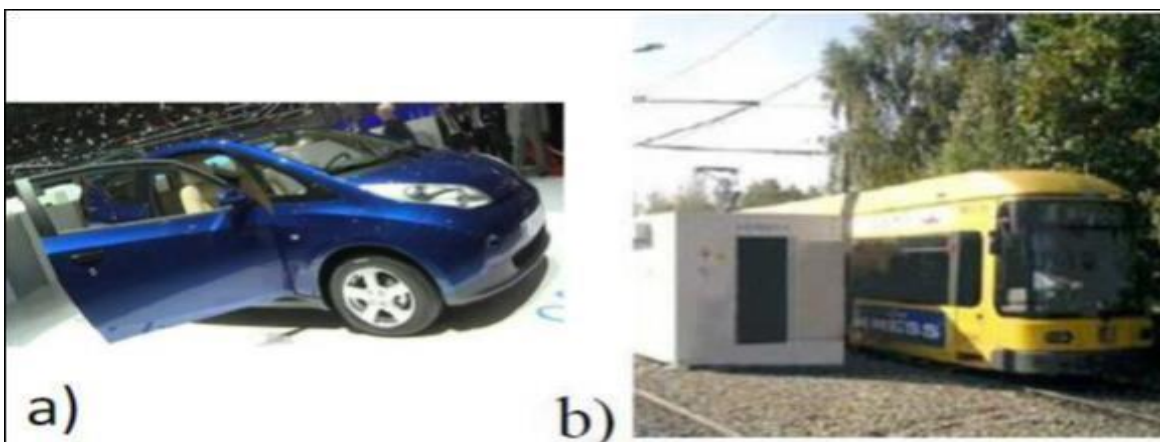


**Figure I.6:** Application de supercondensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...)

### I.6.2 Domaine des transports

Le domaine des transports est particulièrement demandeur car les supercondensateurs possèdent des temps de charge et de décharge compatible avec les phases de freinage et d'accélération.

Dans un véhicule électrique, l'association d'un supercondensateur à la batterie permet d'absorber les demandes instantanées de forte puissance (démarrage, accélération) ce qui permet de prolonger leur durée de vie .Il récupère aussi énergie cinétique lors du freinage. Ils commencent aussi à être intégrés dans les transports publics urbains (figure I.7) pour restitué l'énergie lors des freinages ou pour les rendre autonome entre deux arrêts, et la consommation d'énergie, les couts de fonctionnement et de la pollution sont réduits.



**Figure I.7 :** Application des supercondensateurs dans le domaine du transport. a)"Blue Car", b) SITRA SES de Siemens

### I.6.3 Domaine de la logistique

De la restituer en phase de levage. Grâce à ce système, la consommation Les supercondensateurs équipe des grues portuaires motorisées, par exemple au japon ils permettent de récupérer l'énergie cinétique lors de la descente du plateau porteur.

On peut citer l'utilisation de supercondensateurs pour l'alimentation des ascenseurs, Dans cette application, les supercondensateurs jouent un double rôle : la récupération d'énergie et le lissage de la puissance prise au réseau.



**Figure I.8:** Grues aéroportuaires au Japon combinant un moteur diesel et des modules Supercondensateurs [12].

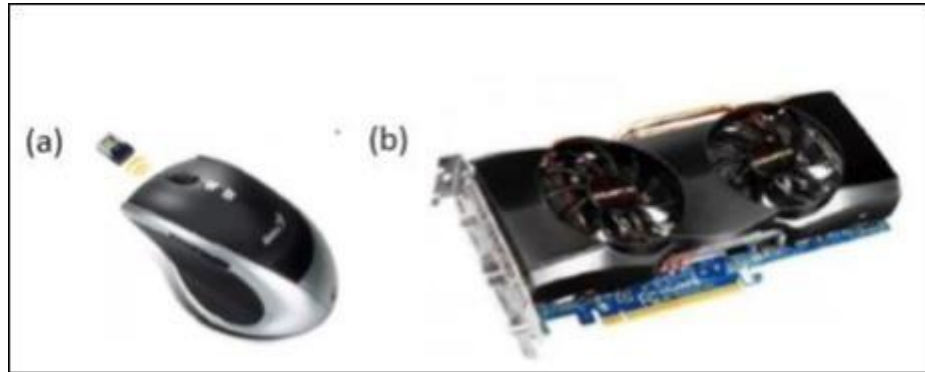
### I.6.4 Domaine réseau électrique

Ils sont aussi utilisés pour pallier aux défaillances de courtes de durée du réseau électrique dans des systèmes d'alimentation sans interruption. En effet, 98% des défaillances électriques (chute de tension ou coupure électrique) durent moins de 10 secondes dans les applications faible tension.

### I.6.5 Domaine électronique

Les applications de l'électronique de puissance nécessitent des composants de stockage d'énergie électrique de faible poids et de volume. Le choix de ce système dépend de la puissance requise par l'application. Un stockage d'énergie nécessitant peu de puissance (lent) sera assuré par une batterie et un stockage nécessitant beaucoup de puissance (rapide) sera assuré par le supercondensateur. Le remplacement de ces derniers par des supercondensateurs permet de rendre les circuits de micro-électronique plus efficaces et plus rapides. Toutefois,

leur intégration est encore délicate car les procédés de fabrication des supercondensateurs doit être rendu compatible avec ceux de la micro-électronique. Ils sont également utilisés comme source d'énergie primaire pour l'alimentation de nombreux appareils portables qui nécessitent des pics de puissance



**Figure I.9 :** (a) souris sans fils et (b) carte graphique équipée de supercondensateurs.

### I.7 Avantage et inconvénient [16]

#### • Avantages

1. courants de charge et décharge élevés (jusqu'à quelques 100 A pour les gros éléments).
2. faible durée de charge et décharge (de l'ordre de 1s à quelques 10s).
3. durée de vie ou nombre de cycles élevée (quelques 100 000 cycles) par rapport aux accumulateurs
4. Densité puissance élevée.
6. Etat de charge facile à gérer (linéaire en fonction de la tension).

#### • Inconvénients

1. Faible densité d'énergie
2. Tension maximale très faible par cellule (2,7V) pour la technologie charbon actif
3. Electrolyte dangereux (acétonitryle) charge/décharge
4. composants pouvant contenir de l'acétonitryle (inflammable)

## **Conclusion**

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter l'historique et la composition et le domaine d'application des supercondensateurs leur avantage et inconvénient, par rapport à d'autres sources d'énergies, le principe de fonctionnement, est leur caractéristique aux filles des années.

Dans le chapitre suivant nous avons l'identification et modélisation de quelque modèle de super condensateur afin de voir le plus compatible pour notre application.





***Chapitre II***  
***Modélisation et identification des paramètres des  
supercondensateurs***



## Introduction

La modélisation des supercondensateurs permet de déterminer leur comportement en vue d'une utilisation dans une application. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux modèles électriques les plus utilisés et à l'identification de leurs paramètres. La modélisation des supercondensateurs dans les applications embarquées, notamment dans le véhicule électrique [17] selon leur degré de complexité, plusieurs modèles comportementaux existent ; certains représentent le comportement du supercondensateur lors d'une charge/décharge, d'autres prennent en compte les sollicitations du supercondensateur et en particulier la fréquence de charges/décharges. Par ailleurs, il apparaît de plus en plus des modèles basés sur la structure bidimensionnelle des nanotubes de carbone qui composent les nouvelles générations de supercondensateurs [18].

### II .1 Modèles de supercondensateur :

#### II.1.1. Modèle de base RC

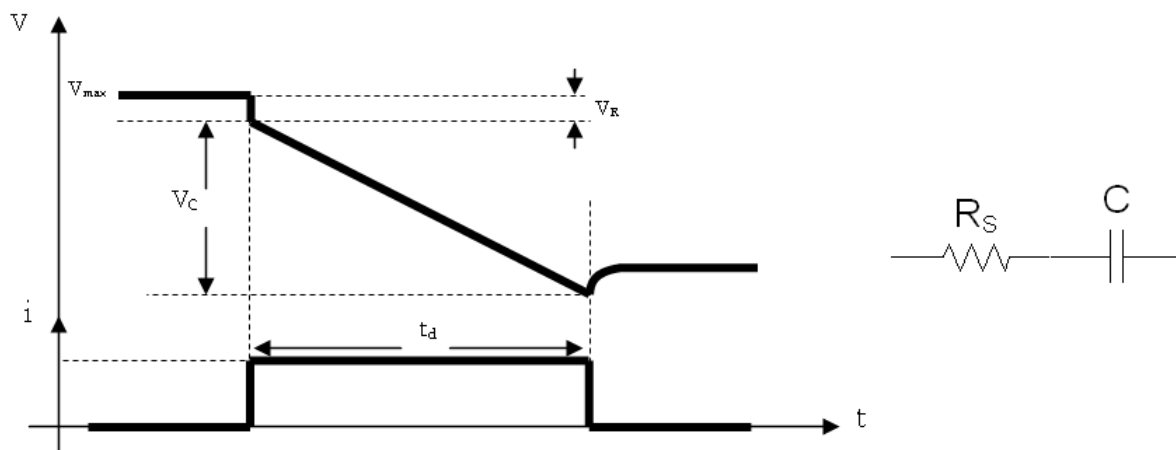
Le modèle le plus simple est celui proposé en général par le constructeur, il s'agit d'un circuit RC en série. R représente la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet Joule dans le supercondensateur et C la capacité principale du supercondensateur. Dans ce modèle on ne tient compte 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:

$$R_s = \frac{V_R}{I} \dots\dots\dots (II.1)$$

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 la réponse suite à une décharge à courant constant de la cellule (Figure II.1).

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



**Figure II.1 :** Modèle de base de 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.1.2. Modèle à deux branches de Zubieta

Dans la référence [19] 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  $R_2C_2$  qui est beaucoup plus grande que  $R_1C_1$ .

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

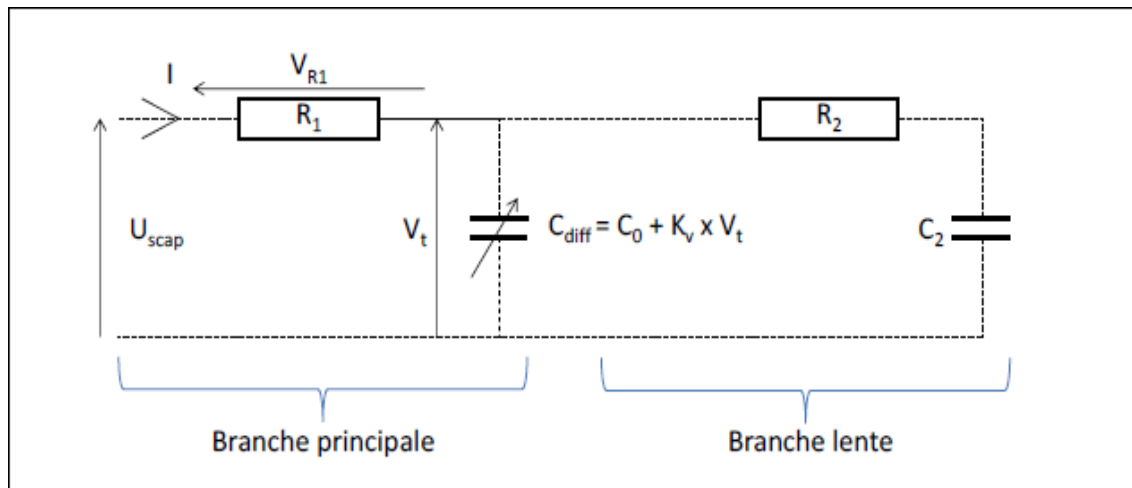


Figure II.2 : Modèle électrique des supercondensateurs

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).

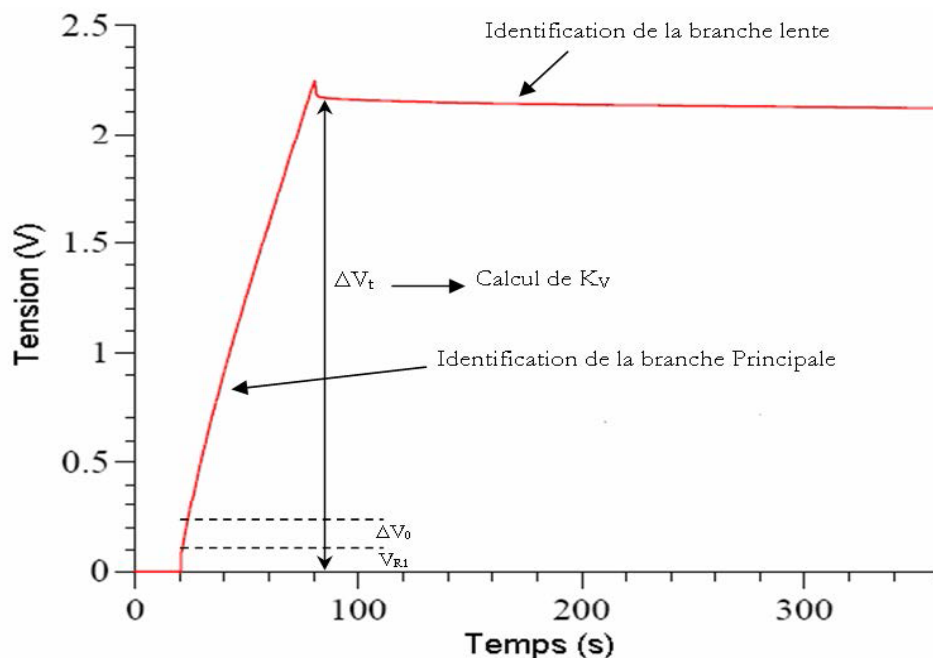


Figure II.3 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A"

La suivante 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'aît entre 1.25V et 2.5V de sa tension de charge.

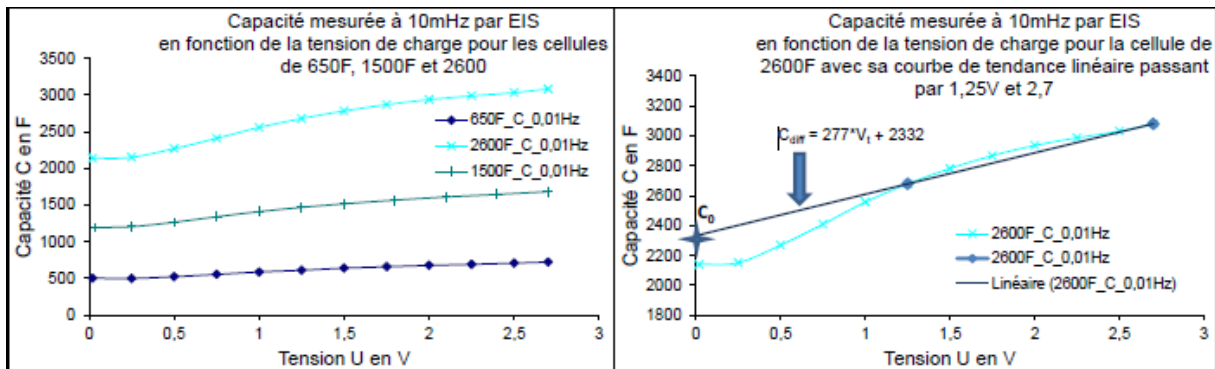


Figure II.4 : Capacité en fonction de la tension de charge

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

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

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

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

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

$$Q_{tot} = \int I. dt = \int C_{diff}(v_t) \times dv_t \dots\dots\dots(II.5)$$

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

$$Q_{tot} = \int (C_0 + Kv) \cdot dV_t = (C_0 + \frac{Kv}{2} \cdot V_t) \cdot V_t \dots\dots\dots (II.6)$$

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

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

### II.1.2.1. Détermination des paramètres du modèle

#### II.1.2.1.1. 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 :

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

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

C0 : est déterminée directement à partir de la caractéristique en charge à courant constant de la cellule, elle traduit la pente initiale de la courbe :  $C_0 = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}(t_{(0)})}$

On calcule alors la valeur de C0 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 3). La charge totale d'un supercondensateur vaut :

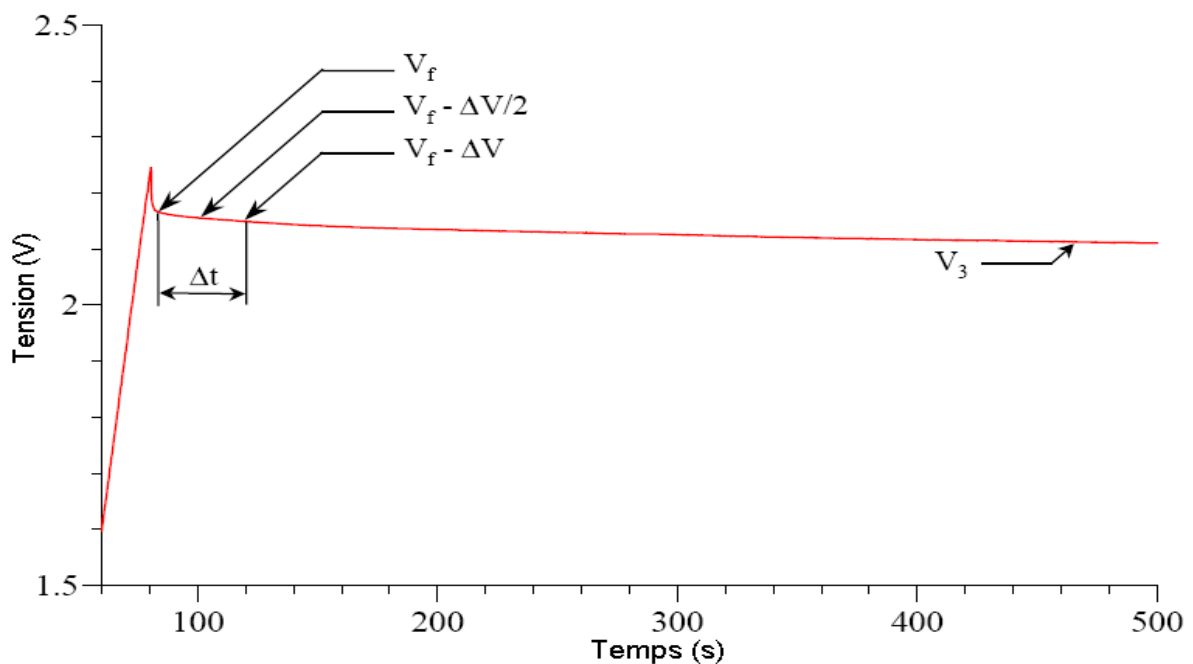
$$\Delta Q_{tot} = C_0 \Delta V_t + \frac{Kv}{2} \cdot (\Delta v_t)^2 \dots\dots\dots (II.10)$$

$$C_0 \cdot \Delta V_t + \frac{Kv}{2} (\Delta V_t) \Delta V_t^2 = I \cdot \Delta t \dots\dots\dots (II.11)$$

$$Kv = 2 \frac{I \cdot \Delta t - C_0 \cdot \Delta v_t}{(\Delta v_t)^2} \dots\dots\dots (II.12)$$

**II.1.2.1.2. 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 [2] Ceci peut être assimilé à une charge lente par le supercondensateur d'une autre capacité C2 à travers la résistance R2.



**Figure II. 5 :** Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F

**II.1.2.1.2.1. Identification de R2**

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 :

$$i(0) = \frac{V_f}{R_2} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

$$i(0) = -C_1 \frac{dV_t}{dt}(t(0)) \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

Pour le calcul de R2, on réalise l'approximation que la pente initiale observée sur  $V_t(t)$  est égale à  $\frac{\Delta V}{dt}$ , et on évalue le terme  $i(0)$  et C1 pour le niveau médian de tension, à savoir (Figure5)  $V_f - \frac{\Delta V}{2}$  de sorte que R2 s'exprime par :

$$R_2 = \frac{V_f - \Delta V/2}{C_1(V_f - \Delta v/2)} * \frac{\Delta t}{\Delta V} \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

**II.1.2.1.2.2. Identification de C2**

La capacité C2 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  $V_t$  et  $V_2$  aux bornes des capacités C1 et C2 sont alors supposées à une même valeur  $V_3$  et l'équation de conservation de la charge stockée permet d'établir l'expression de C2 en fonction de  $Q_{tot}$  et  $V_3$ . Ainsi on détermine C2 pour un composant complètement déchargé par la relation suivante (Figure II.5):

$$C_2 = \frac{Q_{tot}}{V_3} - (C_0 + \frac{1}{2}K_V \cdot V_3) \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

**II.1.2.2. 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.

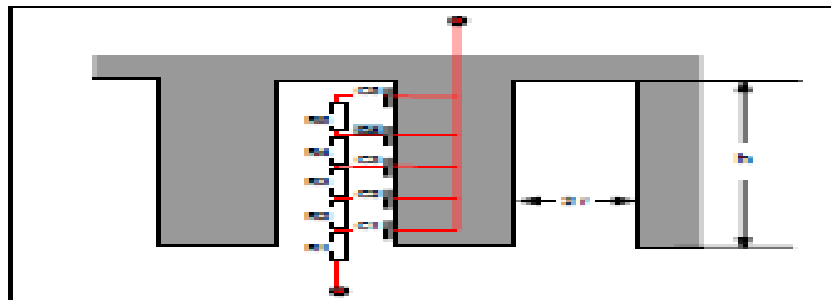
Les auteurs de la référence [20] ont montré les limites du modèle à deux branches sur des intervalles de charges et de décharges très courts et aussi pour des courants différents de celui de la modélisation. Il est montré que la capacité du supercondensateur est fortement dépendante d'autres paramètres et notamment des phases transitoires comme le phénomène de redistribution des charges internes.



### II.1.3. 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 [21]. 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 15. 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 sont droits et cylindriques de diamètre uniforme et l'électrode est un conducteur parfait.[22]



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

Le modèle équivalent utilisé pour rendre compte de cette dépendance est la ligne de transmission présentée dans la Figure 15. 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 :

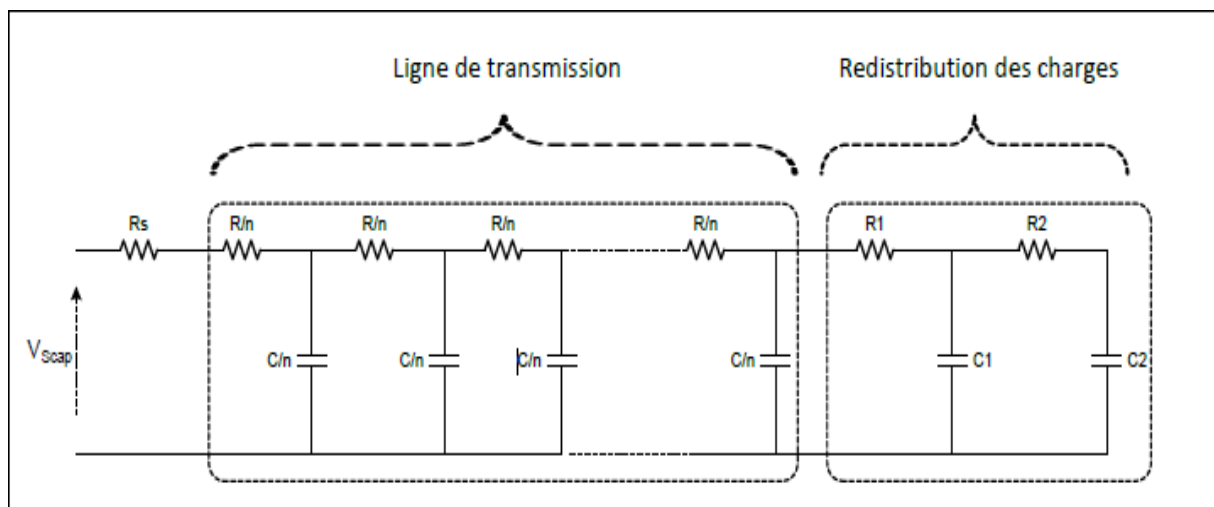
$$z(\omega) = R_w \frac{\coth \sqrt{jC\omega R_w}}{\sqrt{jC\omega R_w}} \dots \dots \dots (II.17)$$

$$R_w = \frac{h}{3\pi n K r^2} \dots \dots \dots (II.18)$$

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

#### II.1.4. 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 [21], [22] 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. 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 :

$$C_i = \frac{C}{n} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

$$R_i = \frac{R}{n} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

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.1.5. Modèle fréquentiel de Buller

Les auteurs de la référence [24] 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 8). Le courant obtenu permet d'établir une loi de variation de l'impédance du supercondensateur en fonction de la fréquence. Le modèle fréquentiel du supercondensateur est décrit par une résistance en série avec une Impédance.

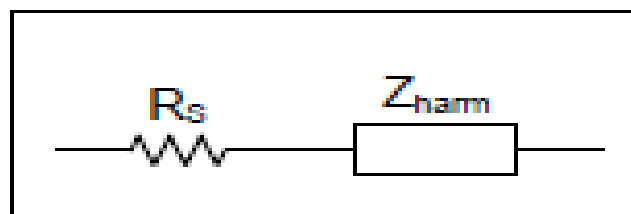


Figure II.8 : Circuit de base du modèle fréquentiel

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

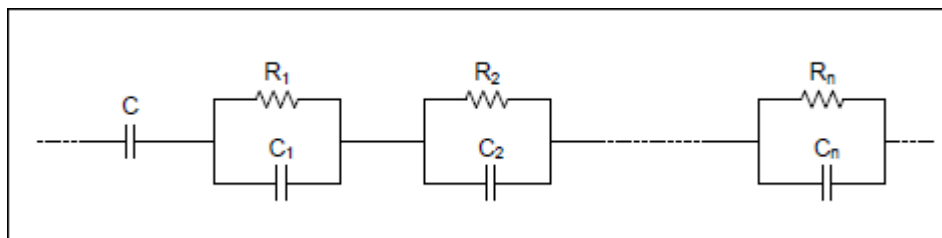
$$Z_{harm}(i\omega) = \tau \cdot \frac{\coth\sqrt{j\omega\tau}}{C\sqrt{j\omega\tau}} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

Avec :  $\tau = RW \cdot C$

La transformée de Laplace de cette impédance s'écrit :

$$Z_{harm} = R_w \frac{\coth\sqrt{pR_wC}}{\sqrt{pR_wC}} \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

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



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

Telle que :

$$R_n = \frac{2 \cdot R_w}{n^2 \pi^2} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

$$C_n = \frac{C}{2} \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

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 [25] en basse fréquence l'écart est relativement important.

Le modèle sous Matlab-simulink :

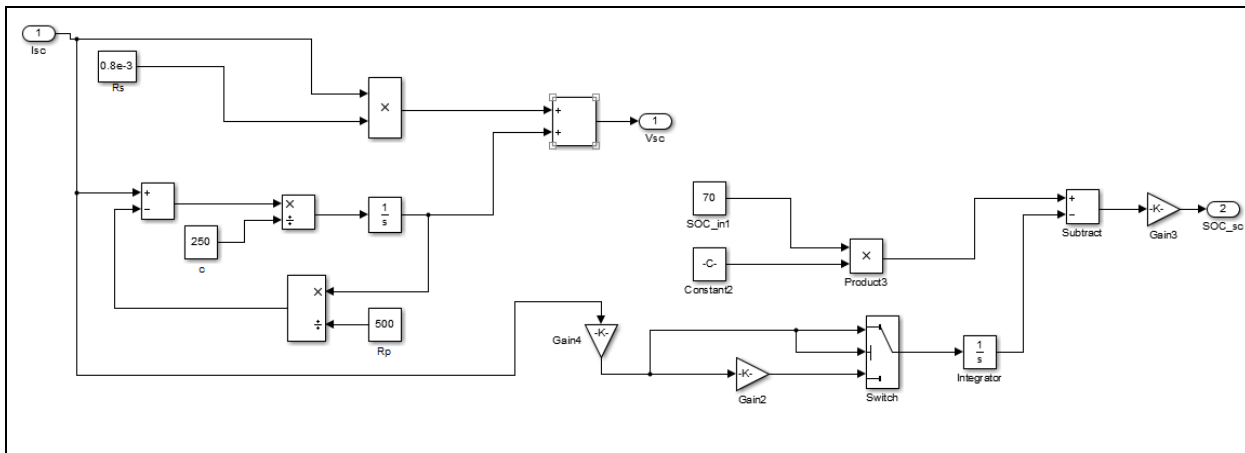


Figure II.10 : Modèle de super-condensateur sur Matlab-simulink

Résultat obtenu pour un échelon :

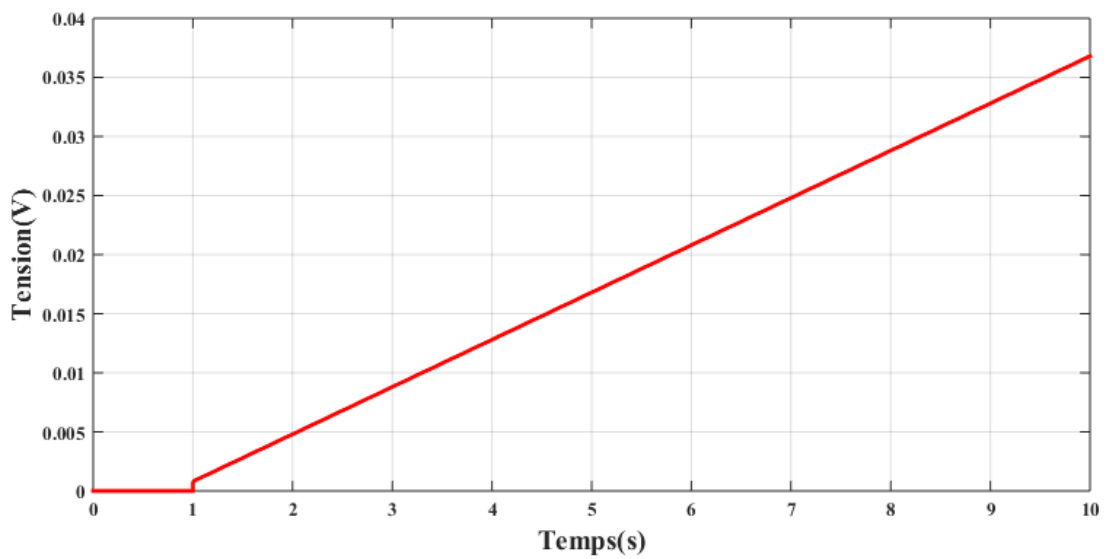


Figure II.11 : Tension supercondensateur

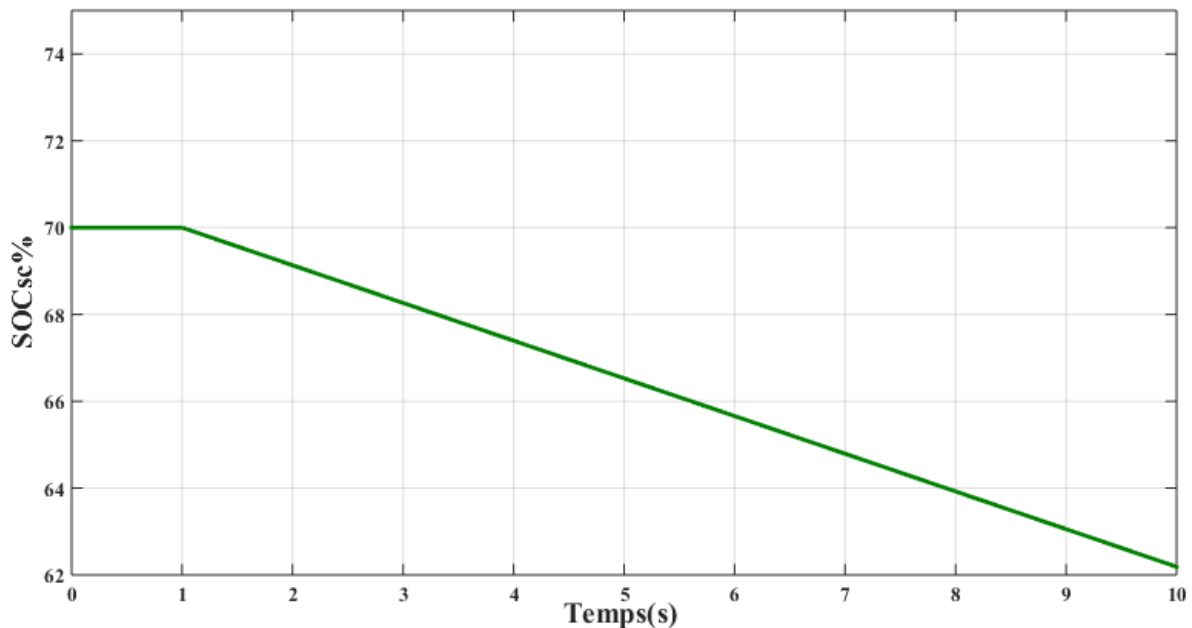


Figure II.12 : SOC du supercondensateur

## II.2. Intérêt et l'usage des supercondensateurs [1]

Les supercondensateurs sont des systèmes de puissance, ils sont donc utilisés lorsqu'il est nécessaire de fournir un pic de puissance sur une période courte, typiquement quelques secondes. Les batteries possèdent une grande densité d'énergie (10-100 Wh.kg<sup>-1</sup>) mais une faible densité de puissance ( $\leq 10$  kW.kg<sup>-1</sup>), A l'opposée, les condensateurs diélectriques possèdent de grandes densités de puissance ( $\gg 10^5$  W.kg<sup>-1</sup>), mais de faibles densités d'énergie (<10<sup>-1</sup> Wh.kg<sup>-1</sup>). Les supercondensateurs se placent entre ces deux types de systèmes, aussi bien en termes d'énergie (1-10 Wh.kg<sup>-1</sup>) que de puissance (1-20 kW.kg<sup>-1</sup>). Contrairement aux batteries qui fournissent de l'énergie sur une longue durée (plusieurs heures), les supercondensateurs délivrent des forts pics d'énergie en des temps très courts (plusieurs secondes à quelques minutes). Ils possèdent une plus grande durée de vie (plus de 1 000 000 cycles) que les batteries (quelques milliers de cycles), un rendement énergétique supérieur (de l'ordre de 95 % alors qu'il est inférieur à 80 % pour les batteries) et se rechargent plus rapidement (quelques secondes pour un supercondensateur contre quelques heures pour une batterie). Ces systèmes peuvent aussi être utilisés dans des conditions climatiques

extrêmes, Ils peuvent donc être utilisés pour stocker l'énergie récupérée lors du freinage dans les véhicules et les équipements industriels et la fournir de façon efficace en fonction des besoins. Ils sont également utilisés en tant que tampon de puissance : ils délivrent de la puissance lorsque le générateur fournit une puissance plus basse que la moyenne et la stockent lorsque ce dernier fournit une puissance plus haute que la moyenne (téléphonie mobile).

Un tableau comparatif permet de comparer les fonctionnalités des supercondensateurs avec quelque dispositif de stockage [17] .

**Tableau II.1** : comparaison entre divers dispositif de stockage

	Condensateur classique	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	1 heure < t < 5 heures
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	0.3 heure < 3heures
Rendement Charge/décharge	>95%	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/Kg)	$> 10^5$	$10^4$	$< 10^3$
Densité d' énergie (Wh/kg)	Entre $10^{-3}$ et $100^{-1}$	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	$10^{10}$	$10^6$	$10^3$

## Conclusion :

Dans ce chapitre on a identifié supercondensateur dans le Modèle à constantes réparties de Belhachemi et le Modèle fréquentiel de Buller qui sont les plus approprié pour notre application sur le véhicule électrique.

Le modèle de Buller qui représente fidèlement le comportement du supercondensateur rechercher.

Le prochain chapitre en va dimensionner et modéliser le supercondensateur et on va appliquer cette dernière au véhicule électrique.



## ***Chapitre III***

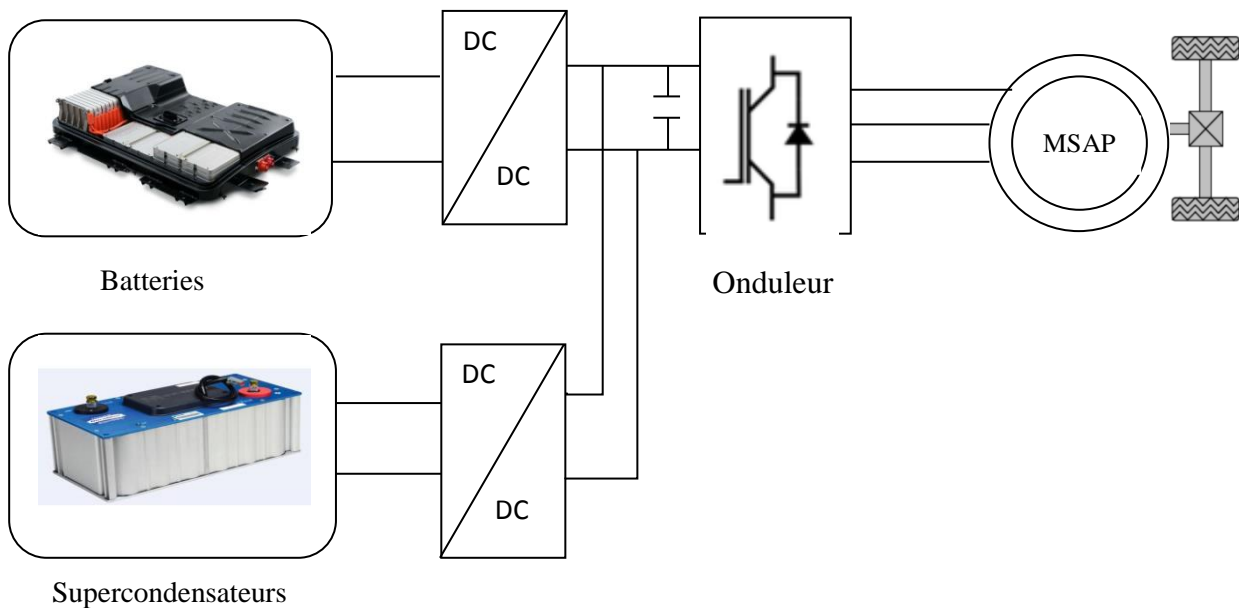
***Application des supercondensateurs dans le véhicule électrique***





## Introduction :

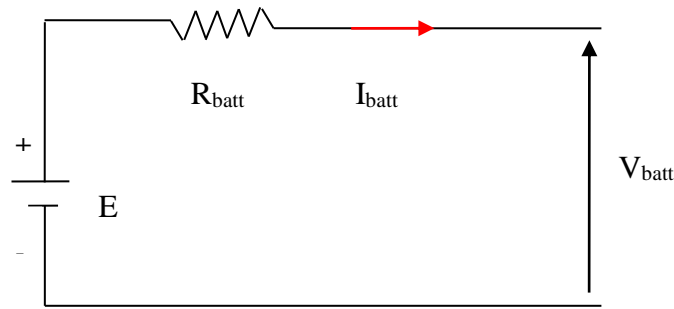
Le secteur de transport l'un des domaines les plus importants qui utilise les supercondensateurs comme une source secondaire pour leurs intérêts important dans la traction électrique, dans ce chapitre nous présentons les éléments qui constituent notre système étudié, qui contient deux sources d'énergies (batteries et supercondensateur), convertisseurs d'électroniques de puissance, et une machine synchrone a aimant permanent (MSAP).



**Figure III.1** schéma équivalent du système étudié.

### III.1 Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur le modèle dit «CIEMAT» relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure III.1) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.



**Figure. III.2** schéma électrique équivalent de la batterie

Dans ce modèle, pour  $n_b$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = n_b E_b n_b \pm R_{batt} I_{batt} \dots \dots \dots (III.1)$$

Ou  $V_{batt}$  et  $I_{batt}$  sont la tension et le courant de la batterie,  $E_{batt}$  est la f.e.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et  $R_{batt}$  sa résistance interne c.

**a. Modélisation de Capacité  $C_{batt}$  :**

Le modèle de la capacité  $C_{bat}$  donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge  $I_{batt,moy}$ . Cette capacité est donnée par l'équation

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 * \left(\frac{I_{batt,moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005 \Delta T) \dots \dots \dots (III.2)$$

Avec :

**I<sub>10</sub>**: Courant nominal de la batterie (en A) donne par le constructeur ;

**C<sub>10</sub>**: Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 \times I_{10} \dots \dots \dots (III.3)$$

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité  $C_{batt}$  et de la quantité de charge manquante à la batterie  $Q_m$ . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par ( $Q_m$ ):

$$Q_m = I_{batt} \times 10 \dots \dots \dots (III.4)$$

Outestladuréedefonctionnementdelabatterieavecuncourant $I_{bat}$ .L'expressiondel'état de

charge de la batterie EDC est donnée par (III.5):

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{batt}} \dots \dots \dots (III. 5)$$

**a.1 Equations de la tension de décharge :**

En régime de décharge, la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (III.6) et (III.7)

$$E_{b\_déch} = 1.965 + 0.12 EDC \dots \dots \dots (III.6)$$

$$R_{b\_dech} = R_{batt} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \dots \dots \dots (III.7)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat\_déch} = n_b E_{b\_déch} - n_b R_{b\_dech} |I_{batt}| \dots \dots \dots (III. 8)$$

$$V_{bat\_déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{|I_{batt}|}{c_{10}} \left( \frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \dots \dots \dots (III.9)$$

**a.2 Equations de la tension de charge**

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (III.10) et (III.11)

$$E_{b\_char} = 2 + 0.16 EDC \dots \dots \dots (III.10)$$

$$R_{b\_char} = R_b = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1+(I_{batt})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \dots \dots \dots (III.11)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge

$$V_{bat\_char} = n_b E_{b\_char} + n_b R_{b\_char} I_{batt} \dots \dots \dots (III.12)$$

$$V_{b\_char} = n[2 + 0.16EDC] + n \frac{I_{bat}}{I_{10}} \left( \frac{6}{1+(I_{batt})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \dots (III.13)$$

### III.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) [27]

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

#### a. Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (figure.III.3). Son application typique

est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieur.

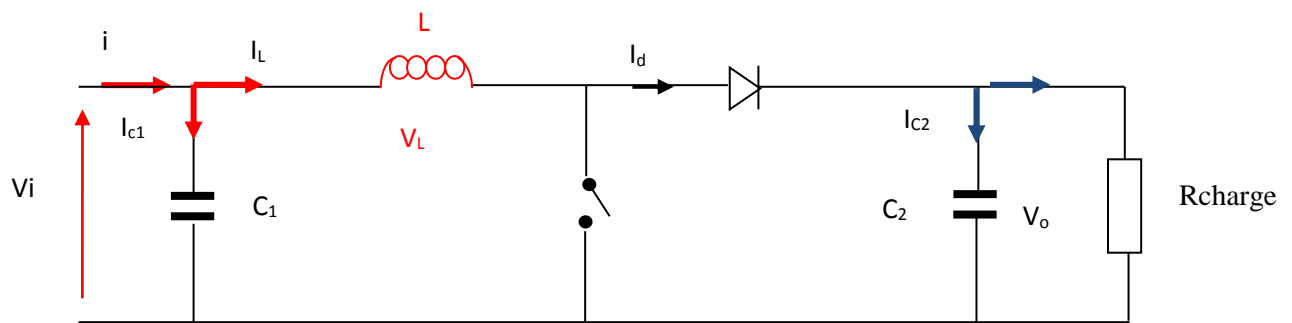


Figure.III.3 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure III.4) des deux phases de fonctionnement donne :

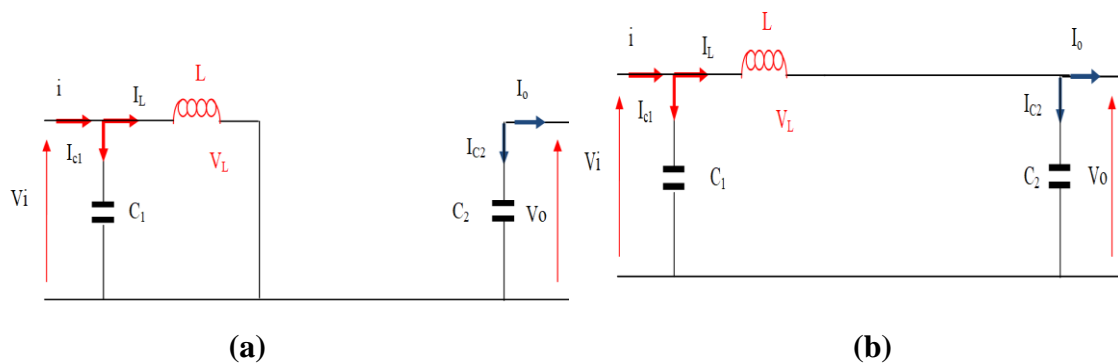


Fig.III.4 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période d.Ts

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_1(t) \end{cases} \dots\dots\dots(III.14)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

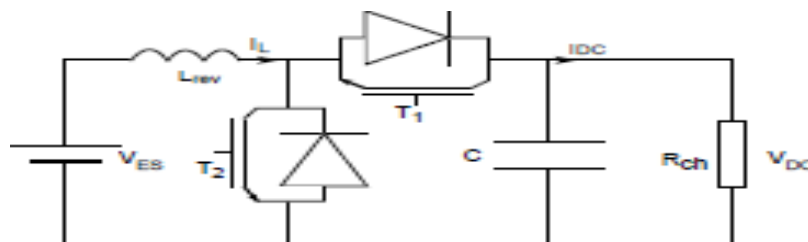
$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_1(t) - V_0(t) \end{cases} \dots\dots\dots(III.15)$$

En appliquant ces relations sur les systèmes d'équations, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L = i_1 - C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} \\ i_0 - C_2 \frac{dV_1(t)}{dt} \\ V_1 = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_0 \end{cases} \dots\dots\dots(III.16)$$

**b. Hacheur parallèle réversible en courant [31]**

Le convertisseur de puissance est nécessaire comme interface entre les sources secondaire d'énergie électrique et le bus continu. L'intérêt d'utiliser ce type d'interface est d'adapter les niveaux de tension des sources au bus continu. En outre, celui-ci contrôle l'énergie fournie ou absorbée par les sources en fonction de la stratégie de gestion d'énergie choisie. Le convertisseur doit être donc réversible en courant



**Figure.III.5 :** Hacheur parallèle réversible en courant

Le comportement du hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par les équations suivantes :

$$L_{rev} \frac{di_L}{dt} = v_{ES} - U_{rev} * V_{DC} \dots \dots \dots (III.17)$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_L * u_{rev} - \frac{V_{DC}}{r} - i_{DC} \dots \dots \dots (III.18)$$

Où :  $L_{rev}$  est l'inductance du hacheur réversible est,  $i_L$  et  $V_{EC}$  sont le courant et la tension de l'élément de stockage (la batterie).  $R$  une résistance connecte en parallèle au bus DC qui représente des divers pertes. Notons aussi que la commutation des transistors est complémentaire :  $u_{rev}$  est l'ordre de commande du transistor  $T_1$  elle du transistor  $T_2$ . On obtient le modèle moyen en substituant  $u_{rev}$  avec  $\alpha_{rev}$ .

### III.3 Modélisation de la MSAP [32]

La MSAP est régi par 3 types d'équations : équation magnétique (relation entre flux et courants) ; équation électrique (relation entre courants et tensions) et équation mécanique (conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique). Nous présentons ces équations d'abord dans le repère triphasé lié au stator et ensuite dans le repère diphasé de Park dans le but de simplifier leur formulation.

#### a. Modélisation dans le repère triphasé

##### a.1 Equations Magnétiques

Le flux total produit au stator  $\Phi_s$  est la somme du flux propre créé au stator par les courants  $i_i$  traversant les enroulements statoriques et du flux produit par le rotor :

$[\Phi_{ss}] = [\Phi_{ss}] + [\Phi_{sf}]$ . Le flux propre produit dans les enroulements statoriques s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[\Phi_{SS}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.19)$$

Où  $[\Phi_{is}]$  est le flux totalisé induit dans l'enroulement statorique  $i$ ,  $L_{ii}$  est l'inductance propre de la phase statorique  $i$ , et  $M_{ij}$  est l'inductance mutuelle entre les phases statoriques  $i$  et  $j$ .

Dans les machines à pôles saillants, la matrice des inductances est fonction de l'angle électrique  $P\theta$  où  $p$  est le nombre de paires de pôles et est  $\theta$  la position mécanique du rotor. Ces inductances s'écrivent au sens de la théorie du premier harmonique :

$$\begin{cases} L_{aa} = L_0 + L_2 \cos(2p\theta) & M_{ab} = M_{ba} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{bb} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bc} = M_{cb} = M_0 + L_2 \cos(2p\theta) \\ L_{cc} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{ac} = M_{ca} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \dots\dots\dots(III.20)$$

Dans le cas où la machine est sans saillance, nous remplaçons l'inductance  $L_2$  par zéro et, compte tenu que la somme des courants statorique est nulle à tout instant, nous aurons :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.21)$$

Où  $L=L_0-M_0$ : l'inductance cyclique des enroulements statoriques. Si nous notons  $\phi_f$  le flux maximal produit par le rotor dans un enroulement du stator, le flux créé au stator par le rotor s'écrira comme suit:

$$[\phi_{sf}] = \begin{bmatrix} \phi_{af} \\ \phi_{bf} \\ \phi_{cf} \end{bmatrix} = \phi_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.22)$$

**a.1 Équation électrique**

Les enroulements des trois phases étant fixes, la rotation de l'aimant (inducteur) plonge les enroulements dans un champ d'induction variable et provoque l'apparition d'une tension induite de mouvement (fem.) aux bornes de chaque phase, à laquelle se superposent les tensions induites de transformation par les inductances des phases. La tension induite  $e_i$  dans la phase  $i$  est donnée par la variation du flux totalisé correspondant. Dans le cas où le moteur est sans saillance les tensions aux bornes des trois phases statoriques s'écrivent selon la loi d'Ohm:

$$\begin{cases} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a e_a = \Omega p \phi_f \sin(p\theta) \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b e_a = \Omega p \phi_f + \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c e_a = \Omega p \phi_f + \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \dots\dots\dots(III.23)$$

Où  $v_i$ ,  $i_i$ , et  $e_i$  sont la tension, le courant et la f.é.m. dans la phase  $i$ .  $R$  et  $L$  sont la résistance et  $L'$  inductance cyclique par phase,  $p$  est le nombre de paires de pôles.  $\Omega$  et  $\theta$  sont respectivement la vitesse et la position mécaniques.

**a.2 Equation Mécanique**

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est régie par la relation suivante déduite du théorème des moments :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega \dots\dots\dots(III.24)$$

Où  $J$  est l'inertie du rotor, la vitesse mécanique de rotation du rotor,  $C_m$  le couple moteur fourni par le stator,  $C_r$  le couple résistant de la charge et  $f_v$  le coefficient de frottement visqueux.

L'expression de  $C_m$  est obtenue à partir d'un bilan énergétique faisant apparaître la puissance électromagnétique  $P_m = \sum_{i \in \{a,b,c\}} e_i i_i$  transformée en puissance mécanique  $C_m$ . Ainsi :

$$C_m = \frac{1}{\Omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \dots\dots\dots(III.25)$$

Dans le cas où la machine est sans saillance l'expression du couple se simplifie et sera :

$$C_m = -p \phi_f [i_a \sin(p\theta) + i_b \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] \dots\dots\dots(III.26)$$

Le modèle des machines électriques dans un repère conventionnel (a, b, c) s'écrit en fonction des paramètres qui sont variables dans le temps.

Cette circonstance compliquerait considérablement l'étude des régimes transitoires des machines ainsi que l'élaboration des lois de commande. Pour remédier à ce problème, nous opérons un changement de variables sur l'ensemble des grandeurs. Ce changement consiste à



rapporter les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires notés d et q (repère diphasé de Park). Ceci conduit à la simplification du modèle.

**b. Mise en équation de la MSAP en diphasé**

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu la non linéarité des systèmes d'équations. On utilise alors une transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants qui s'appelle transformation de Park.

**b.1 Modélisation dans le repère diphasé (d,q )**

Le repère de Park est un repère tournant avec le rotor. Il est composé de deux axes perpendiculaires : axe direct « d » et axe en quadrature « q ». La transformation du repère (a,b,c) au repère de Park est possible grâce à une matrice de passage P(θ) où θ est l'angle entre les deux axes a et d:

$$p(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.27)$$

Equations Magnétiques	Equations Mécaniques	Equations Electriques
$\Phi_d = L_d i_d + \Phi_f$	$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega$	$V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega L_q$
$\Phi_q = L_q i_q$	$C_m = \frac{3}{2} p i_q (\Phi_f - (L_d - L_q) i_d)$	$V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\Omega L_d i_d + P\Omega_f$

Où  $L_d = L + 3/2 L_2$ ;  $L_q = L - 3/2 L_2$ . Ainsi, pour les moteurs sans saillance on a  $L_d = L_q = L$

**III.4 Opération de commande du MSAP[33]**

**a-Commande Vectorielle**

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d’une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans le repère de Park (d,q). La composante d’axe d du courant statorique joue le rôle de l’excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d’axe q joue le rôle du courant d’induit et permet de contrôler le couple.

La stratégie consiste ainsi à imposer le courant iq à une valeur correspondant au couple Cm souhaité tout en maintenant nul le courant id et ceci pour travailler à couple maximal. La régulation de la vitesse se fait en cascade en imposant la valeur souhaitée de la vitesse sur la voie q. Dans la suite on considèrera que  $L_d = L_q = L$ .

**a.1 Contrôle du courant**

En faisant appel aux équations électriques du MSAP établies dans le repère de Park, on remarque que les équations de vd et vq sont couplées, on est donc amené à implanter un découplage qui consiste à l’introduction des termes de compensation ed et eq. On aura alors de nouvelles variables de commande vd\* et vq\* telles que chaque variable n'agisse que sur une seule des deux composantes du courant statorique (id ou iq). Dans ce cas, le système devient linéaire et simple à commander.

$$V_d^* = V_d + e_q = R_{id} + L_d \frac{did}{dt} \dots\dots\dots (III.28)$$

$$V_q^* = V_q + e_d = R_{iq} + L_q \frac{diq}{dt} \dots\dots\dots (III.29)$$

Puisque la dynamique du courant, selon les axes d et q, est un premier ordre, il est judicieux de choisir un correcteur de type proportionnel intégral de fonction de transfert:

$$G_{pi}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \dots\dots\dots (III.30)$$

De plus, si  $L_d = L_q$  nous pouvons imposer les mêmes paramètres des régulateurs. Ainsi, les schémas bloc de la régulation des courants id et iq seront les suivants :

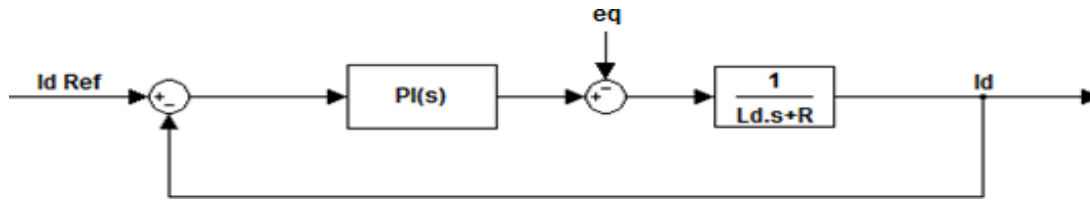


Figure III.6 : Schéma bloc de la régulation de Id

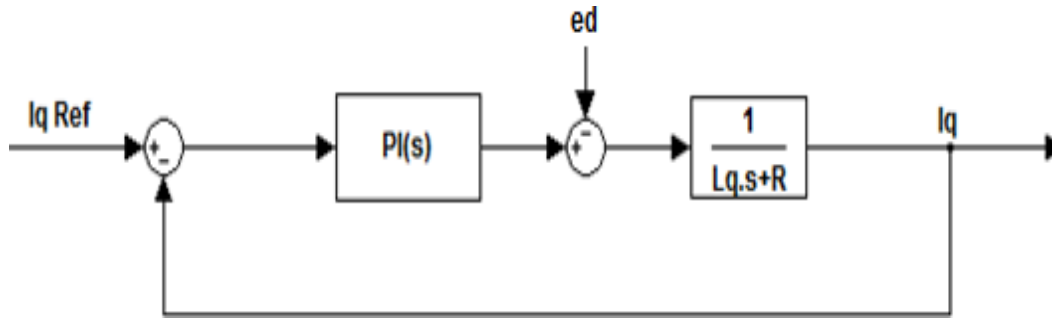


Figure III.7 : Schéma bloc de la régulation de Iq.

Ainsi, la fonction de transfert en boucle fermée de courant s'écrit pour les deux voies

$$GBFi(p) = \frac{\frac{k_p}{k_i}p+1}{\frac{L}{k_i}p^2 + \frac{R+k_p}{k_i}p+1} = \frac{\frac{K_p}{K_i}p+1}{\frac{1}{\omega_{bp,i}^2}p^2 + \frac{2\xi}{\omega_{bp,i}}p+1} \dots\dots\dots(III.31)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2<sup>nd</sup> ordre caractérisée par  $\xi, \omega_{bp,i}$ . Les gains des régulateurs s'expriment en fonction de  $\xi, \omega_{bp,i}$  et des paramètres électriques:

$$K_p = 2L\xi\omega_{bp,i} - RetK_i = L\omega_{bp,i}^2 \dots\dots\dots(III.32)$$

Par un placement judicieux des pôles de cette fonction de transfert nous pouvons obtenir la dynamique de courant souhaitée ( $\omega_{bp,i}$  pour déterminer la bande passante souhaitée et  $\xi$  pour le dépassement).

**a.2 Contrôle de la vitesse**

Une fois la régulation de la boucle de courant validée, il est alors possible de mettre en place, en cascade, la boucle de vitesse souhaitée. La possibilité de mise en cascade se justifie par le fait que les constantes de temps électriques et mécaniques ont un rapport

supérieur à 10 (cas de la majorité des moteurs électriques).

Le modèle mécanique s'écrit en faisant appel à l'équation mécanique :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega, \text{ avec} \dots \dots \dots (III.33)$$

$$C_m = \frac{3}{2} P \Phi_F I_q = \frac{3}{2} K_e i_q^* \dots \dots \dots (III.34)$$

Ainsi, un correcteur de type PI suffit pour établir la boucle de vitesse avec la dynamique souhaitée.

En considérant le courant parfaitement régulé, la boucle de courant sera équivalente à un gain unitaire et la fonction de transfert de la boucle de vitesse s'écrit :

$$GBF_{v(p)} = \frac{\frac{K_p P+1}{K_i}}{\frac{J}{\frac{3}{2}K_e K_i} P^2 + \frac{f_v + K_i}{\frac{3}{2}K_e K_i} P + 1} = \frac{\frac{K_p P+1}{K_i}}{\frac{1}{\omega_{bp\_v}^2} P^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_{bp\_v}} P + 1} \dots \dots \dots (III.35)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2nd ordre caractérisée par  $\xi$ ,  $\omega_{bp\_v}$  et les gains du régulateur de vitesse s'écrivent en fonction de  $\xi$ ,  $\omega_{bp\_v}$  et les paramètres mécaniques :

$$K_p = \frac{2}{3K_e} (2J\varepsilon\omega_{bp\_v}^2 - f_v) \text{ et } K_i = \frac{2}{3K_e} J\Omega\omega_{bp\_v}^2 \dots \dots \dots (III.36)$$

On choisit une bande passante  $\omega_{bp\_v}$  pour la boucle de vitesse au moins 10 fois inférieure à celle de la boucle de courant pour que la mise en cascade soit toujours valide

### III.5 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur de nos jours très largement utilisé dans les systèmes d'entraînement industriels, en premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation des convertisseurs statique de plus en plus performants .En second lieu, l'évolution des techniques numériques et de commandes ,On distingue plusieurs types d'onduleur:

- a) Selon la source:
  - Onduleur de tension
  - Onduleur de courant.
- b) Selon le nombre de phase (monophasé, triphasé,etc...).

### a. L'onduleur de tension

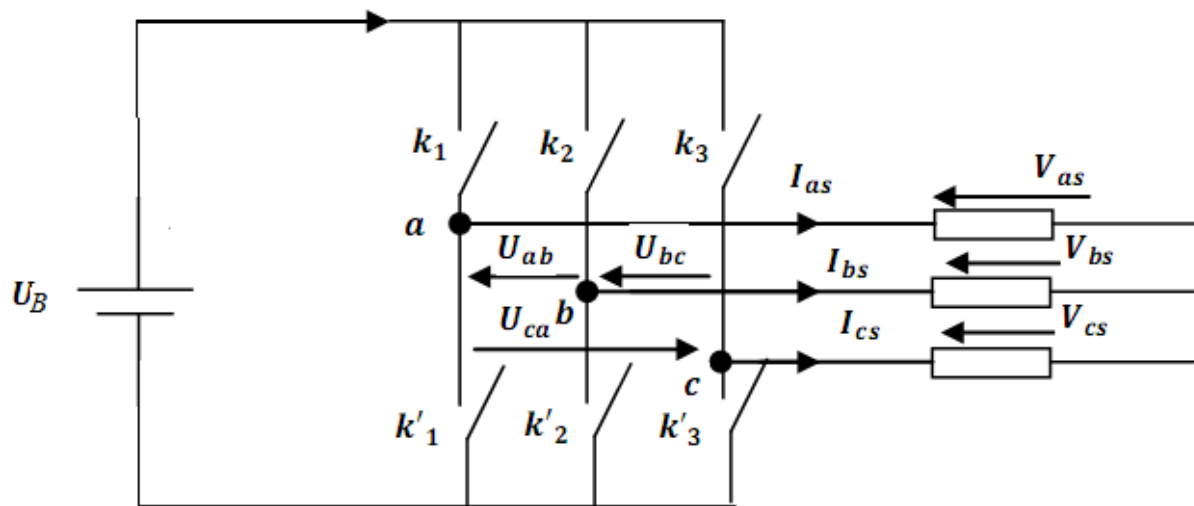
L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tension d'amplitudes et de fréquences variables.

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la (Fig.II.17), où  $K_i$  et  $K'_i$  ( $i=a, b, c$ ) sont des transistors IGBT,  $S_i$  et  $S'_i$  sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que:

· si  $S_i = 1$ , l'interrupteur  $K_i$  est passant et  $K'_i$  est ouvert,

si  $S'_i = 0$ , l'interrupteur  $K_i$  est ouvert et  $K'_i$  est passant.



**Figure III.8** Schéma d'un onduleur de tension

L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération.

Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la (figure III.8). La machine synchrone à aimant permanent est connectée en étoile,  $V_{bus}$  est la tension continue alimentant l'onduleur de tension. Les tensions de ligne délivrées par l'onduleur sont:

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_B \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_B \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ac} = V_{cs} - V_{as} = U_B \cdot (S_c - S_a) \end{cases} \dots \dots \dots (III.37)$$

Les tensions  $V_{as} V_{bs} V_{cs}$  forment un système de tension triphasé équilibré alors:

On trouve

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_c - S_b - S_a) \end{cases} \dots \dots \dots (III.38)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_B \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.39)$$

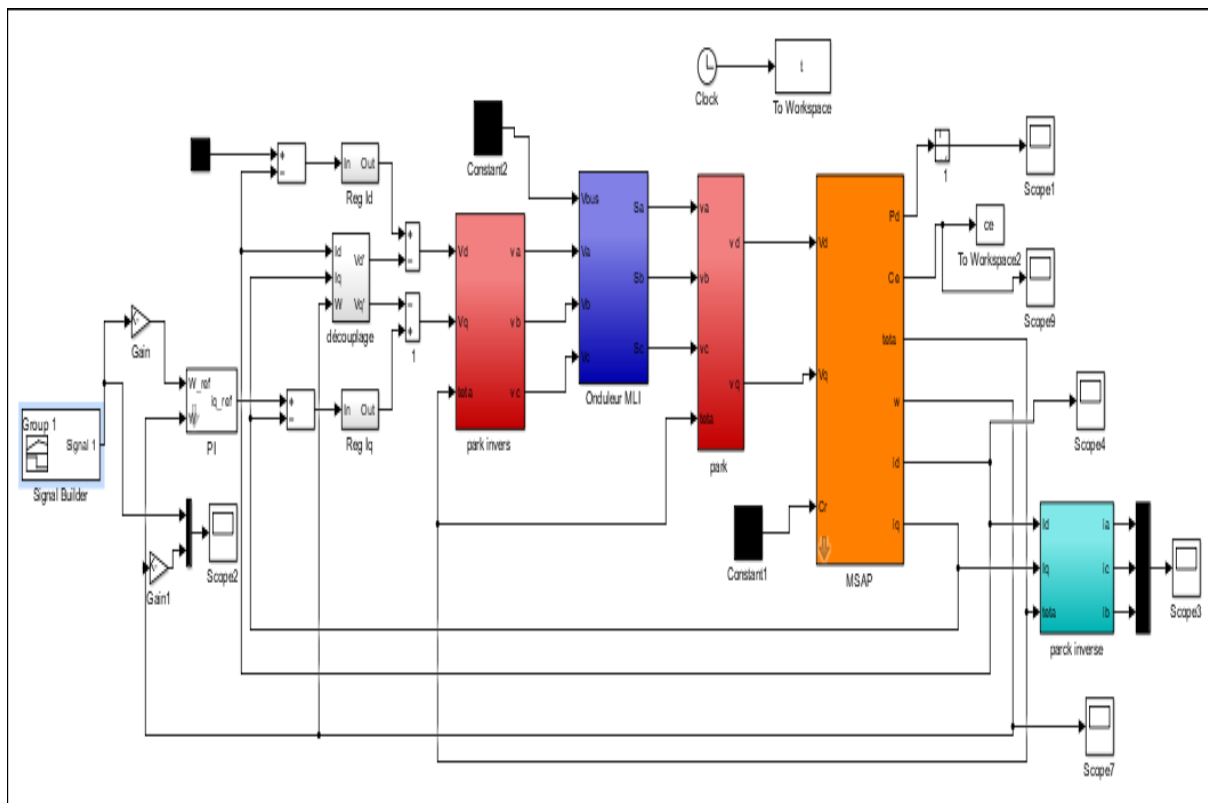
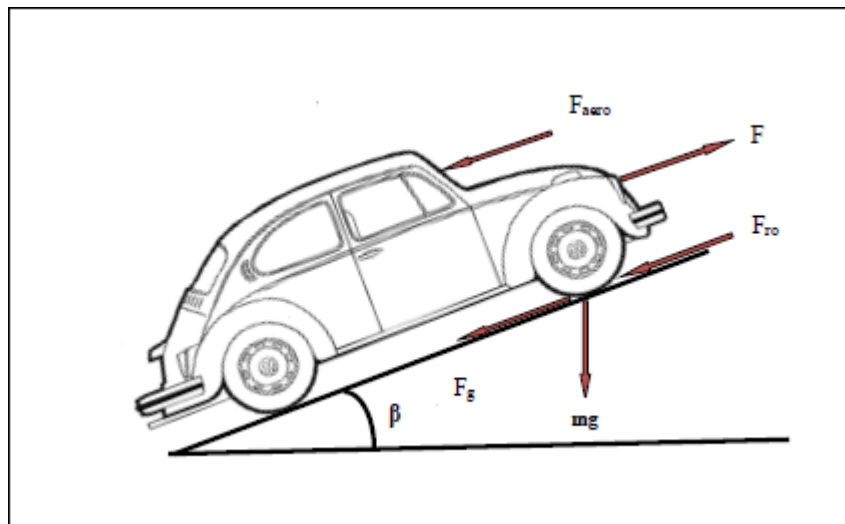


Figure III.9 : Schéma bloc de la MSAP avec commande vectorielle

### III.6 Modélisation du véhicule électrique

Le véhicule électrique est un système complexe, constitué de composant très variés et de nature différente (mécanique, électrique, électrochimique...). Afin de pouvoir modéliser le véhicule électrique, il faut déterminer le bilan des efforts appliqués au véhicule. Les équations utilisées sont directement issues des théories de la mécanique et de l'aérodynamique. Elles sont applicables à des véhicules routiers à quatre roues à traction. Dans notre travail, nous examinons un modèle de véhicule électrique-hybride de type sous Matlab/Simulink, en utilisant les positions de la pédale (accélérations /décélérations) déduites du cycle de conduite, comme signal d'entrée principale. La simulation illustre le flux d'énergie et sa distribution en vertu des différents modes de fonctionnement du véhicule hybride.



**Figure III.10 :** Représentation des forces agissant sur le véhicule

Nous avons trois principales forces : [34-35]

➤ Force de résistance au roulement ( $F_{ro}$ ) due principalement à de la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Elle est donnée par la relation :

$$F_{ro} = mgf_{ro} \cos(\beta) \dots\dots\dots (III.40)$$

➤ Force résistante à la pénétration dans l'air ( $F_{aero}$ ) engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carcasse du véhicule en se déplaçant. Son expression est

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_f C_d V_e^2 \dots\dots\dots(III.41)$$

➤ Force résistante due à la pente à gravir ( $F_g$ ) qui est proportionnelle à la masse  $m$  du véhicule et dépend de la pente de la route. Son expression est donnée par la relation qui suit :

$$F_g = mg \sin(\beta) \dots\dots\dots(III.42)$$

Avec :

- m**: la masse totale du véhicule en [kg] ;
- g**: la gravité en [m/s<sup>2</sup>] ;
- f<sub>ro</sub>**: la constante de la force de résistance due au déplacement ;
- $\rho_{air}$**  : la densité de l'air en [kg/m<sup>3</sup>] ;
- A<sub>f</sub>**: la surface frontale du véhicule [m<sup>2</sup>] ;
- C<sub>d</sub>**: le coefficient de trainée aérodynamique ;
- V<sub>e</sub>**: la vitesse du véhicule en [m/s] ;
- $\beta$**  : l'angle de pente de la route en [rad].

La force résistive totale est donnée par la formule suivante :

$$F_r = F_g + F_{aero} + F_{ro} \dots\dots\dots(III.43)$$

Le moteur électrique assure la force de traction du véhicule  $F$  électrique. L'équation du mouvement est alors donné par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r \dots\dots\dots(III.44)$$

La force ( $F-F_r$ ) accélère (respectivement décélère) le véhicule si la différence est positive (respectivement négative).

La puissance mécanique du véhicule électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P_v = F_r * V_e \dots\dots\dots(III.45)$$

En fin, le couple du moteur est donné par l'expression suivante

$$T_r = F_r \frac{r}{G_r} \dots\dots\dots(III.46)$$

Où  $r$  est le rayon de la roue et  $G_r$  représente le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe.



Ce modèle représente l'aérodynamique du véhicule. Il illustre les principales forces dynamiques exercées sur le véhicule. Le couple de charge résultant sera appliqué à la machine synchrone à aimant permanent

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties de notre système étudié, à savoir la source d'énergie électrique ; batterie et supercondensateur, les différents convertisseurs d'électronique de puissance (hacheur boosté) ainsi que le modèle du véhicule électrique avec son moteur (MSAP). Nous avons aussi présenté la commande vectorielle ainsi que l'onduleur utilisé.

Dans le chapitre suivant nous allons voir les résultats de notre simulation.



***Chapitre IV***  
***Résultats de simulation***



## Introduction

A l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans le chapitre 3 pour les différents éléments de l'application du supercondensateur dans le véhicule électrique, nous allons tracer les différents résultats de la simulation et la gestion d'énergies dans les différentes parties du montage.

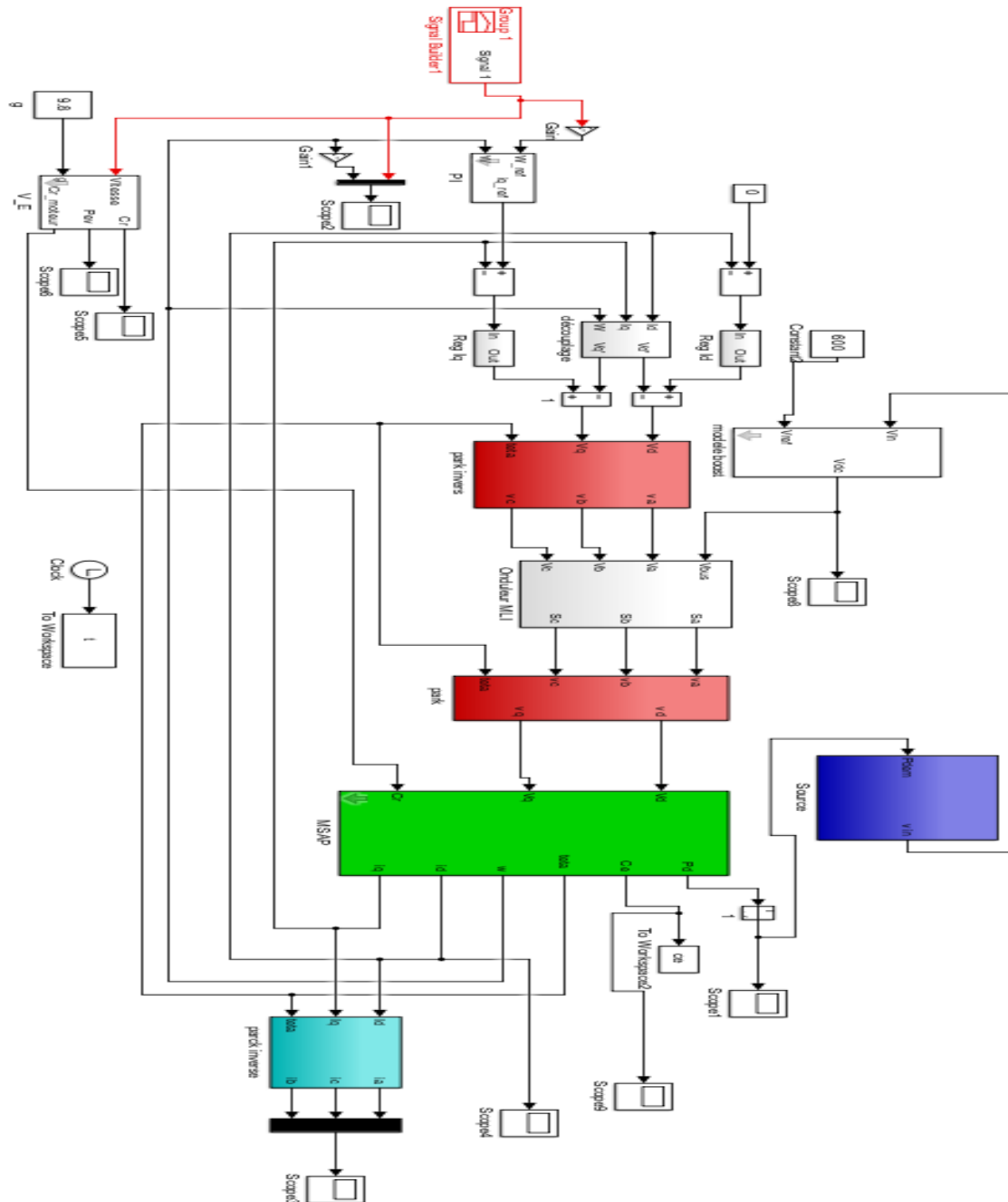


Figure IV.1 : Schéma globale de simulation

## IV.1 Dimensionnement des éléments du système étudié :

### IV.1.1 Caractéristiques du véhicule :

$N=1300\text{kg}$
$A_f=2.6\text{N}^2$
$f_{ro} = 0.01\text{N m}$
$C_d = 0.25$
$q_{\text{air}}=1.2\text{kg}/\text{N}^2$

**Tableau IV.1 :** principales caractéristiques du VEH

### IV.1.2 Dimensionnement des supercondensateurs

Les super condensateurs constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule. On utilise un super condensateur de 48V d'une capacité de 83F .La puissance nominale et la puissance maximale des super condensateurs sont calculés comme suivant : [31]

$$P_n = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times mass} = \frac{0.12 \times (48)^2}{(10 \times 10^{-3}) \times (10.3 \times 10^3)} = 2.68\text{kW}$$

$$P_{max} = \frac{v^2}{4 \times ESR_{dc} \times mass} = \frac{48^2}{(4 \times (10 \times 10^{-3}) \times (10.3 \times 10^3))} = 5.6\text{kW}$$

**DATASHEET**    **48V MODULES**

**FEATURES AND BENEFITS\***

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 48V DC working voltage
- Active cell balancing
- Temperature output
- Overvoltage outputs available
- High power density

**TYPICAL APPLICATIONS**

- Hybrid vehicles
- Rail
- Heavy industrial equipment
- UPS systems



**PRODUCT SPECIFICATIONS**

ELECTRICAL	BMOD0083 P048 B01	BMOD0165 P048 BXX
Rated Capacitance <sup>1</sup>	83 F	165 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	83 F	165 F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	100 F	200 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> , initial <sup>1</sup>	10 mΩ	6.3 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	100 A	100 A
Rated Voltage	48 V	48 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	51 V	51 V
Absolute Maximum Current	1,150 A	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum <sup>3</sup>	3.0 mA	5.2 mA
Maximum Series Voltage	750 V	750 V
Capacitance of Individual Cells <sup>11</sup>	1,500 F	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell <sup>11</sup>	1.5 Wh	3.0 Wh
Number of Cells	18	18

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques du super condensateur utilisé.

### IV.1.3 Caractéristiques des batteries :

Tension nominale	24V
Capacité nominale	1200Ah
Courant Max	100A
Puissance spécifique	1.3 kW/kg

**Tableau. IV.3 :** Caractéristiques de la batterie utilisée

### IV.1.4 Gestion de puissance

La puissance demandée par la charge (véhicule électrique), est assurée par les deux sources d'énergies (les batteries et les supercondensateurs) selon l'équation suivante :

$$P_{dem} = P_{batt} + P_{sc} \dots\dots\dots$$

Les deux sources débitent sur la charge (MSAP) lorsque la puissance demandée est supérieure à zéro, les batteries comme source principale les supercondensateurs comme source secondaire pour accomplir les demandes en forte puissance.

### IV.2 Résultats de la simulation :

Le modèle est testé sur un cycle de 10 secondes pendant le fonctionnement à des vitesses différentes selon un profile, la stratégie de gestion d'énergie proposée a été simulée en utilisant le modèle dynamique du véhicule développé dans l'environnement MATLAB/Simulink, On appliquant un profil de vitesse sur le système global on récupère les différentes allures qu'on a obtenu pour l'analyse :

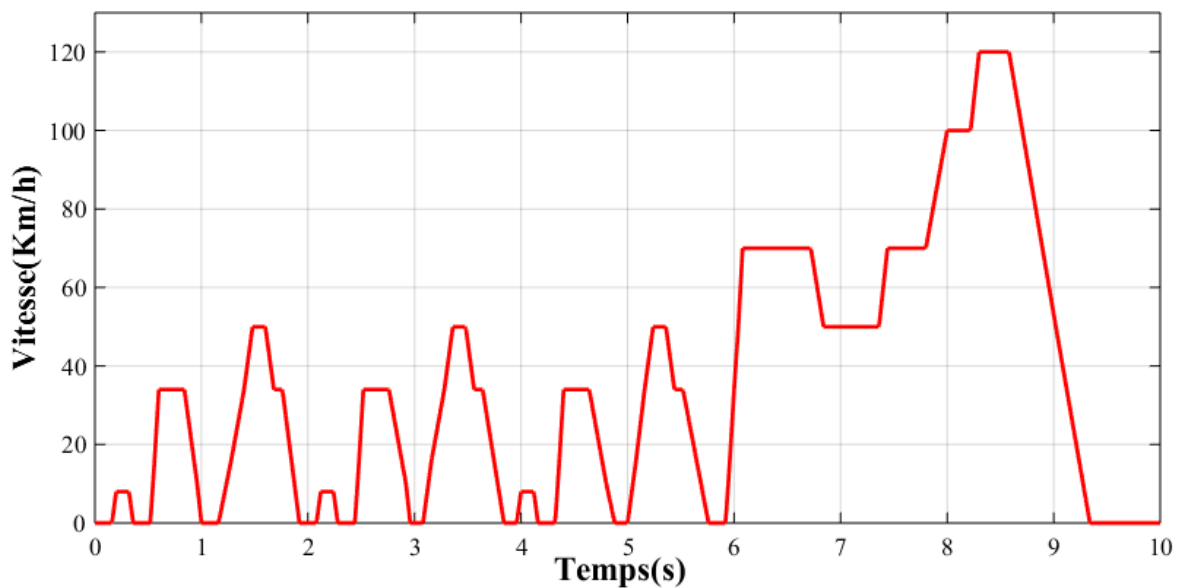
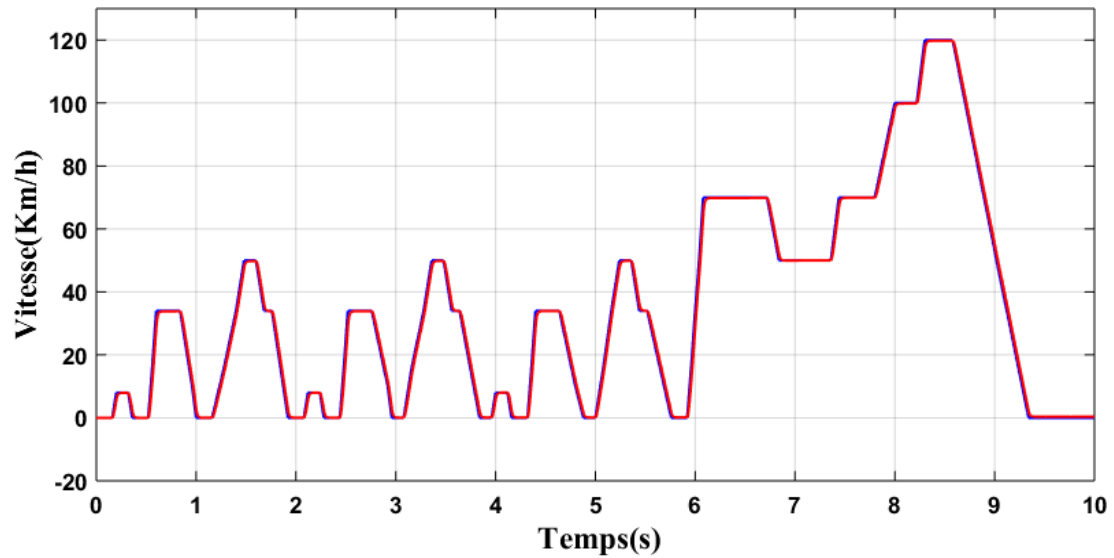


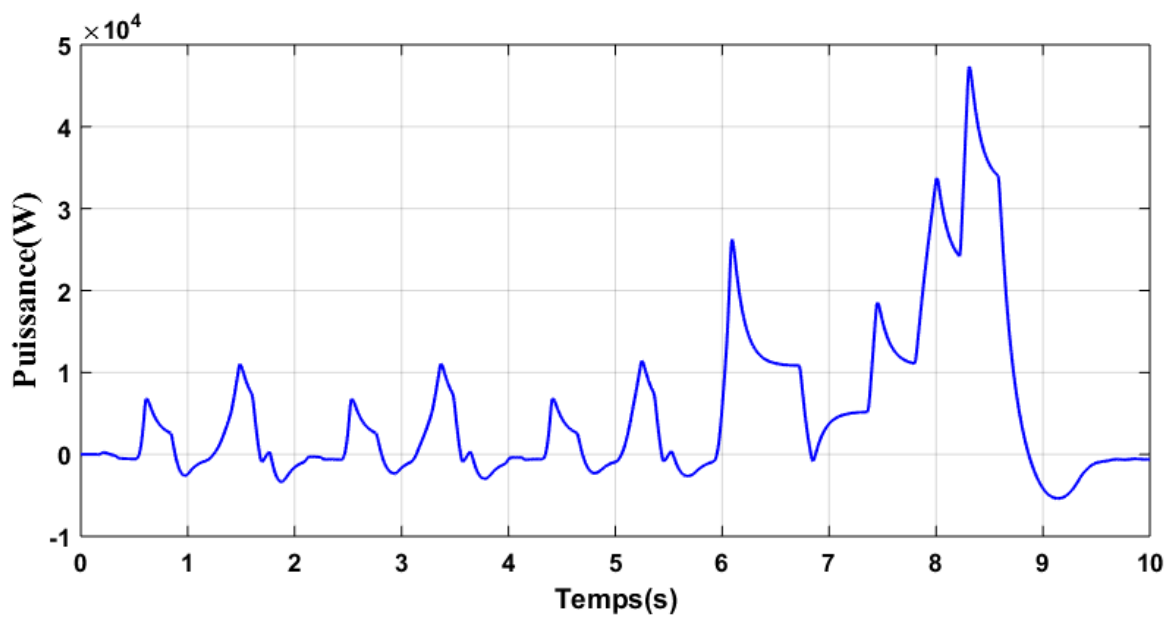
Figure IV.2 : Vitesse de référence en km/h

La (Figure IV.2) montre l'allure de la vitesse du véhicule en km/h, on a choisi un profil de vitesse qui va nous permettre de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule à savoir la traction, le freinage, et l'arrêt. Ce profile aussi va imposer l'allure du couple et de la vitesse du moteur car le modèle mécanique du véhicule est basé sur sa vitesse V et sur l'accélération g.



**Figure IV.3 :** Vitesse du moteur électrique en km/h

En comparant les deux allures on remarque que la vitesse du moteur suit parfaitement la vitesse de référence imposée par la commande vectorielle et elles ont le même profil que la vitesse de véhicule



**Figure IV.4 :** Profil de la puissance demandé

La (Figure IV.4) montre l'allure de la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé qui comporte les trois de mode de fonctionnement à savoir, accélération décélération et l'arrêt.

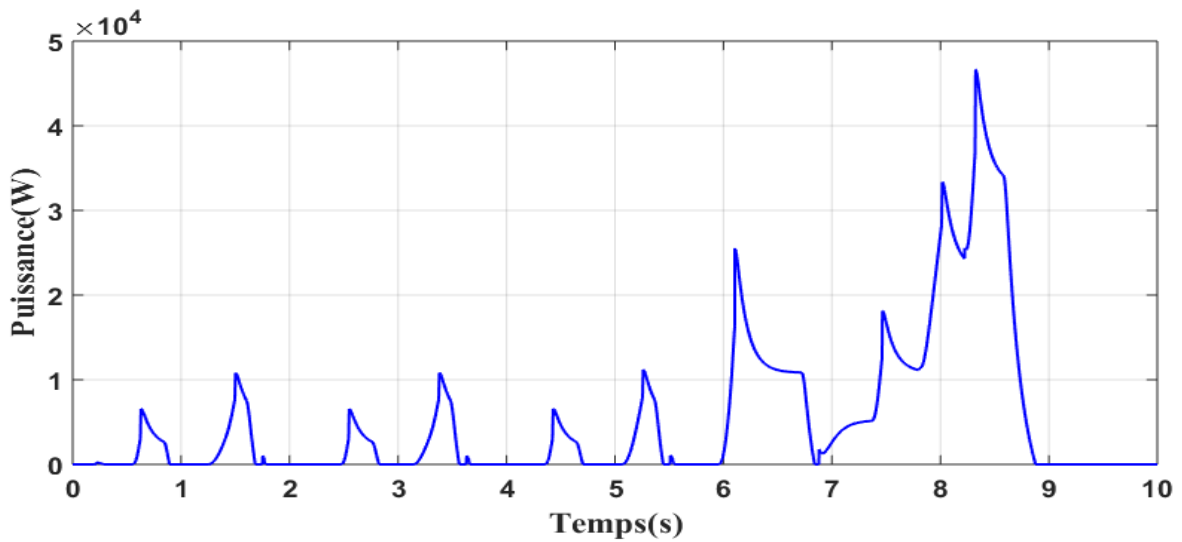


Figure IV.5 : Puissance délivrée par la batterie(a)

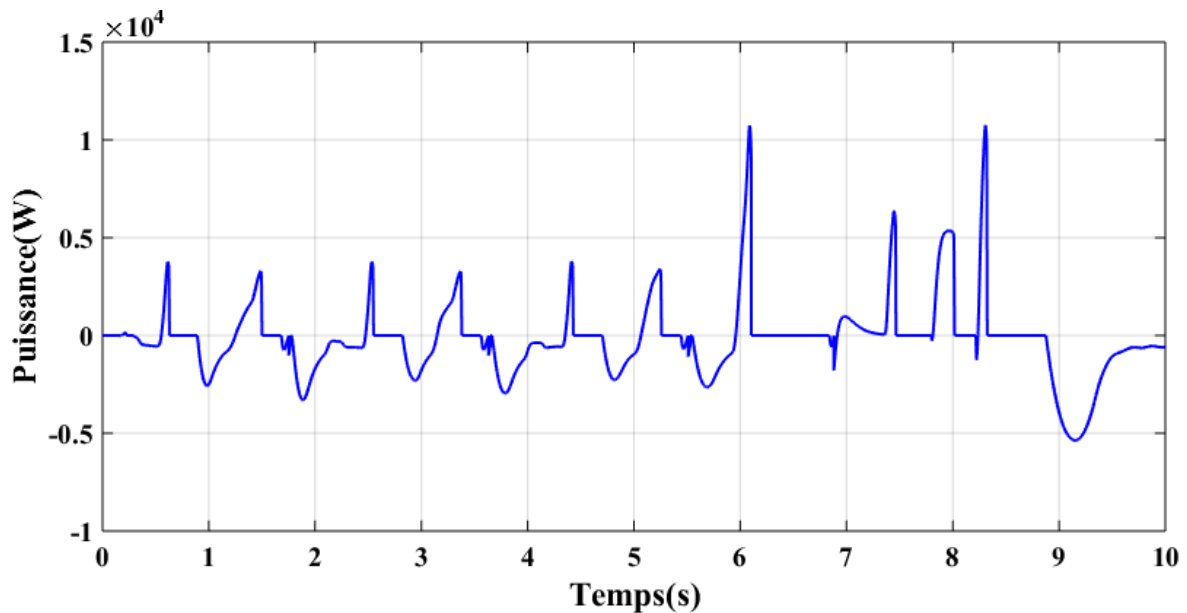


Figure IV.6 : Puissance du super-condensateur (b)

La figure (a) montre l'allure de la puissance délivrée par les batteries, en remarque qu'elle peut atteindre les 46kW lors de forte demande en puissance, et les supercondensateurs interviennent pour compenser toujours la demande en puissance. La figure (b) montre le comportement de la puissance des super condensateurs, la puissance positive signifiée celle dissipée au moteur électrique, et la puissance négative signifiée celle récupérée aux moments de freinage.



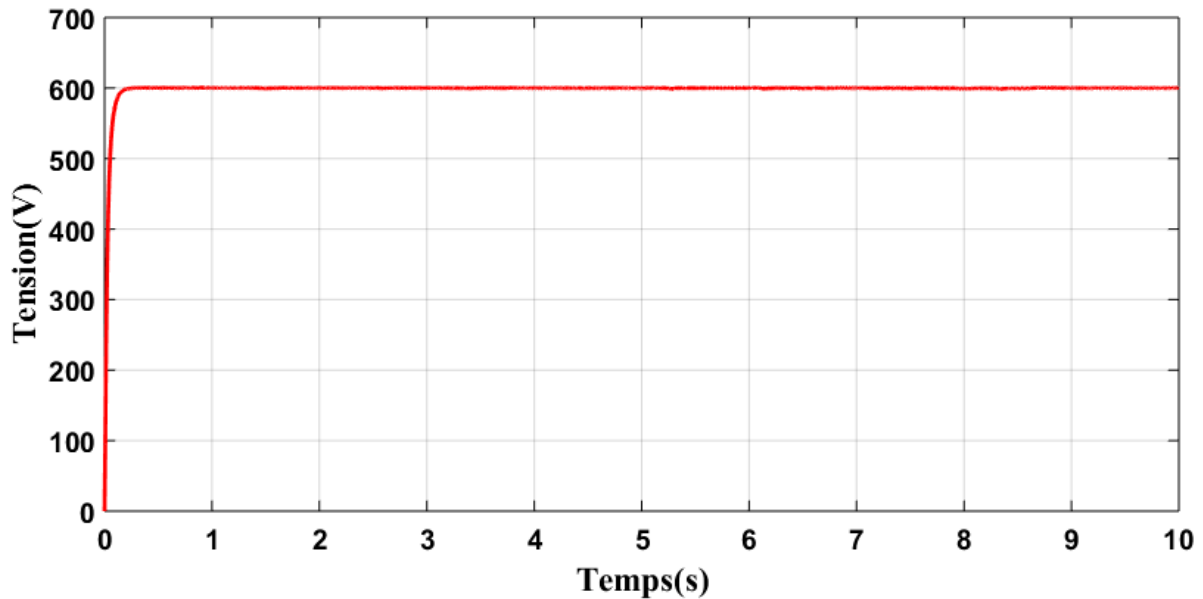


Figure IV.7 : tension au niveau du bus continu

La (Figure IV.7) montre le comportement de la tension au niveau du bus continu on remarque que la tension est stable après 0.30 s qui est le temps de réponse, elle atteint de près la valeur maximale qui est de 600V durant toutes les phases de fonctionnement.

## Mode traction

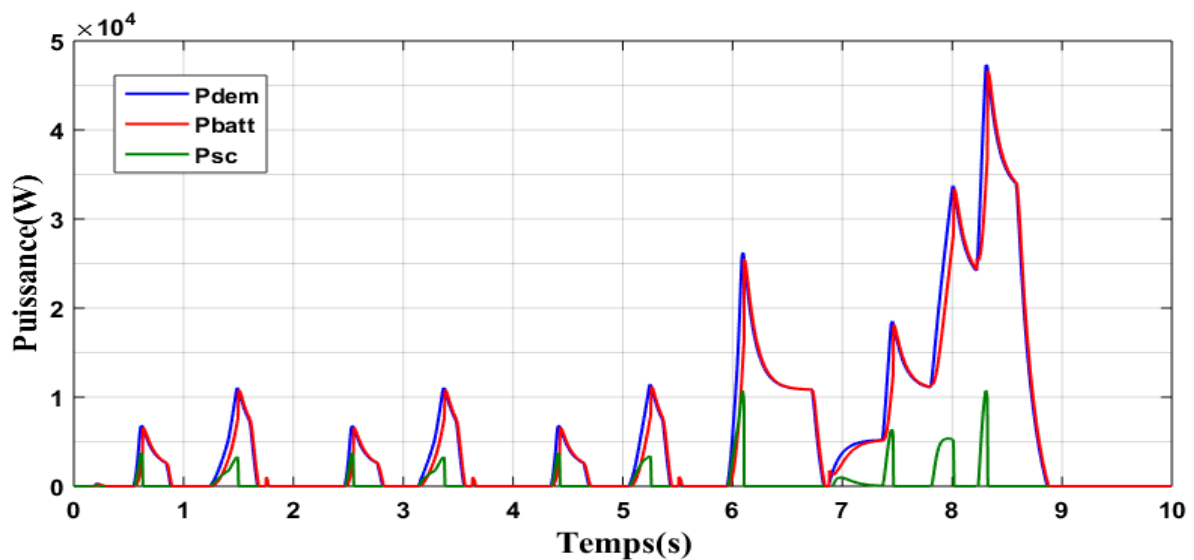


Figure IV.8 : Profil des puissances durant le mode de traction

La (Figure IV.8) montre les allures des différentes puissances des sources d'énergie de système étudié lors de traction, en remarque bien que notre système reprend au besoin de la charge durant le profil de vitesse testé.

Lors de chaque accélérations le supercondensateur répond au système plus rapidement à cause de leur temps de réponse très petit et de la forte demande en puissance du système ensuite la batterie prend le relai pour le reste des besoins énergétiques.

### .Mode Freinage

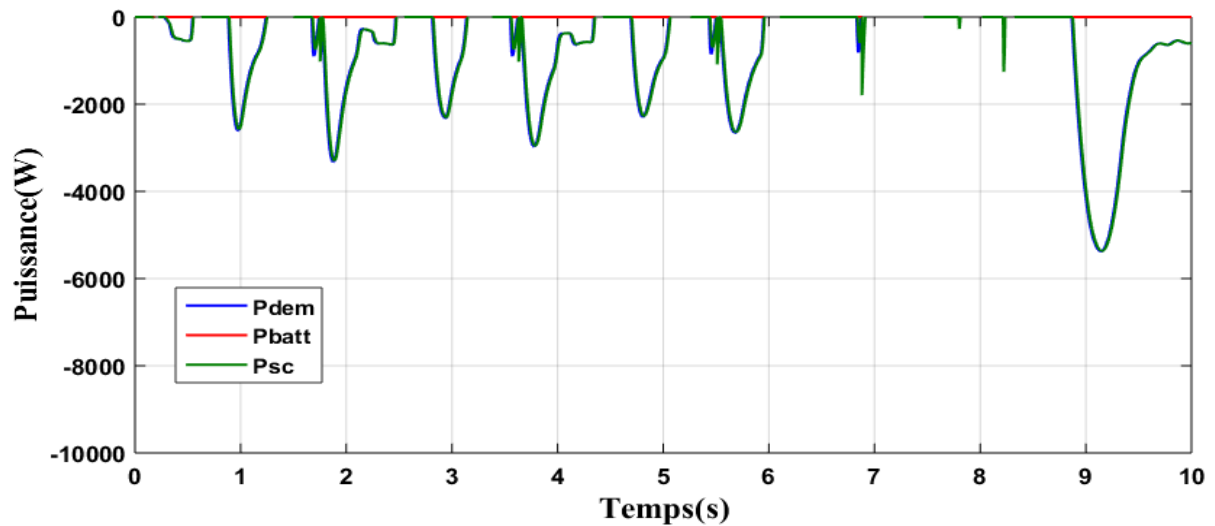


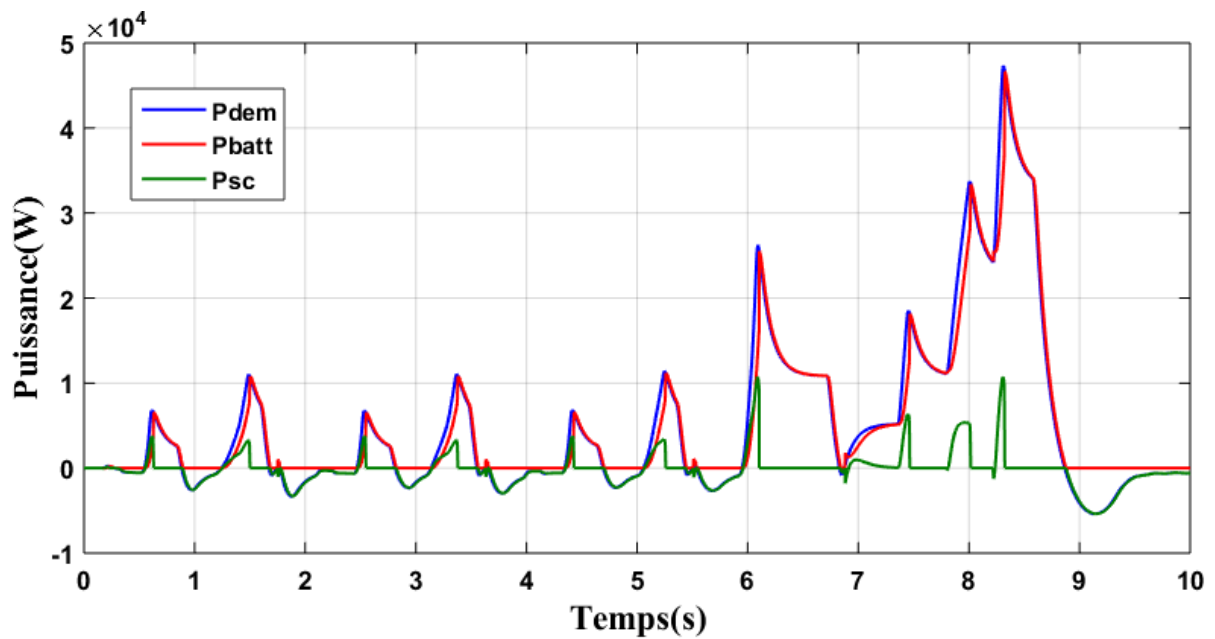
Figure IV.9 : Profil des puissances durant le mode de freinage

D'après les résultats de cette figure on remarque bien que les super condensateurs et les batteries récupèrent l'énergie de freinage.

### .Mode arrêt

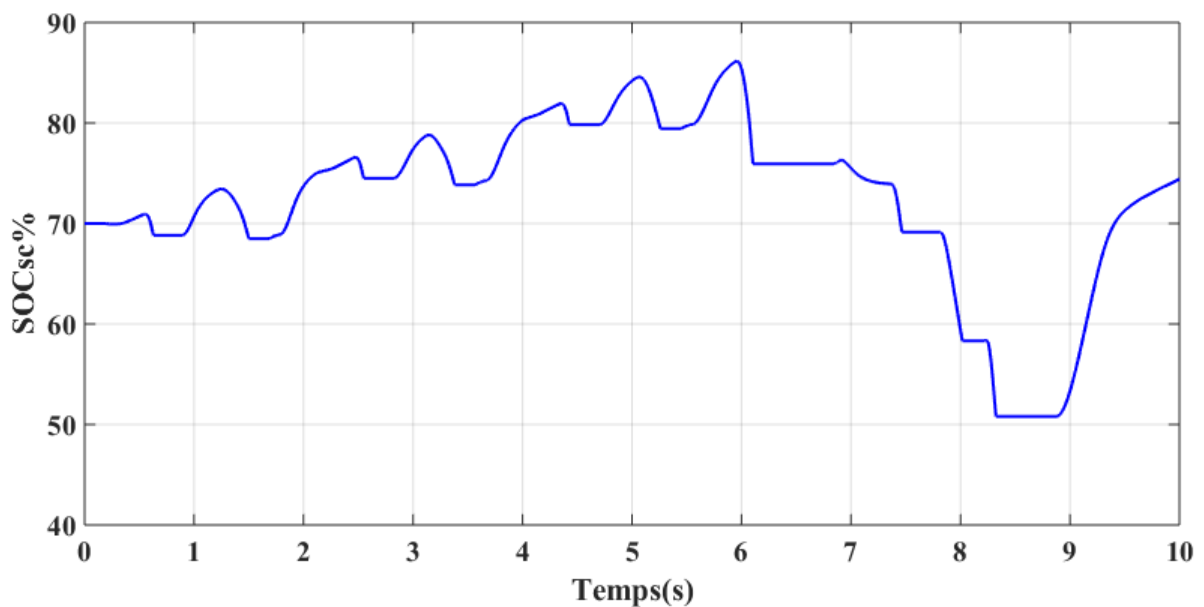
Durant cette période aucun flux énergétique.

**.Autres résultats**



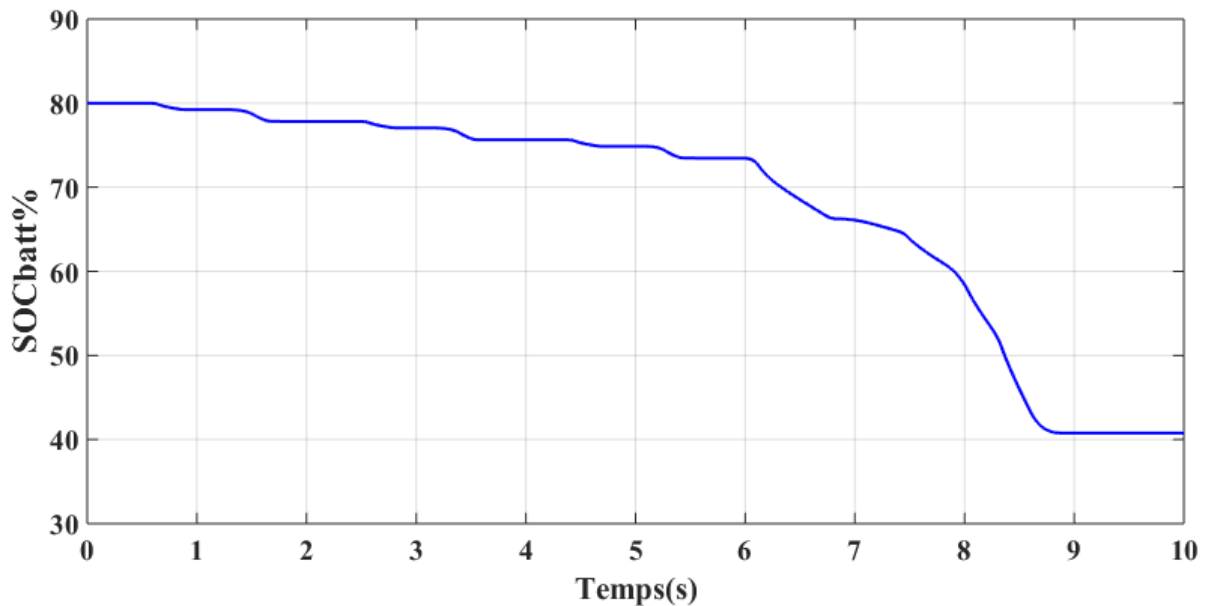
**Figure IV.10:** profile de toutes les puissances

Nous remarquons de ces résultats de simulation que les supercondensateurs sollicitent la demande en puissance durant tout le parcours routier. Pour les différentes vitesses. L'ajout des super condensateurs dans cette configuration a pour rôle de reprendre aux fortes demandes en puissance et d'améliorer la durée de vie de la batterie en respectant le  $soc_{min}$  et le  $soc_{max}$ .



**Figure IV.11 :** Etat de charge des supercondensateurs

La (**Figure IV.11**) représente l'état de charge des super condensateurs (SOC Stat Of Charge), en remarque qu'elle est protégée entre les deux niveaux de charges, décharge pendant le fonctionnement moteur correspondant à une diminution du soc (state of charge), pour alimenter le moteur électrique, et recharge pendant le fonctionnement générateur correspondant à une augmentation du soc, et récupération de l'énergie cinétique des roues.



**Figure IV.12** : état de charge des batteries

La (**Figure IV.12**) montre l'état de charge des batteries durant le cycle de vitesse imposé, elles se déchargent au fil du temps.

## Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation du système globale étudié.

On constate l'intérêt de la gestion de puissance dans ce système qui permet de gérer les sources d'énergies et charger la source secondaire, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption.

l'intérêt des supercondensateurs dans le véhicule électrique :

- ❖ Récupérer l'énergie lors du freinage
- ❖ leur densité de puissance élevée

- ❖ leur faible durée de charge et décharge (de l'ordre de 1 s à quelques 10 s)
- ❖ ils permettent aussi de fournir la puissance nécessaire lors de la demande forte en puissance



***CONCLUSION GENERALE***



# Conclusion General

Le principal objectif de notre travail intitulé « Modélisation et application des supercondensateurs », et l'importance des supercondensateurs dans le domaine du transport

(véhicules électriques), comme source secondaire, afin de répondre aux fortes demandes en puissance.

Dans un premier lieu, nous nous sommes optés à la présentation d'un état d'art des supercondensateurs, leurs structures, principe de fonctionnement et domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et les méthodes d'identifications des paramètres des supercondensateurs pour une utilisation meilleure de ces performances.

Le troisième chapitre présente une description générale de notre système étudié, et la modélisation de chaque élément, à savoir les sources d'énergies (batteries et supercondensateurs), les convertisseurs statiques (hacheurs et onduleur), la machine à courant continu et le véhicule électrique.

Les résultats de notre système étudié sous le logiciel MATLAB simulink sont présentés et discutés dans le dernier chapitre, afin de présenter la gestion de puissance et le dimensionnement de système étudié.

## Perspective

En perspectives, nous envisageons d'élargir ces travaux, dans le but d'améliorer le fonctionnement du véhicule électrique, nous proposons de :

- Réaliser un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour valider le travail et pourquoi pas le concrétiser.
- Identifier un supercondensateur pratiquement.
- Appliquer d'autres stratégies de commande, comme le mode glissant et la logique floue.



## *Références Bibliographiques*





## *Référence bibliographique*

[1] **GUALOUS, Hamid, et al. 2003.** *Study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature.* s.l. : Journal Power Sources 123, 2003. pp. 86-93.

[2] **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.

[3] **LASSEGUES, Jean-Claude. 2001.** *Supercondensateurs.* s.l. : Les techniques de l'ingénieur, 2001. D3 334.

[4] **JEMMENEGGER, Christophe. 2002.** *Nanostructures de carbone comme composants pour le stockage d'énergie dans les condensateurs électrochimiques à double couche (ECDL).* Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg. Suisse : s.n., 2002. Thèse de doctorat.

[5] **B.E. CONWAY,** "Electrochemical supercapacitors - Scientific fundamentals and technological applications",  
Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999

[6] **X. ANDRIEU, L. MOREAU, B. PICHON,** "Etude comparative d'électrodes de carbone pour supercapacités à électrolyte organique",  
Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998

[7] **P. LE GOFF,** , "Quelques informations sur des techniques de stockage de l'énergie",  
Site Internet <http://pl.legoff.free.fr>

[8] **A.F. BURKE, T.C. MURPHY,** "Material characteristics and the performances of electrochemical capacitors for electric / hybrid vehicle applications",  
Materials for Electrochemical Energy Storage and Conversion – Batteries, Capacitors and Fuel Cells Symposium, pp. 375-395, 1995

[9] **M.F. ROSE,** "Performance characteristics of large surface areas chemical double-layer capacitors",  
33rd International Power Sources Symposium, pp. 572-591, Penningham, 1988

[10] **D. EVANS, J. ZHENG, S. ROBERSON**, "Improved capacitor using amorphous RuO<sub>2</sub>",  
Site Internet <http://www.evanscap.com/technical.html>

[11] **D. NAEGELE**, "Polypyrrole supercapacitors",  
Electronic properties of conjugated polymers III – Basic models and applications :  
proceedings of International Winter School on Electronic Properties of Polymers and  
Related Compounds, Vol. 91, pp. 428-431, March 1989

[12] **M. TOURNOUX, R. DURAND**, "Materiaux pour le stockage et la transformation  
électrochimique de l'énergie",  
Rapport de l'Institut des Matériaux de Nantes, pp. 40-42,  
Site Internet <http://www.cnrs.fr/Chimie/Programmes/Materiaux/MateriauxStockage.html>

[13] **T. MORIMOTO, K. HIRATSUKA, Y. SANADA, K. KURIHARA**, "Electric double-  
layer  
capacitor using organic electrolyte",  
Journal of Power Sources, Vol. 60, Fasc. 2, pp. 239-247, June 1996

[14] **G. HERLEM, B. FAHYS, M. HERLEM**, "Nouveaux électrolytes non aqueux liquides  
pour  
supercapacités",  
Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998

[15] **I. BISPO-FONSECA, J.F. FAUVARQUE**, "Analyse des composantes de la résistance  
série  
d'un supercondensateur à électrolyte organique",  
Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998

[16] **C. RAIBLE, H. MICHEL**, "High energy density with ultracapacitors. Bursting with  
power",  
Siemens Matsushita Components  
<http://www.epcos.com/inf/20/35/articles/>

## *Référence bibliographique*

[17] **E. HUMBERT**, "Les supercondensateurs approchent de la maturité", *Electronique International*, n° 354, pp. 16-19, Juin 1999

[18] **A. YOSHIDA, S. NONAKA, A. NISHINO**, "Electric double-layer capacitor with high capacitance density and its application",  
Proceedings of the Symposium on Electrochemical Capacitors, pp. 210-219, USA, October 1995.

[19] **T. MORIMOTO, K. HIRATSUKA, Y. SANADA**, "Development and current status of electric double-layer capacitors",  
Material for Electrochemical Energy Storage and Conversion – Batteries, capacitors and Fuel cells, pp. 397-411, USA, 1995

[20] **X. ANDRIEU**, "Supercondensateurs. Etat de l'art industriel - Performances",  
Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998

[21] **CAMARA, M. B., GUALOUS, H. et DAKYO, B. 2011.** *Supercapacitors modeling and integration in transport applications*. s.l. : Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE, 2011.

[22] **SOLANO, J., HISSEL, D. et PERA, M.C. 2013.** *Modeling and Parameter Identification of Ultracapacitors for Hybrid Electrical Vehicles*. s.l. : Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE , 2013.

[23] **AKANKSHA, Dixit, et al. 2014.** *Introduction to the zigzag modeled ultracapacitor*. PUNE, INDIA : Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014.

[24] **ZUBIETA, L. et BONERT, R. 1998.** *Characterization of double layer capacitors for power electronics applications*. s.l. : IEEE, 1998.

[25] **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 .

[26] **DE LEVIE, R. 1963.** *On porous electrodes in electrolyte solutions*. s.l. : Electrochimica, 1963. pp. 751-780. Vol. 8.

## *Référence bibliographique*

[27] **KÖTZ, R. et CARLEN, M. 1999.** *Principles and applications of electrochemical capacitors.* s.l. : Electrochimica, 1999. pp. 2483-2498. Vol. 45.

[28] **BELHACHEMI, F., RAËL, S. et DAVAT, B. 2000.** *Modélisation énergétique des supercondensateurs à couche double électrique.* Lille : EPF'00, 2000.

[29] **BULLER, S. 2002.** *Impedance based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems.* Aachen : s.n., 2002. ISBN 3-8322-1225-6.

[30] **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.

[31] :**MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, C CELL, D CELL** and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission from Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2013 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without Prior Witten permission from Maxwell

[32] : Safa Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden 'Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques'

[33] : Mamadou Bailo Camara, Super-condensateurs pour échange dynamique d'énergie a bord du véhicule électrique hybride. Modélisation, étude des convertisseurs et commande, These de l'Universite de Franche-Comte, Dec. 2007.

[34] : Mohamed.N , Sid, H. Alloui, K. Marouani M.Becherif Gestion Optimale de l'Energie d'un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

[35] : Philip Tritschler 'Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système \_a pile \_a combustible embarquée dédiée a l'application agricole' 14/02/2011

[36] : Farah.S « Identification et Commande de Moteurs Brushless Pour Mini-Drones » mémoire de fin d'étude UNIVERSITÉ LIBANAISE FACULTÉ DE GÉNIE - BRANCHE III .04 octobre 2013.

[37] : A. Nouh ‘ Contribution au Développement d'un Simulateur pour les Véhicules

## *Référence bibliographique*

Electriques Routiers”, Thèse de doctorat en Science pour l’ingénieur- Génie électrique,  
Université de Belfort-Montbéliard et de Franche-Comté, 2008