



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en Electronique

Par :

Mr.Imad eddine BELMADANI

Mr.Slimane KARZIKA

Thème

**APPLICATION D'UN CONVERTISSEUR DC/DC DANS UN SYSTEME
MULTI SOURCES A ENERGIES RENOUVELABLES**

So utenu publiquement le : 05/06/2018

Devant le jury :

Radhwane SADOUNI	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
Boumediene LADJAL	MAA	Univ. Ghardaïa	Examineur
Yahia HOUAM	AR	Univ. Ghardaïa	Examineur
Rezzak DAOUD	MRB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Avant tout Nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Les travaux présentés dans cette mémoire ont été effectués au département de science et technologie à l'Université de GHARDAIA, sous la direction du docteur DAOUD REZZAK à qui nous exprimons nos profonde gratitude pour la qualité de son encadrement, son esprit scientifique, ses aides précieuses. Nous le remercions également pour sa disponibilité totale, ses encouragements dans toutes les phases du travail et ses conseils objectifs, tout au long de cette année, qu'il trouve ici ma grande reconnaissance.

Nous tiens à exprimer notre profonde gratitude et mes vifs remerciements à Monsieur Redouane SADOUNI Prof à l'Université de GHARDAIA pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de cette mémoire.

Nous vifs remerciements et nous haute considération vont également à Monsieur Boumediene LADJAL Prof à l'Université de GHARDAIA pour l'honneur qu'il nous faisant en acceptant de participer à ce jury.

Monsieur Yahia HOUAM Prof maitre de centre de recherche et application d'Energies renouvelables a bien accepté de participer au jury, je le remercie vivement et je suis très sensible à l'honneur qu'il me fait.

Dédicaces

À mes très chers parents, que Dieu les protège.

À mes chers frères et mes chères sœurs.

À ma grande famille.

Et à tous mes amis.

RESUME

Résumé

Le travail présenté dans cette étude est basé sur le dimensionnement d'un convertisseur d'énergie de type buck-boost et la gestion d'énergie entre deux sources dans le cadre de l'amélioration de la fiabilité des systèmes hybrides. De nombreux paramètres influant sur le fonctionnement des systèmes hybrides ont été analysés, parmi lesquels la fiabilité de la production d'électricité, la gestion du système commande, par l'intermédiaire d'une régulation PI.

Dans un premier lieu, nous avons réalisé sur logiciel Matlab/Simulink un modèle PV avec un hacheur abaisseur qui lui est associé commandé à base de MLI, avec une boucle de régulation pour minimiser les perturbations.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la synthèse d'un correcteur PI pour réguler un hacheur réversible en courant associé à pack des supercondesateurs commandé à base d'hystérésis.

Finalement, la simulation de système étudié et avoir les résultats obtenus nous a permis de faire une interprétation afin d'expliquer le fonctionnement du système avec la variation de charge.

Mots-clés : Convertisseur CC-CC, abaisseur-élévateur, Matlab/Simulink, régulateur PI, système hybride, système PV, gestion d'énergie.

Summary

The work presented in this study based on the conception of energy converter type Buck-Boost and energy management between two power sources in the frame of amelioration of reliability of hybrid systems. Many parameters affecting the function of hybrid system we have been analyzing among which reliability of production electricity, command system management, via regulation PI.

In the first place, we have realize on software Matlab/Simulink PV model with Buck converter associated with it ordered based on PMW with loop of regulation for minimize perturbations.

After that, we are interested in synthesis of corrector PI to regulate DC converter reversible in current associate with pack super capacitor ordered based on hysteresis.

In the end, simulation of system studied and see the results we had to do an interpretation to explain the system function with variation of charge.

Key words: DC-DC converter, Buck-Boost, Matlab/Simulink, PI regulator, hybrid system, PV system, energy management.

ملخص:

العمل المنجز في هذه الدراسة يعتمد على تحجيم محول الطاقة من نوع Buck-Boost وتنسيق تدفق الطاقة بين مصدرين في اطار تحسين دقة الأنظمة الهجينة. كثير من الاعدادات تؤثر على عمل الأنظمة الهجينة قمنا بتحليلها ,منها دقة انتاج الكهرباء ,تسيير نظام التحكم, بواسطة منظم PI.

أولا : قمنا بإنجاز على برنامج (Matlab/Simulink) نموذج ألواح شمسية(PV) مع محول خافض يرتبط معه يتحكم فيه بواسطة MLI مع باقة تنظيم من أجل تخفيض الاضطرابات.

فيما يليه ,اهتمنا بتركيب مدقق PI لضبط محول (hacheur réversible) بالتيار يربط مع حزمة مكثفات عالية يتحكم فيه بواسطة Hystérésis .

أخيرا, محاكاة النظام المدروس والنتائج المحصل عليها مكنتنا من عمل تفسير من أجل شرح كيفية عمل النظام مع تغيير الحمولة.

كلمات مفتاحيه: محول مستمر - مستمر(CC/CC), خافض-رافع, Matlab/Simulink, منظمPI, نظام هجين, نظام ألواح شمسية, تسيير الطاقة.

Sommaire

Résumé	I
Liste des Figures	II
Liste des Tableaux	III
Liste des abréviations explicitées	VI
Introduction Générale	10

Chapitre I: Systèmes énergétiques hybrides à base des énergies renouvelables

I.1 Introduction.....	17
I.2 Etat de l'art des systèmes hybrides, les avantages et les inconvénients.....	17
I.2.1 Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides.....	17
I.2.2 Principaux Composants des systèmes hybrides.....	19
I.3 Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides à énergie renouvelables.....	20
I.3.1 Système hybride à configuration alternatif CC.....	20
I.3.2 Système hybride à configuration alternatif (AC).....	21
I.3.3 Système hybride à configuration CC-AC.....	23
I.3.4 Description du système hybride étudié.....	24
I.5 Conclusion	25

Chapitre II: Systèmes photovoltaïques et le convertisseur CC/CC qui lui est associé

II.1 Introduction.....	26
II.2 Générateurs photovoltaïques.....	26
II.4 Différents type de technologies de cellules photovoltaïques.....	27
II.4.1 1 ^{ère} génération : Silicium cristallin (mono et poly).....	27
II.4.2 2 ^{ème} génération : silicium amorphe et microcristallin.....	28
II.4.2.1 Les cellules en couches minces.....	28
II.4.2.2 Les cellules à concentration.....	29
II.4.2.3 Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et OrganicPV)	29
II.5 Les modules solaires photovoltaïques.....	20
II.6 Protections d'un générateur photovoltaïque.....	32

II.7 Modèle des cellules photovoltaïque.....	33
II.8 Convertisseur CC/CC abaisseur associer avec le système PV	37
II.8.1 Hacheur série (BUCK).....	37
II.8.2 Définition.....	37
II.8.3 Fonctionnement.....	38
II.8.4 Modale Simulink de MATLAB.....	39
II.9 Adaptation de la tension de sortie du système PV à celle de Bus continu.....	41
II.10 Conclusion	43

Chapitre III : Modelisation des Super Condensateurs

III.1. Introduction.....	45
III.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs.....	45
III.2.1. Principe fondamental.....	45
III.2.2. Différents types de super condensateurs.....	46
III.2.3. Modélisation et caractérisation des super condensateurs.....	47
III.2.3.1 Modélisation des super condensateurs.....	47
III.2.3.2 Méthodes de caractérisation.....	48
III.2.3.2.1 Caractérisation temporelle.....	48
III.2.3.2.2 Caractérisation fréquentielle.....	48
III.2.3.3 Choix d'un modèle.....	49
III.2.3.3.1 Modèle RC du constructeur.....	49
III.2.3.3.2 Modèle à deux branches.....	51
III.2.3.3.3 Modèle multi branche.....	53
III.2.4. Système d'équilibrage.....	56
III.2.4.1 Systèmes passifs d'équilibrage.....	56
III.2.4.1.1 Système d'équilibrage avec résistance.....	56
III.2.4.1.2 Système d'équilibrage avec diodes zener	57
III.2.5 Systèmes actifs d'équilibrage.....	58
III.3. Conclusion.....	59

Chapitre IV : Gestion d'énergie entre les sources hybrides et le convertisseur bidirectionnel

IV.1 Introduction.....	61
IV.2 Choix du logiciel	61
IV.3 Choix des bibliothèques dans Matlab/Simulink®.....	61
IV.4 Schéma final du convertisseur sous forme de schéma bloc.....	62
IV.5 Fonctionnement de l'ensemble du système.....	64
IV.6 Schéma équivalent du pack de SC.....	64
IV.7 Commande PI du hacheur.....	65
IV.8 Mode « Buck » (commande hystérésis).....	66
IV.9 Résultats de simulation.....	67
IV.10 Simulation de changement de charge.....	67
IV.11 Simulation de perte de réseau lors de la recharge.....	68
IV.12 Simulation de la variation de charge.....	68
IV.13 Résultats de Simulation	69
IV.14 simulation passage de mode hysteresis a « boost » suite a la perte du reseau dc en MODE PI	70
IV.16 Conclusion	71
Conclusion Générale.....	73
Annexe.....	76
Bibliographie.....	87

Liste des Figures

Figure I.1:	Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et Stockage.....	15
Figure I.2:	Système hybride à configuration CC.....	17
Figure I.3:	Système hybride à configuration AC.....	19
Figure I.4:	Système hybride a configuration CC-AC.....	20
Figure I.5:	Système hybride étudié.....	21
Figure I.6:	Schéma synoptique du système hybride étudié.....	22
Figure II.1:	Structure basique d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II.2:	Cellule mono cristalline et poly cristalline.....	26
Figure II.3:	Caractéristiques résultantes d'une association de NS cellules en série....	30
Figure II.4:	Caractéristiques résultantes d'une association de NP cellules en parallèle.....	31
Figure II.5:	schématisation de générateur PV avec diode anti retour et diode bypass..	32
Figure II.6:	Schéma électrique équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque...	32
Figure II.7:	Modèle photovoltaïque en circuit composé de Nser x Npar modules.....	33
Figure II.8:	Courant et puissant de 8 modules photovoltaïques mit en parallèles en fonction de la tension.....	35
Figure II.9:	La caractéristique I-V du module PV selon la température.....	35
Figure II.10:	Caractéristique P-V du module PV selon la température.....	36
Figure II.11:	Schéma électrique de hacheur BUCK.....	36
Figure II.12:	Formes d'ondes du hacheur de type BUCK	37
Figure II.13:	Schéma du convertisseur BUCK sous Matlab/Simulink®.....	38
Figure II.14:	Boucles de régulation du de la tension du bus continu.....	40
Figure II.15:	Courant de charge.....	41
Figure II.16:	Rapport cyclique.....	41
Figure II.17:	Tension à la sortie des modules PV.....	41
Figure II.18:	Tension du bus continu.....	18
Figure III.1:	Structure interne d'un super condensateur.....	46
Figure III.2:	Circuit équivalent simplifié d'un super condensateur.....	46
Figure III.3:	Modèle constructeur d'un super condensateur.....	49
Figure III.4:	Charge et décharge du super condensateur "PC 7223" avec un courant de 100A.....	50
Figure III.5:	Charge et décharge du super condensateur "PC 7223" avec un courant de 400A	50

Figure III.6:	Modèle à deux branches d'un super condensateur.....	51
Figure III.7:	Charge et décharge du SC PC7223 selon le modèle à deux branches avec un courant de 100A.....	52
Figure III.8:	Modèle énergétique multi branche d'un SC	53
Figure III.9:	Charge et décharge du modèle multi branches à trois éléments.....	55
Figure III.10:	Charge et décharge du modèle multi branches à quinze éléments.....	55
Figure III.11:	Système d'équilibrage résistif.....	57
Figure III.12:	Système d'équilibrage avec diodes zener.....	57
Figure III.13:	Equilibrage de 4 cellules à base de convertisseurs buck-boost.....	59
Figure IV.1:	Modèles des composants servant à la simulation.....	63
Figure IV.2:	Montage complet du démonstrateur sous Simulink.....	64
Figure IV.3:	Schéma électrique équivalent d'un SC.....	65
Figure IV.4:	Organigramme de recharge des SC.....	66
Figure IV.5:	Structure de la commande par deux boucles de contrôle.....	67
Figure IV.6:	Commande par hystérésis pour la recharge des SC.....	68
Figure IV.7:	Simulation PI (variation de la résistance de 20 à 5 Ω).....	69
Figure IV.8:	Modale (PI) en Variation de la résistance de 5 à 20 Ω	69
Figure IV.9:	Modale (PI) en Variation de la résistance de 20 à 5 Ω	70
Figure IV.10:	Passage de « buck » à « boost »	71

Liste des Tableaux

Tableau II.1:	Caractéristiques des cellules PV.....	30
Tableau II.2:	Paramètres du module photovoltaïque Isofotón (I-130 S/24) à 25 °C, 1.5AM,.....	35
Tableau II 3:	simulation courant(A) et tension(U) de convertissage buck avec variation de μ	40
Tableau III.1:	Paramètres du SC PC7223 selon le modèle énergétique de F.Belhachemi...	54

Liste du lexique

- A : Ampère
- Boost : survolteur
- Buck : dévolteur
- I_{charge} : courant traversant la charge
- IL : courant traversant l'inductance
- kg : kilogramme
- PI : Proportionnelle Intégrale
- V : Volt
- Vbus : tension régulée à 40V aux bornes de la charge
- Vsc : tension aux bornes du pack de supercondensateurs
- W : Watt
- Wh : Watt heure
- CEI : Commission Electrotechnique Internationale
- CC : Courant Continu
- CA : Courant Alternatif
- PV : photovoltaïque
- SC : super condensateurs
- a-Si : silicium amorphe
- GaAs : l'arséniure de gallium
- Cz : Czochralski
- PE-CVD : Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
- Ns : Cellules série
- NP : Cellules en parallèle
- I : Courant
- U : tension
- MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion
- L : l'inductance
- P : puissance.
- T : Temps
- μ : rapport cyclique de la commande

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouvelle ; dans l'histoire de l'humanité, les énergies renouvelables ont été pendant longtemps la première possibilité de produire l'énergie. Ceci est seulement changé avec la révolution industrielle. Qui apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du 19^{ième} siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au 20^{ième} siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Ce qui a diminué l'application des énergies renouvelables en termes absolus et relatifs ; sans compter quelques exceptions. Les énergies renouvelables ont eu une importance secondaire dans la production globale d'énergie. Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et les systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici une vingtaine d'années, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux .La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement, comme les pays du Maghreb [1]. Ces pays possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité. Et pour assurer la continuité du service l'ajout d'une source d'énergie auxiliaire qui permet l'apport et la récupération d'une grande densité de puissance dans un temps très court est indispensable. Parmi les sources auxiliaires les plus utilisées pour le stockage d'énergie électrique on trouve les batteries et les super condensateurs, ces derniers sont les mieux placés pour ces applications à cause de leurs fortes densités de puissance par rapport aux batteries [2].

De par leur structure et leur fonctionnement particulier, les supercondensateurs présentent des contraintes d'intégration spécifiques dans les dispositifs électroniques de puissance (faible tension et puissance élevée) [3].

On appelle un système électrique hybride lorsque deux sources d'énergies ou plus (source à base d'énergie renouvelable - super condensateurs dans notre cas) sont utilisées. Cette hybridation pose un autre défi : la gestion du transfert d'énergie entre les différentes sources (ENR et SC) et la charge (ex : moteur), Parmi les études récentes sur l'hybridation, les différentes configurations des sources ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux. Plus récemment, les stratégies de gestion d'énergie sont à l'étude. Parmi les objectifs de notre mémoire, nous proposons une stratégie de gestion d'énergie simple et efficace, pour cela nous avons procédé à l'aide de régulateurs de type proportionnel-intégral « PI » classiques et les régulateurs à base d'hystérésis à la gestion de l'énergie de notre système et les résultats sont très satisfaisants.

Nous avons présenté ce travail en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, *Systèmes énergétiques hybrides à base des énergies renouvelables*, nous avons présenté des généralités sur les systèmes hybrides, les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides à énergie renouvelables, les avantages et les inconvénients. Nous avons terminé ce chapitre par une description de la structure retenue dans notre mémoire.

Le second chapitre, *Systèmes photovoltaïques et le convertisseur CC/CC qui lui est associé*, montre les différents types des cellules photovoltaïques, et les différentes technologies utilisées dans leur fabrication. Par la suite, nous avons proposé un modèle équivalent à une source de courant, les paramètres et les caractéristiques de module PV. La modélisation et le dimensionnement du convertisseur CC-CC de type BUCK associé au module PV est effectuée à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre, *Modélisation des super condensateurs et du convertisseur*, traite le principe de fonctionnement, les différents types, la caractérisation et la modélisation des super condensateurs. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi le modèle super condensateur utilisé pour la suite de notre travail.

Le dernier chapitre, *Gestion d'énergie entre les sources hybrides et le convertisseur bidirectionnel*, propose une commande pour une gestion efficace de l'énergie électrique qui circule entre les sources hybrides (source ENR – super condensateur) et la charge , la commande de convertisseur CC-CC a partir d'une boucle de régulation qui fonctionnera à base d'un contrôleur PI . Les résultats de simulation sont présentés et discutés.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Systemes énergétiques hybrides à base des énergies renouvelables

I.1 Introduction

L'évolution des technologies de la conversion des énergies électrique de plus en plus rentable et donc leurs utilisations deviennent économiquement compétitives par rapport aux sources traditionnelles. En raison de la dépendance de leur production avec les conditions météorologiques, l'association de plusieurs sources (mode hybride) Les systèmes hybrides ouvrent la possibilité d'utiliser les avantages des ressources renouvelables en combinaison avec les ressources énergétiques classiques. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur les systèmes hybrides par rapport à la conception, l'analyse des performances, la mise en œuvre, et d'autres paramètres d'importance. Ces études affichent un développement significatif de ces systèmes au cours de ces dernières années. Sur la base des documents examinés, une multitude de combinaison est possible dans les systèmes hybrides à savoir : le photovoltaïque, l'éolien, les piles à combustible, les batteries, l'électrolyseur et le groupe électrogène. Selon le potentiel des ressources renouvelables disponible et le but d'utilisation de ce type de système dans la région d'étude [4].

I.2 Etat de l'art des systèmes hybrides, les avantages et les inconvénients

I.2.1 Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé. Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [5]. La figure suivante représente le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge (Load en anglais) et les éléments de stockage (Storage en anglais, en pointillé sur la (Figure I.1).

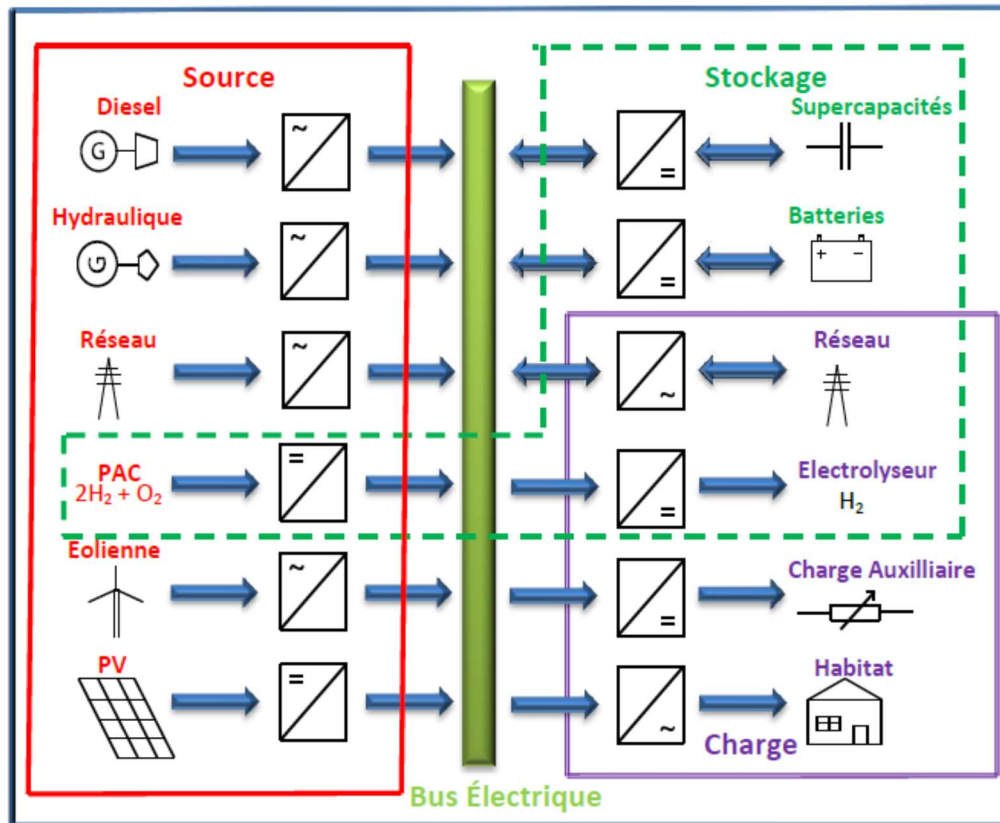


Figure I.1: Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et Stockage.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectés aux réseaux électriques ou autonomes. Dans le premier cas, on parle d'une génération distribuée. Les énergies éoliennes et solaires sont transformées sous la forme électrique transportable via les lignes vers le réseau. La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables. Les normes existantes s'appliquent à des générateurs ou à des convertisseurs statiques dans le cadre des normalisations françaises et européennes (générateurs PV, machines électriques, onduleurs, pollution électrique, sécurité des biens et des personnes, etc.). Majoritairement, les centrales hybrides produisent une puissance inférieure à 10 MW. Alors elles sont soumises à la réglementation pour le raccordement des systèmes de micro-génération. Plusieurs groupes de travail au sein de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) travaillent sur la question de la normalisation des systèmes qui utilisent les énergies renouvelables. Aux Etats-Unis, la série des normes IEEE 1547 encadre tous les aspects liés à l'interconnexion entre les sources renouvelables et le réseau.

Ces normes imposent des exigences sur la qualité de l'énergie produite en termes de tension, de fréquence et d'harmoniques. Ces contraintes imposent l'implantation de boucles de régulation spécifiques avec des dispositifs de filtrage dans les systèmes hybrides [6].

La majorité des systèmes hybrides raccordés au réseau, sont sans dispositif de stockage. Néanmoins, dans certains systèmes connectés à un réseau électrique « faible », des unités de stockage sont introduites pour renforcer le réseau en cas de défaillance. Dans ce cas, ils sont dimensionnés de manière à assurer un fonctionnement, éventuellement en mode dégradé, pour la durée de la coupure. Cependant si ces systèmes de production, qui ont un caractère aléatoire de par la nature des sources utilisées, viennent à se multiplier et à atteindre des proportions non négligeables alors les dispositifs de stockage joueront un rôle important pour assurer la stabilité du réseau. Dans d'autres systèmes, on remarque la présence de générateurs diesel qui constituent un second moyen de secours.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire que le système hybride possède une autonomie totale. En plus, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique. Dans ce cas, il est parfaitement envisageable, voire impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système. La présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées.

Dans les applications existantes, ce sont quasi-systématiquement des systèmes de petite puissance avec des batteries d'accumulateurs au plomb. Le dimensionnement du système de stockage est généralement lié à l'autonomie en jours recherchée. Cependant, le stockage représente une part très importante du coût et de l'entretien de l'installation, d'autant plus que la durée de vie des accumulateurs est bien inférieure à celle du panneau photovoltaïque, de l'éolienne et des convertisseurs d'énergie statiques. Dans ce cas particulier, le surcoût est acceptable en comparaison du prix qu'il aurait fallu allouer à l'installation d'une nouvelle ligne électrique. Le stockage présente donc une alternative intéressante pour assurer la fourniture de l'énergie en continu [7].

I.2.2 Principaux Composants des systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire). Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice,

géothermique etc.), des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), des charges principales et de délestages et un système de surveillance.

I.3 Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides à énergie renouvelables

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des systèmes de stockages et des générateurs à base des énergies conventionnels se résument en trois types :

Architecture à Bus CC (bus à courant continu), architecture à Bus CA (bus à courant alternatif) et l'architecture mixte à Bus CC-CA.

Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

I.3.1 Système hybride à configuration Continu (CC)

Cette technologie est née du besoin de coupler des charges à CA (plage de puissance moyenne) avec des sources d'énergie à CC et, de plus, de charger le système de stockage du côté CC par le biais d'une source d'énergie à CA.

Ces configurations d'installation servent à l'alimentation de consommateurs éloignés (par ex. petites entreprises ou fermes). La plage de puissance globale est située entre 1 et 5 kW, la tension CC allant de 12 à 48 V [8].

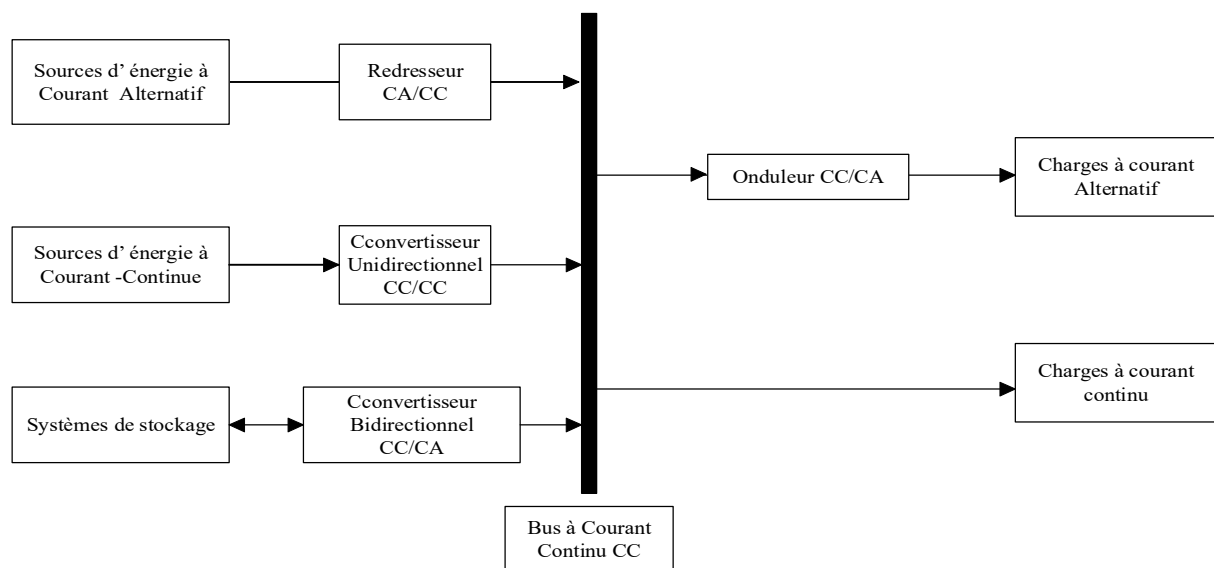


Figure I.2: Système hybride à configuration CC.

Dans le système hybride présenté dans la figure précédente, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les sources d'énergie à courant alternatif sont connectées en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les sources d'énergie à CA ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement [9].

L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre les consignes fixées pour l'amplitude et la fréquence.

Les systèmes de stockages et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que les sources d'énergies à CC et à CA sont dimensionnées pour alimenter les pics de charge et les systèmes de stockage en même temps.

La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur des sources d'énergie à CA ou en incorporant un régulateur de charge ou un convertisseur CC/CC dans les sources d'énergie à CC [10].

Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantages

- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif.
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables.

Inconvénients

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le groupe électrogène. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible,
- Les batteries doivent avoir une grande capacité,
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un groupe électrogène à courant alternatif, car la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur,
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

I.3.2 Système hybride à configuration alternatif (AC)

Dans cette configuration, les sources d'énergies à CA sont interconnectées directement sur le bus de courant alternatif. Les sources sont liées au bus à courant alternatif à travers un onduleur. Les systèmes de stockage sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.

Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le bus à courant alternatif couvre la consommation électrique et participe dans le chargement des systèmes de stockage, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les systèmes de stockage. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la figure suivante [11].

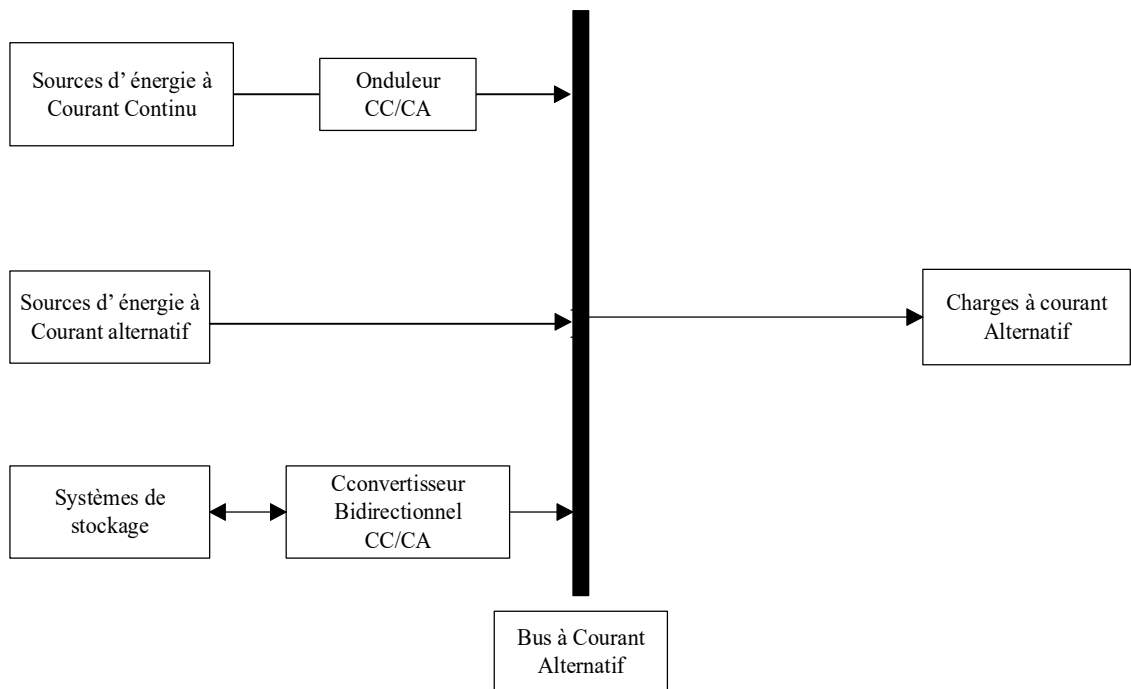


Figure I.3: Système hybride à configuration AC.

Avantages

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps,
- Un meilleur rendement, car les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par les sources Alternatives,
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride,
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

Inconvénient

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système,
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec les sources à courant alternatif (Groupe électrogène) soit possible,

- Les batteries vieillissent rapidement (mauvais contrôle de sa charge),
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié,

I.3.3 Système hybride à configuration CC-CA

La charge peut être alimentée soit par la source Alternative, soit par les sources à CC et le système de stockage via l'onduleur. L'alimentation par les deux sources simultanément n'est pas possible. Le schéma du système est présenté sur la figure suivante.

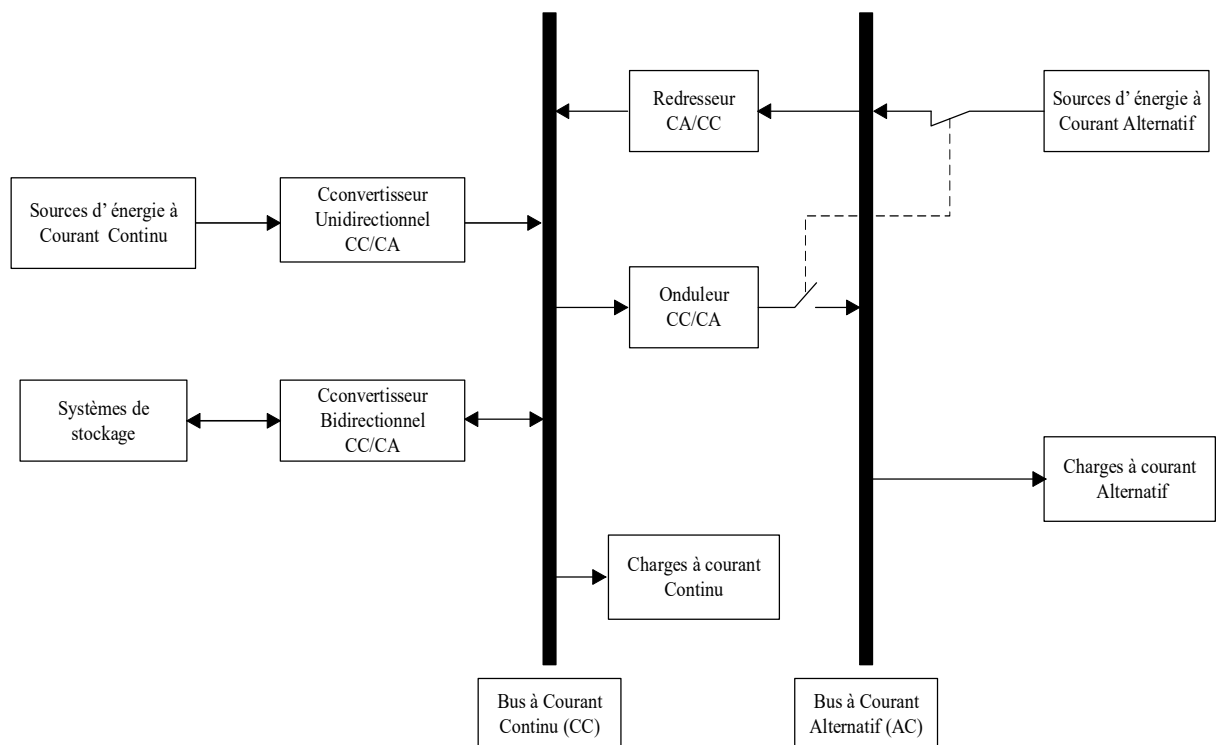


Figure I.4: Système hybride a configuration CC-AC.

La source à CA peut charger les systèmes de stockage par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride [12]

Avantage

- Le système possède un rendement plus haut, car la source à CA (GE) peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de carburant,
- L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur,
- Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le groupe électrogène.

Inconvenant

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources,
- La source alternative et l'onduleur doivent être dimensionnés pour une consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors des périodes de faible charge,
- Une construction complexe.

I.3.4 Description du système hybride étudié

Dans ce travail nous avons étudié l'hybridation de deux sources d'énergies, la première source principale est à base des modules photovoltaïques, la deuxième source est une source secondaire de stockage rapide à base des super condensateurs qui nous permet la récupération et la restitution de l'énergie avec une grande densité de puissance. Le système hybride (PV-SC) étudié est représenté dans la figure suivante :

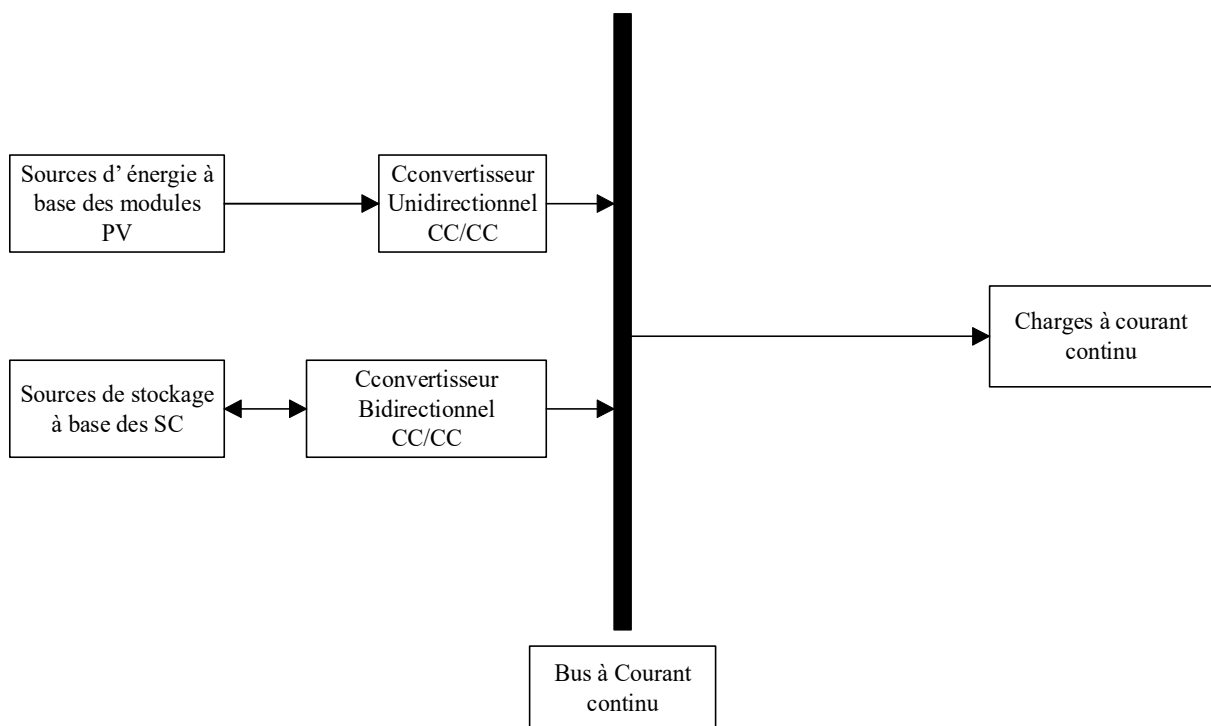


Figure I.5: système hybride étudié

La figure (I.5) décrit le comportement de système étudié, parmi ses composants un convertisseur CC-CC du type abaisseur associé avec la source principale (8 modules PV) afin d'assurer une tension continue constante de bus continue égale à 44V. et un convertisseur bidirectionnel en courant associé avec la source auxiliaire (pack SC) afin de fournir et récupérer l'énergie de bus continue en assurant une tension constante de bus égale à

40V (tension fournie par le pack SC). Le bus continu qui alimente la charge qui peut être un moteur, pour simplifier l'étude nous avons utilisé deux résistances en parallèle. Le schéma synoptique du système est représenté dans la (figure I.6) :

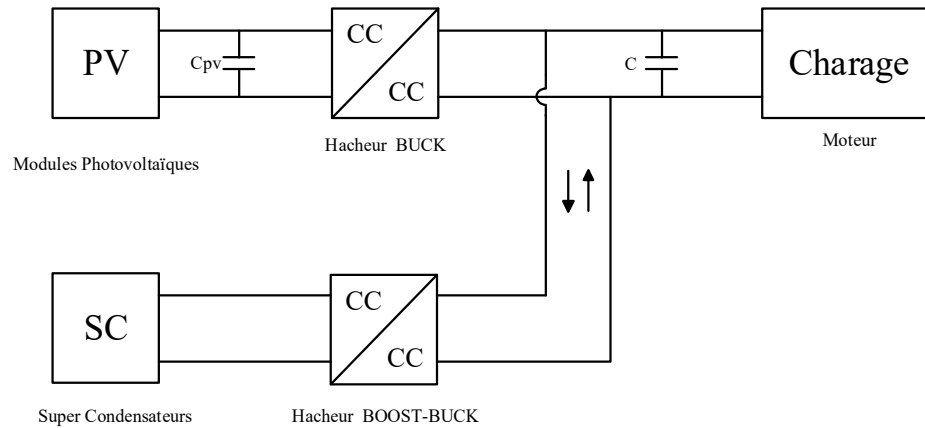


Figure I.6 : Schéma synoptique du système hybride étudié.

I.5 Conclusion :

Tenu compte la situation énergétique actuelle, il devient primordial d'apprendre à consommer plus efficacement l'énergie. L'utilisation de sources d'énergies renouvelables nécessite le choix d'une architecture hybride appropriée.

Dans ce chapitre nous avons représenté l'architecture du système hybride à base des énergies renouvelables retenu dans la suite de notre travail afin d'étudier et dimensionner les différents composants (PV, SC, convertisseur de puissance) qui constituent le système choisit.

Chapitre II

**Systemes photovoltaïques et le convertisseur
CC/CC qui lui est associé**

II.1 Introduction

Les panneaux solaires sont des sources renouvelables d'électricité utilisés majoritairement pour alimenter en électricité des sites isolés, et difficiles d'accès par exemple des régions montagneuses. Dans ces cas, il est intéressant d'installer des panneaux solaires car ceux-ci ne demandent que très peu, voir aucun entretien. Les installations qui peuvent être raccordées au réseau sont composées de modules solaires, constitués eux même de cellules photovoltaïques. Ces générateurs transforment directement l'énergie solaire en courant continu. Dans certain cas, on ajoute à l'installation des unités de stockage qui permet de stocker l'énergie, dans notre étude on doit déterminer le convertisseur CC/CC qu'il l'on doit associes également avec la source principale, ce dernier représenter par un système PV.

II.2 Générateurs photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur qui peut convertir l'énergie solaire en courant électrique continu à travers l'effet photovoltaïque. Cette cellule est constituée d'au moins deux couches de matériau semi-conducteur. Une couche a une charge positive et l'autre de charge négative. Lorsque la lumière pénètre dans cette cellule, une partie des photons de la lumière sont absorbés par les atomes du semi-conducteurs, en libérant des électrons de la couche négative pour s'écouler à travers un circuit externe et à l'arrière dans la couche positive. Ce flux d'électrons produit un courant électrique. La (figure II.1) montre une construction d'une cellule photovoltaïque [13].

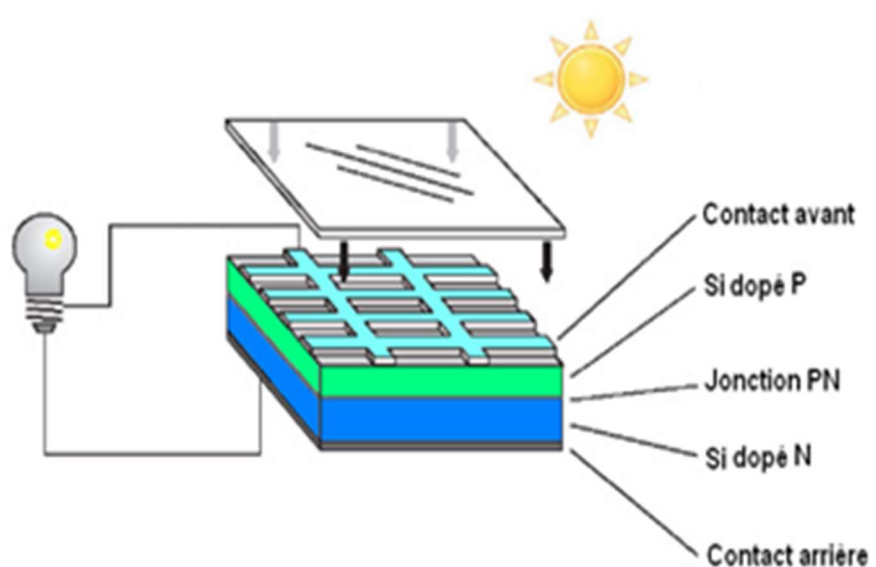


Figure II.1: Structure basique d'une cellule photovoltaïque.

Plusieurs types de cellules sont utilisés ou sous étude, elles comprennent du silicium monocristallin, du silicium polycristallin, du silicium amorphe (a-Si), de l'arséniure de gallium (GaAs), du tellure de cadmium, ou une combinaison de deux matériaux ou plus dans une cellule composée [14].

II.4 Différents type de technologies de cellules photovoltaïques

II.4.1 1^{ère} génération : Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99% de Silicium.

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure comme représenter la (Figure II 2), Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens). Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes.

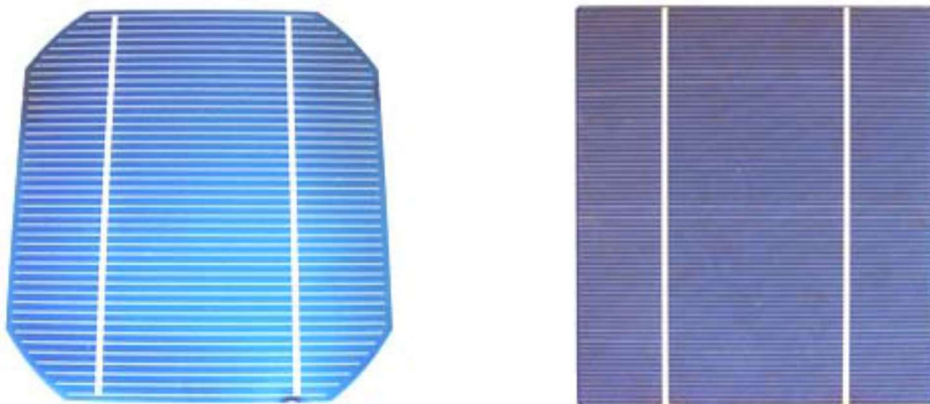


Figure II.2: cellule mono cristalline et poly cristalline .

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés [15]

II.4.2 2^{ème} génération : silicium amorphe et microcristallin

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe α Si et microcristallin

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% (α Si) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules).

A noter que le tellurure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut –tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire. L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV [15].

II.4.2.1 Les cellules en couches minces

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique, d'acier... Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est de l'ordre de 5 à 13 %).

Les cellules en couches minces les plus répandues sont en silicium amorphe, composées de silicium projeté sur un matériel souple.

La technologie des cellules en couches minces connaît actuellement un fort développement, sa part de marché étant passée de 2 %, il y a quelques années, à plus de 10 % aujourd'hui [16].

II.4.2.2 Les cellules à concentration

Elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé, de l'ordre de 20 à 30 %, mais elles doivent absolument être placées sur un support mobile afin d'être constamment positionnées face au soleil [16].

II.4.2.3 Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères

Ces technologies apparues dans les années 1990, ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Ils bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans).

En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire.

Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité et l'encapsulation doivent encore être réalisés [16].

On peut résumer les caractéristiques de différentes cellules les plus utilisables dans le tableau suivants :

Tableau II.1: Caractéristiques des cellules PV.

Type de cellules	Caractéristiques
- Cellule mono-cristallines	-Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire). -Une méthode de fabrication laborieuse et difficile et très chère. -Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- Cellule poly-cristallines	-Coût de production moins élevé. -Procédé nécessitant moins d'énergie. -Rendement 11-13% (18% en Labo).
- Cellule amorphes	-Coût de production bien plus bas. -Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) -Durée de vie plus faible.
- Cellule nanocristallines	-Une des dernières générations de photopiles -Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques. -Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire. -Procédé et coût de production encore plus bas.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

II.5 Les modules solaires photovoltaïques

Les cellules photovoltaïque sont connectées en série afin d'augmenter la tension d'utilisation. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 V et

les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [18]. Pour augmenter la tension d'un générateur photovoltaïque, il faut un groupement de N_S cellules en série. Ces dernières sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure II.3). L'équation (II.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_S cellules.

$$\begin{cases} V_{CO}(N_S \text{ cellules}) = N_S \times V_{CO} \\ I_{CC} = I_{CC}(N_S \text{ cellules}) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

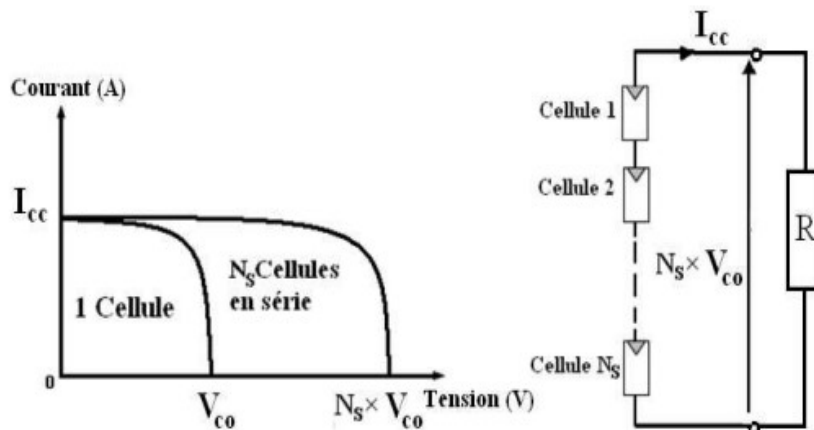


Figure II.3: Caractéristiques résultantes d'une association de N_S cellules en série.

Pour accroître le courant de sortie d'un générateur photovoltaïque alors il est nécessaire d'associer N_P cellules en parallèle. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du (Figure II.3): Caractéristiques résultantes d'une association de N_S cellules en série groupement est obtenue par addition des courants (Figure II.4). L'équation (II.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_P cellules.

$$\begin{cases} V_{CO}(N_S \text{ cellules}) = N_S \times V_{CO} \\ I_{CC} = I_{CC}(N_S \text{ cellules}) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

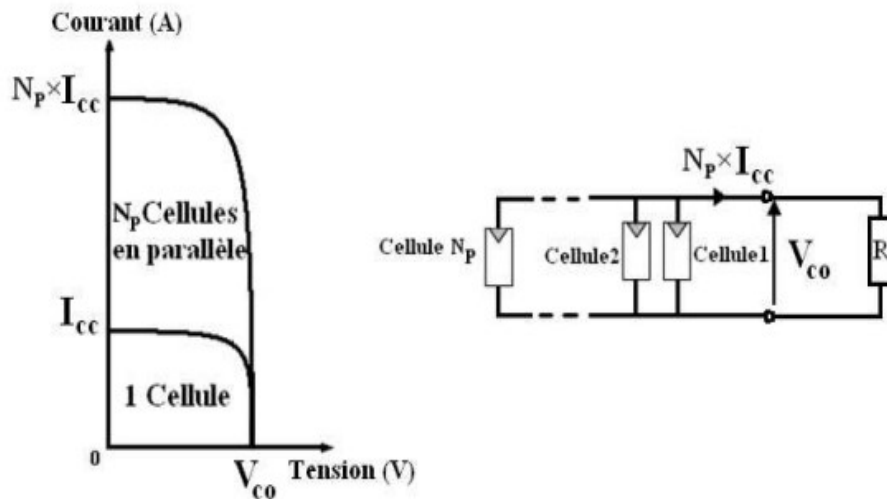


Figure II.4: Caractéristiques résultantes d'une association de N_P cellules en parallèle.

L'association d'un réseau de $N_S \times N_P$ cellules photovoltaïques en série/parallèle permet la représentation de la caractéristique $I(V)$ d'un générateur. Cette caractéristique peut, en outre, varier en fonction de l'ensoleillement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Ainsi, une cellule faiblement éclairée produira un courant inférieur au courant débité et devient un élément récepteur. Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. Des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux pour éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Ainsi, plusieurs types de protections sont utilisés dans les installations actuelles afin de garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années. [13][17].

II.6 Protections d'un générateur photovoltaïques

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [19] :

La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les générateur PV (diode anti-retour). - la protection lors de la mise en série de modules

PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

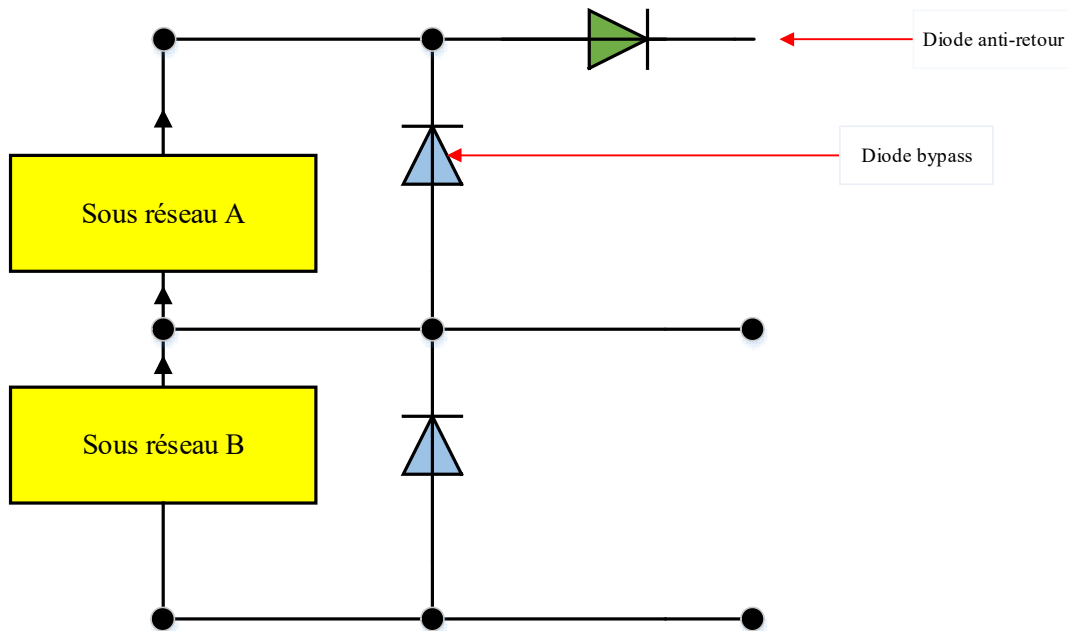


Figure II.5: schématisation de générateur PV avec diode anti retour et diode by-pass.

II.7 Modèle des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (Figure II.6).

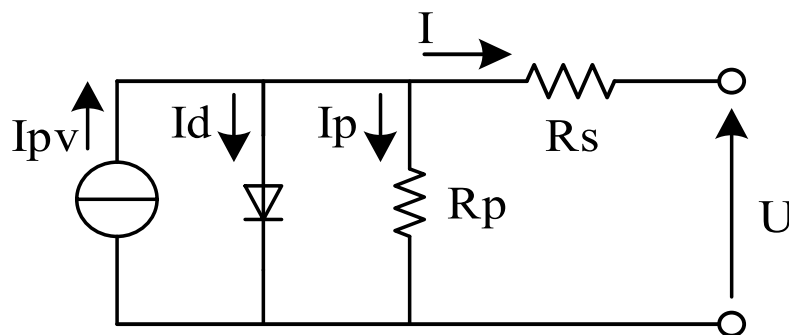


Figure II.6: Schéma électrique équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque.

Dans le modèle à « une seule diode » d'une photopile (Figure II.6) la résistance série R_s est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts en face avant et arrière. La résistance shunt R_p est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques ou

des prises de contact sur la face diffusée de la cellule La caractéristique courant-tension I-U d'une photopile réelle est dérivée de l'équation (1) :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (\text{II.3})$$

Où :

- I_{pv} est le photo-courant de la cellule, proportionnel à l'éclairement G ,
- I_d est le courant de diode,
- I_p est le courant dérivé par la résistance shunt,

Les différents composants de l'équation (II.3) sont représentés dans la (figure II.7)

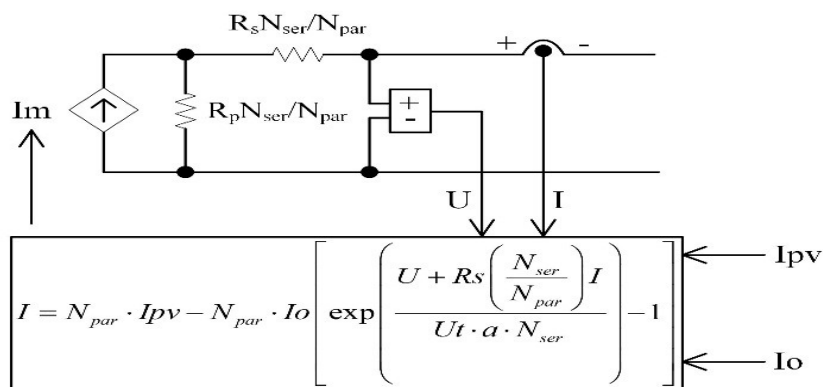


Figure II.7: Modèle photovoltaïque en circuit composé de $N_{ser} \times N_{par}$ modules.

Avec :

- R_s : est la résistance série équivalente de la photopile (en Ω);
- R_p : est la résistance parallèle équivalente (en Ω);
- $U_t = N_s \cdot K \cdot T / q$ est le potentiel thermique du module photovoltaïque pour N_s cellules connectées en série ;
- N_{ser} et N_{par} sont respectivement le nombre de modules photovoltaïques en série et en parallèle ;
- a : est la constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

Le courant "photo-généré" de la cellule photovoltaïque dépend directement de l'irradiance solaire et est proportionnelle à la température d'après l'équation suivante. (II.3) et (II.4):

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.4})$$

Où :

- $I_{pv,n}$ (en A) est le photo-courant dans les conditions normalisées de test (STC) des modules photovoltaïques (un éclaircissement de 1000 W/m^2 , une masse atmosphère 1,5 AM et une température de cellule de 25°C).
- $\Delta T = T - T_n$, T et T_n étant respectivement les températures réelle et nominale (en K).

$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_i \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{U_{co,n} + K_v \cdot \Delta T}{a \cdot U_t}\right) - 1} \quad (\text{II.5})$$

Avec

K_i et K_v sont les coefficients de courant et de tension respectivement

Les paramètres des cellules photovoltaïques sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II.2: Paramètres du module photovoltaïque Isofotón (I-130 S/24) à 25°C , 1.5AM, 1000W/m^2 .

I_{mp}	3,76 A
U_{mp}	34,6 V
$P_{max,m}$	130 W
$I_{sc,n}$	4.5 A
$U_{co,n}$	43,2 V
$I_{pv,n}$	4,681 A
A	1,3
R_p	240 Ω
R_s	0,97 Ω
K_v	$-149 \cdot 10^{-3} \text{ V/K}$
K_i	0 A/K
N_s	72

La simulation sous Matlab/Simulink des 8 modules photovoltaïques misent en parallèles $N_{par}=8$ avec $N_{ser}=2$ et donnent les résultats suivantes (Figure II.8.a) et (Figure II .8.b).

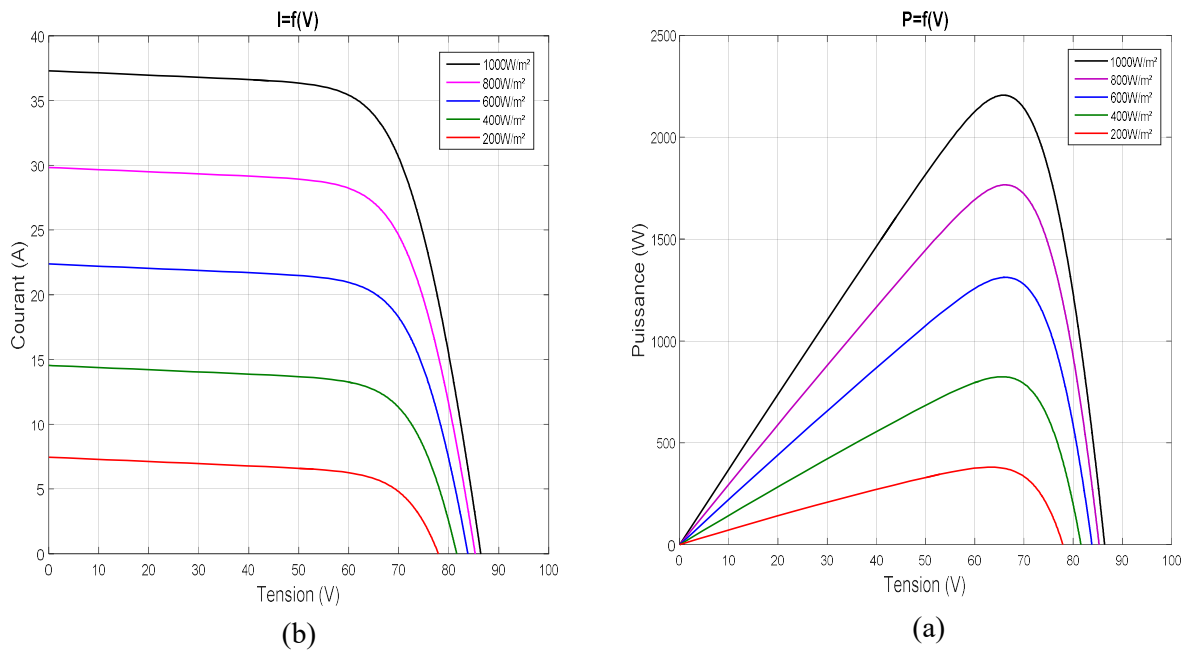


Figure II.8: Courant et puissance de 8 modules photovoltaïques mit en parallèles en fonction de la tension.

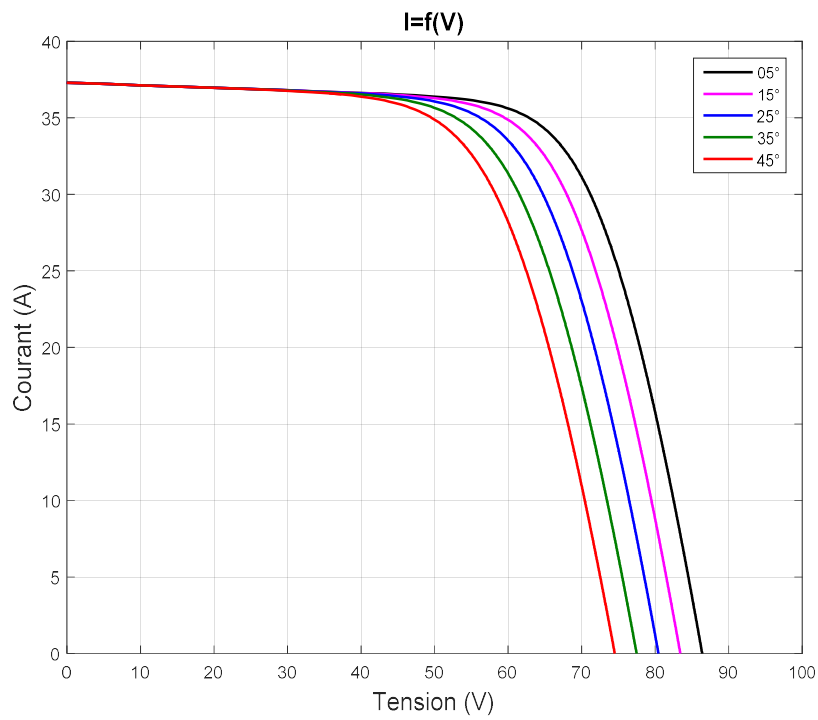


Figure II.9: La caractéristique I-V du module PV selon la température.

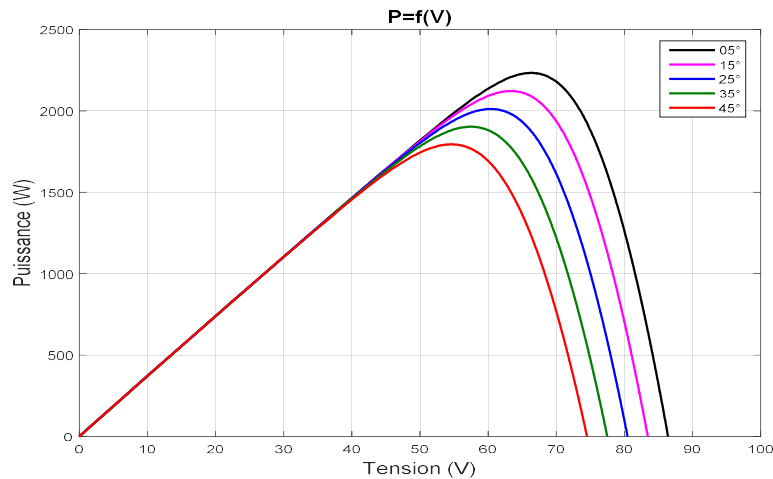


Figure II.10: Caractéristique P-V du module PV selon la température.

L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire. D'où, l'importance de la connaissance de l'influence de l'éclairement et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'ils sont exposés au rayonnement solaire [20].

II.8 Convertisseur CC/CC abaisseur associé avec le système PV

II.8.1 Hacheur série (BUCK)

II.8.1 Définition

Le hacheur série est un convertisseur direct CC–CC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. Dans notre cas L'interrupteur k_1 est un transistor de type MOSFET et les commutations peuvent être commandées (au blocage et à l'amorçage), et l'interrupteur k_2 est une diode de roue libre pour permettre une conduction continu du courant stocké dans l'inductance lorsque k_1 est ouvert. La capacité C_{pv} et C [21].

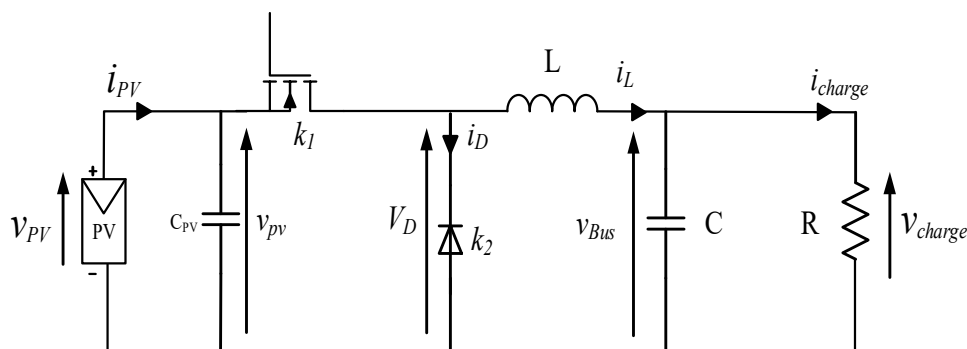


Figure II.11: Schéma électrique de hacheur BUCK.

II.8.3 Fonctionnement

L'interrupteur k_1 est fermé pendant la fraction uT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers l'inductance L . Lors du blocage du MOSFET, la diode k_2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

Pour avoir une conduction continue les inductances et les capacités doivent être dimensionnées. En se basant sur le principe de fonctionnement décrit précédemment le modèle instantané de hacheur Buck peut être donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_{bus} + u \frac{v_{pv}}{L} \\ \frac{dv_{bus}}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_{bus} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Les formes d'ondes du courant et de la tension dans la diode l'inductance et la MOSFET respectivement en mode de conduction continue sont représentées à la (Figure II.12).

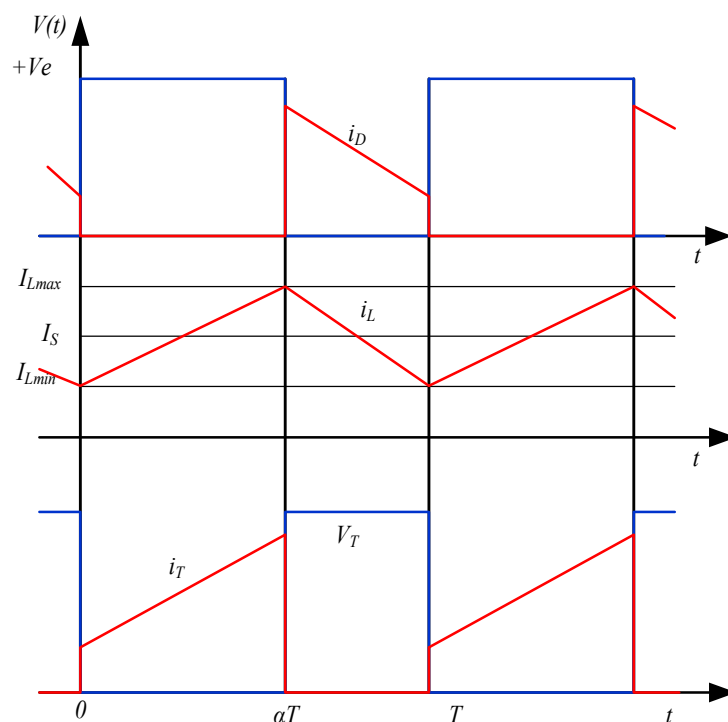


Figure II.12 : Formes d'ondes du hacheur de type BUCK .

II.8.4 Modèle Simulink de MATLAB

La simulation du hacheur Buck donner par le système d'équations (II.5) et représenté par la figure sous le logiciel MATLAB/SIMULINK permet de trouver les résultats suivants :

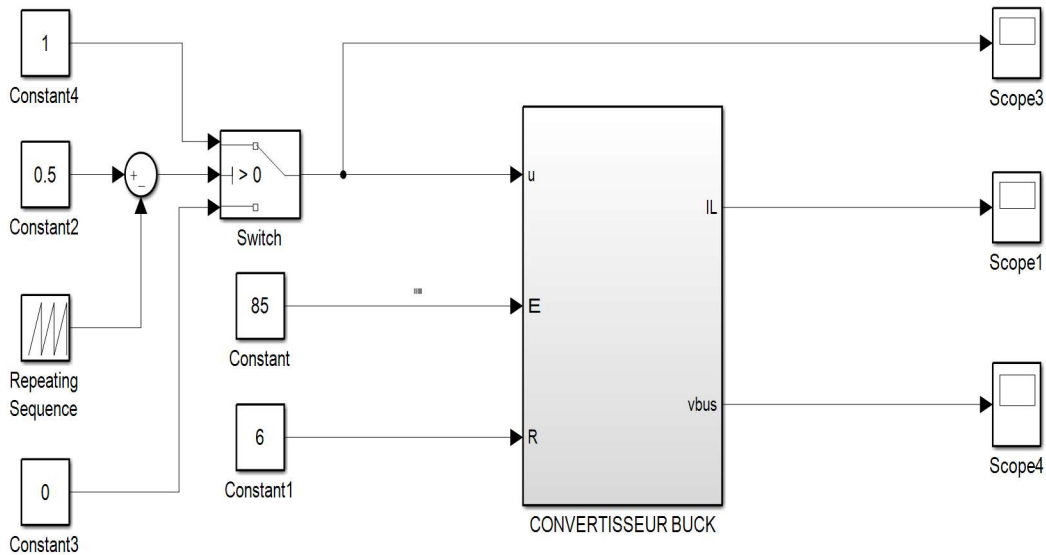


Figure II.13: Schéma du convertisseur BUCK sous Matlab/Simulink®.

Afin d'assurer une conduction continue en tension et en courant du hacheur le dimensionnement du filtre LC est assuré en utilisant les équations suivantes [22] :

$$\begin{cases} L = \frac{v_0(1-D) \cdot T_s}{\Delta I_L} \\ C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta v_0 \cdot f} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Tableau II.3: Simulation courant(A) et tension(U) de convertisseur buck avec variation de μ

	Courant(A)	Tension(V)	MLI
$\mu=0.3$	<p>Courant de l'inductance</p> <p>Courant (A)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>Tension de Bus</p> <p>Tension (V)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>La porteuse</p> <p>MLI</p> <p>Temps (s) $\times 10^{-3}$</p>
$\mu=0.5$	<p>Courant de l'inductance</p> <p>Courant (A)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>Tension de Bus</p> <p>Tension (V)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>La porteuse</p> <p>MLI</p> <p>Temps (s) $\times 10^{-3}$</p>
$\mu=0.7$	<p>Courant de l'inductance</p> <p>Courant (A)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>Tension de Bus</p> <p>Tension (V)</p> <p>Temps (s)</p>	<p>La porteuse</p> <p>MLI</p> <p>Temps (s) $\times 10^{-3}$</p>

Après avoir les résultats de simulation (Tableau II.3) et faire comparer chaque une avec les autres on remarque que ; lorsque la valeur de rapport cyclique μ diminué la valeur de courant et de tension augmenté c'est-à-dire on peut modifier et contrôler la valeur de courant ou de tension de système par la variation de la valeur de rapport cyclique μ .

II.9 Adaptation de la tension de sortie du système PV à celle de Bus continu

Afin d'adapter la tension à la sortie des modules photovoltaïques à celle du bus continu on va utiliser un convertisseur CC-CC buck.

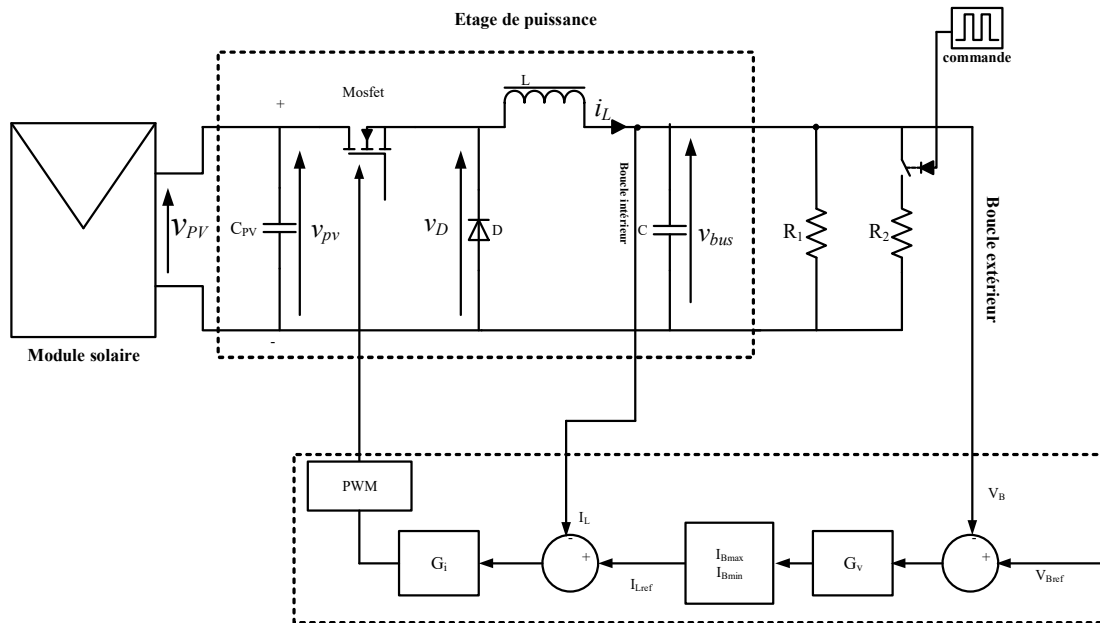


Figure II.14: Boucles de régulation du de la tension du bus continu.

En utilisant ces deux fonctions de transferts on peut dimensionner le régulateur de courant $G_i(s)$ et le régulateur de tension $G_v(s)$.

$$G_i(s) = \frac{K_{ii} + K_{ip}s}{s} \quad (II.7)$$

$$G_v(s) = \frac{K_{vi} + K_{vp}s}{s} \quad (II.8)$$

En utilisant la méthode essai et erreur qui est une méthode très utilisé dans l'industrie on a trouvé les paramètres des régulateurs suivantes :

$$K_{ip}=0.002, K_{ii}=0.08, K_{vp}=0.14, K_{vi}=4.$$

Les résultats de simulation du système (PV, convertisseur CC-CC, système de contrôle, charge) sont représentés dans les figures suivantes :

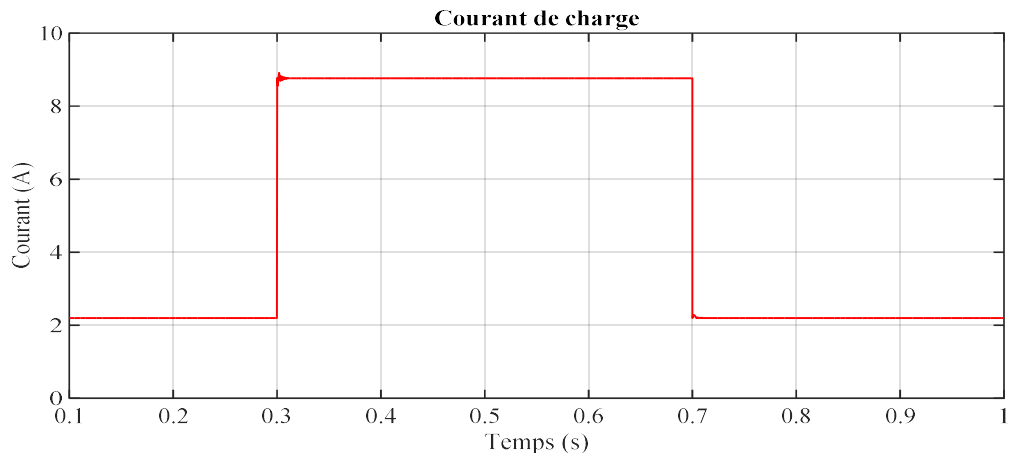


Figure II.15 : Courant de charge

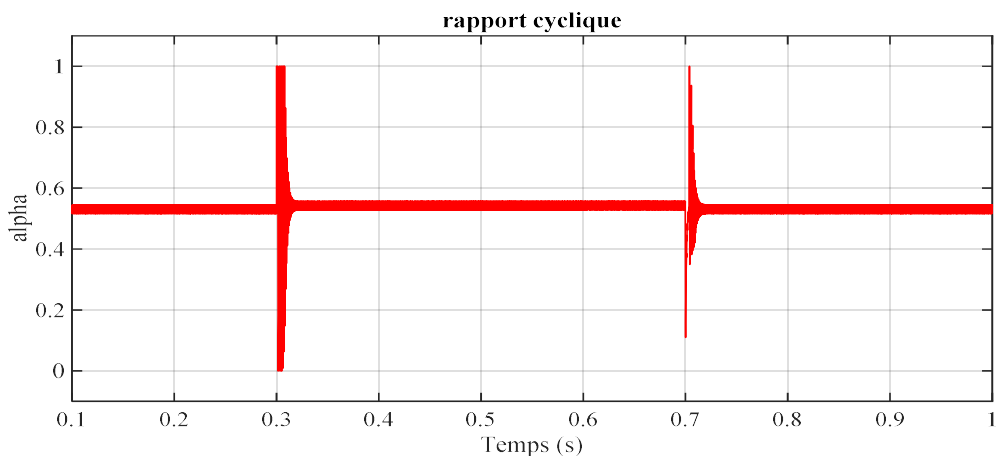


Figure II.16 : rapport cyclique

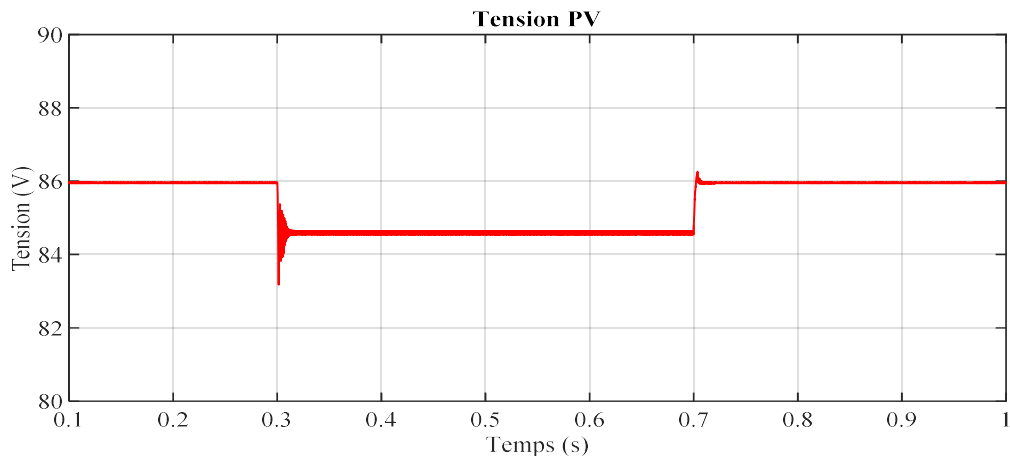


Figure II.17 : Tension à la sortie des modules PV

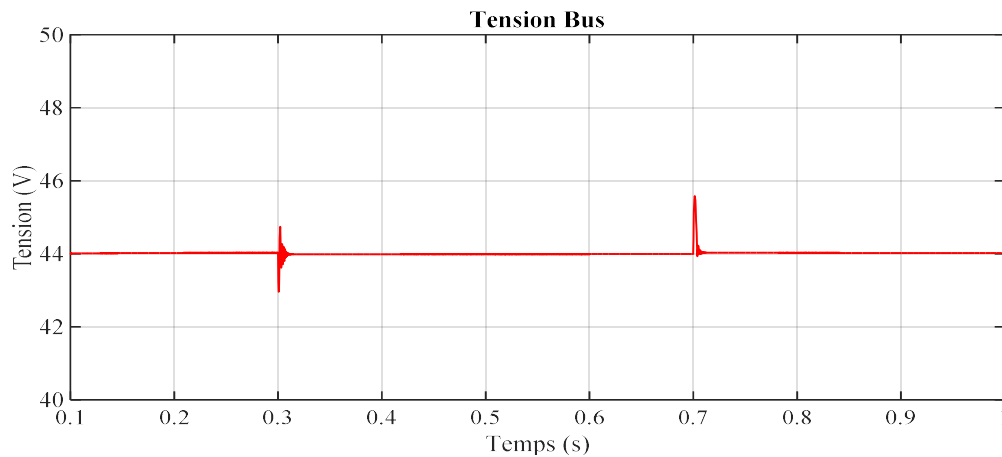


Figure II.18 : Tension du bus continu.

D'après la (figure II.16) :

- Dans la première phase (0.1s-0.3s) le courant de charge est stable à la valeur (2.1 A) c'est le pack SC qui alimenté la charge.
- Dans la deuxième phase (0.3s-0.7s) le courant augmente jusqu'à atteindre la valeur (8.9) c'est la source à base d'énergie renouvelable qui alimente la charge et au même temps recharger le pack SC.
- Dans la troisième phase (0.7s-1s) le retour de courant a sa valeur initiale, la perte de réseau (à base d'énergie renouvelable) et le pack SC qui alimenté la charge.

D'après la (figure II.18) ; lorsque la charge varie on voit bien que la tension de bus est bien réglée à 44 V qui montre les bonnes performances des régulateurs proposés.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu le coût et le rendement des différents types de PV.

L'interconnexion des cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement, ainsi nous avons étudié le convertisseur CC/CC qu'il l'on doit associer également avec les modules PV.

Ensuite nous avons présenté des résultats de simulation sous logiciel MATLAB/SIMULINK de système composé par (les modules PV, convertisseur Buck, boucles de contrôles)

Chapitre III

Modelisation des Super Condensateurs

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation sous Matlab/Simulink du super condensateur (SC) et du convertisseur que nous lui avons associé dans notre application. Ce dernier est un convertisseur CC-CC bidirectionnel en courant afin de permettre le contrôle des flux énergétiques dans les deux sens.

Concernant le SC, il est très important pour nous de bien choisir un modèle équivalent parmi ceux qui sont proposés dans la littérature qui convient dans notre application. Dans cette optique, nous allons commencer par présenter le principe de fonctionnement et la physique assez particulière des SCs. Ensuite, plusieurs modèles des super condensateurs sont proposés afin de choisir, celui dont le degré de complexité ne pénalise ni la fidélité (précision du modèle), ni l'accessibilité (détermination et mesure des paramètres du modèle), ni l'exploitation (utilisation et intégration du modèle dans les outils et supports de simulation propre à notre application).

III.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs

III.2.1. Principe fondamental

Les super condensateurs ont un fonctionnement identique à celui des capacités électrostatiques classiques, ils reposent sur le concept de la double couche (figure III.1). Ils sont typiquement constitués d'un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) placé entre deux électrodes (conductrices électroniques).

L'application d'une différence de potentiel entre leurs deux électrodes induit le déplacement des ions positifs ou négatifs dans l'électrolyte et permet de former au voisinage de l'interface électrode-électrolyte de chaque côté une accumulation de charges électriques, comme indiqué dans la (figure III.1) [22].

On appelle capacitance ou capacité, le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée, elle représente l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base pour une capacité linéaire sont données par les équations suivantes :

$$C = \frac{Q}{U} = \epsilon \frac{S}{e} \quad (\text{III. 1})$$

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{III. 2})$$

Avec : C étant la capacitance, Q la charge électrique, U la tension appliquée, ε la constante diélectrique du matériau isolant, S sa surface, e son épaisseur, et E l'énergie électrostatique stockée.

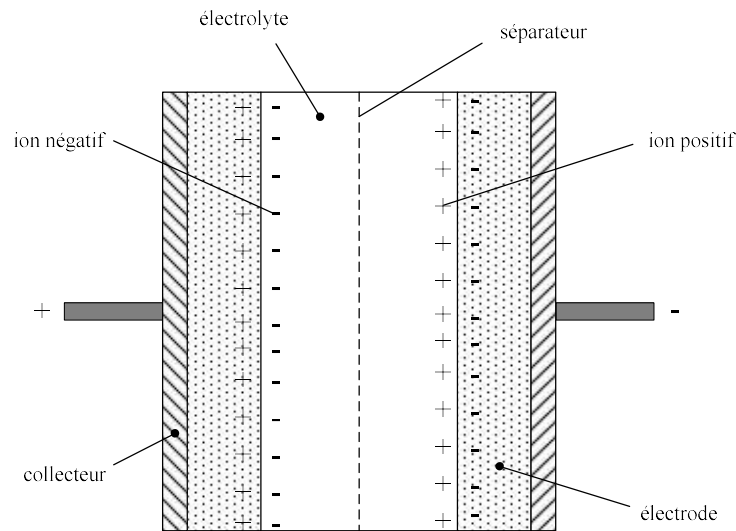


Figure III.1: Structure interne d'un super condensateur.

Un super condensateur est composé donc, comme schématisé en (figure III.1), de deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, et séparées par une membrane isolante et poreuse (pour assurer la conduction ionique). La couche double électrique se développe sur chaque interface électrode-électrolyte, de sorte que l'on peut voir, de façon simplifiée, un super condensateur comme l'association série de deux capacités (figure III.2): l'une, C_1 développée à l'électrode positive, et l'autre C_2 à l'électrode négative.

La capacité totale C est alors calculée comme étant la mise en série de deux capacités C_1 et C_2 , (figure III.2), [22]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (\text{III. 3})$$



Figure III.2: Circuit équivalent simplifié d'un super condensateur.

III.2.2. Différents types de super condensateurs

La nature du matériau utilisé pour les électrodes divise les super condensateurs (SCs) en deux familles [23]:

- Les SCs électrostatiques: dans ce type de condensateurs, le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé, qui est la technologie d'électrode la plus répandue car elle permet une puissance spécifique élevée (plusieurs kW.kg⁻¹), une durée de vie théoriquement infinie (plus de 100000 cycles de charge-décharge en pratique).
- Les super condensateurs électrochimiques combinent entre le fonctionnement des super condensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs. Leurs électrodes sont en effet susceptibles de subir des réactions redox réversibles et donc de mettre en œuvre, en plus des processus électrostatiques, des processus faradiques. Selon la nature des matériaux d'électrodes, les super condensateurs électrochimiques peuvent être classés en deux familles: les super condensateurs à base d'oxydes métalliques et les super condensateurs à base des polymères conducteurs [24].

On peut aussi différencier les SCs par:

- Leurs électrolytes, qui conditionnent la tenue en tension du dispositif, et donc leurs énergies spécifiques et leurs puissances spécifiques. On trouve deux types d'électrolyte pour super condensateurs: les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse, et les électrolytes organiques, tels que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile.
- Leurs séparateurs (membrane isolante poreuse), qui permettent de séparer les deux électrodes imprégnées d'électrolyte, on utilise généralement un polymère ou du papier en milieu organique, une céramique ou de la fibre de verre en milieu aqueux.

III.2.3. Modélisation et caractérisation des super condensateurs

III.2.3.1 Modélisation des super condensateurs

La modélisation des super condensateurs permet de prévoir leur comportement dans différentes applications à partir d'une représentation des principaux phénomènes physiques apparaissant au sein du composant. Les modèles de super condensateur peuvent être classés en trois catégories:

- Les modèles électrochimiques "microscopiques": ils représentent d'une manière locale les phénomènes mis en jeu [25-26].
- Les modèles fréquentiels: ils sont basés sur l'utilisation de la réponse fréquentielle du dispositif [25-26].

- Les modèles de type circuit électrique, dits "macroscopiques": ils représentent les phénomènes d'une manière plus globale. Dans notre travail, nous utilisons ce type de modèles car il s'intègre naturellement dans notre système électrique, de plus les caractéristiques requises sont électriques.

Nous présentons sommairement dans le paragraphe suivant quelques généralités sur les deux méthodes de caractérisation des SCs (qui ne sont pas l'objectif principal de ce chapitre), ainsi que quelques modèles de type circuits électriques existants pour ce composant. Bien entendu, le but est de choisir un modèle qui se rapproche le plus possible de la réalité et qui est moins gourmand en temps de calcul afin de ne pas alourdir la simulation du modèle global de notre système du véhicule électrique hybride à pile à combustible.

III.2.3.2 Méthodes de caractérisation

Deux méthodes de caractérisation (caractérisation temporelle et caractérisation fréquentielle) sont utilisées afin d'une part, de déterminer les paramètres des modèles, et d'autre part, de comprendre le fonctionnement des super condensateurs et comparer les performances des différents modèles.

III.2.3.2.1 Caractérisation temporelle

Cette méthode consiste à identifier les paramètres du composant via des mesures temporelles du courant et de la tension. Elle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et de faire fonctionner l'élément à des niveaux de courant proches de la réalité. Par contre, elle ne permet pas d'identifier les différentes constantes de temps régissant le fonctionnement du super condensateur.

III.2.3.2.2 Caractérisation fréquentielle

La caractérisation fréquentielle consiste à appliquer au super condensateur une faible tension sinusoïdale superposée à une tension continue et à analyser la sortie en courant. La fréquence du signal sinusoïdal peut varier et ceci permet de déduire le comportement du super condensateur dans un domaine fréquentiel assez large autour d'un point de fonctionnement (tension, courant). Cette méthode est réalisée grâce à un appareil spécifique, dénommé "spectromètre d'impédance".

III.2.3.3 Choix d'un modèle

III.2.3.3.1 Modèle RC du constructeur

De par leur fonctionnement principalement électrostatique, les super condensateurs à double couche sont des dispositifs capacitifs. Pour cela on peut dans une première approximation modéliser un super condensateur par une capacité de stockage C en série avec une résistance R (Figure III.3). Les constructeurs utilisent généralement ce modèle simple dans les spécifications de leurs super condensateurs. Cependant, la physique associée au stockage d'énergie dans les super condensateurs fait apparaître des phénomènes que le modèle RC série n'est guère à même de décrire.

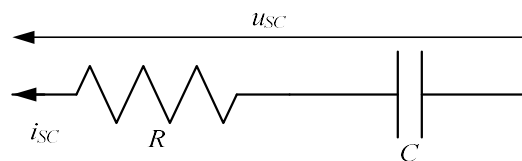


Figure III.3: Modèle constructeur d'un super condensateur.

Pour effectuer la caractérisation d'un élément super condensateur, des indications sur la procédure expérimentale peuvent être données par certains constructeurs (MAXWELL par exemple) [66]. Ainsi, la simulation sous le logiciel Matlab/Simulink de la charge/décharge d'un super condensateur en utilisant les paramètres du produit (PC 7223) [26], qui sont: $R = 0.85 \text{ m}\Omega$, $C = 2700 \text{ F}$, $I_{SCnom} = 400\text{A}$ et $U_{SCmax} = 2.7\text{V}$, a donné les résultats présentés en figure III.4. Cette figure présente la tension de charge et la tension de décharge, en appliquant deux échelons de courant; le premier est négatif et le deuxième est positif avec une amplitude de 100 A chacun pendant 60 secondes (le quart du courant nominal). A l'instant $t = 5\text{s}$, la tension de charge au bornes du SC augmente directement de 0 V à une valeur égale à $u_r = R \cdot i_{SC}$, puis elle augmente linéairement jusqu'à la fin du temps de charge associée à l'évolution de l'énergie à stocker dans l'élément capacitif, à l'instant $t = 65\text{s}$ lorsque le courant de charge atteint une valeur nulle la tension du SC chute d'une valeur égale à 2,307 V et se stabilise à une valeur égale à 2,222 V qui représente la tension de charge finale du SC. A l'instant $t = 125\text{s}$, la tension de décharge du SC chute directement par une valeur faible u_r puis elle chute linéairement jusqu'à la fin de temps de décharge, à l'instant $t = 185\text{s}$ le courant de décharge est égale à zéro et la tension du SC revient à une valeur presque nulle. Ce résultat montre que le temps de charge et de décharge d'un SC est très rapide (comparativement à celui des batteries d'accumulateurs), il est de l'ordre de 60 s en utilisant seulement un quart du courant de charge nominale de ce dernier.

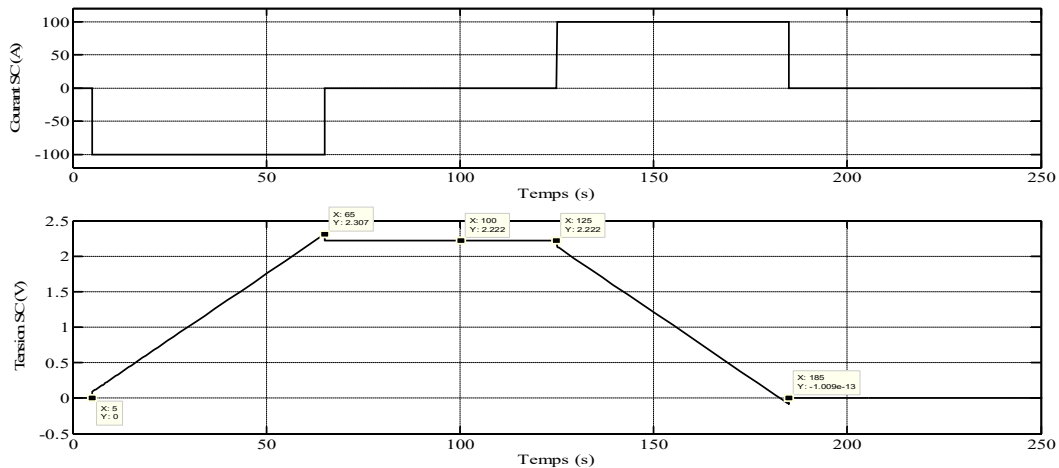


Figure III.4: Charge et décharge du super condensateur “PC 7223” avec un courant de 100A.

D'autre part, nous présentons en (figure III.5) les mêmes résultats (tensions de charge et de décharge de ce dernier), en appliquant deux échelons de courant ; le premier est négatif et le deuxième est positif avec une amplitude de 400 A (courant nominal) pendant 15 secondes. A partir de cette figure on peut confirmer que la charge et la décharge d'un super condensateur est très rapide (15 s environs). De ce fait, nous pouvons affirmer que les SCs sont très adaptés pour des applications de transfert d'énergie à fortes densités de puissance, ils conviennent donc très bien comme systèmes de stockage rapides dans des véhicules électriques hybrides à piles à combustible qui exigent de fortes densités de puissance.

Cependant, il y a lieu de noter que ce modèle ne tient pas compte de la variation de la résistance et de la capacité en fonction des contraintes électriques. Il n'est donc pas valable dans tous les domaines de courant et de tension, par conséquent nous n'allons pas nous contenter de ce modèle simple dans notre travail, d'autres modèles plus élaborés vont être étudiés dans les paragraphes suivants.

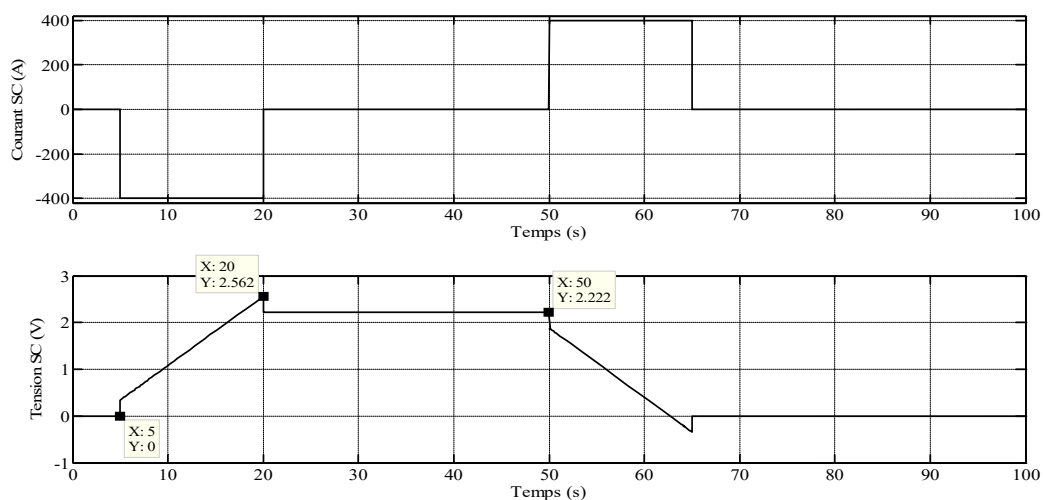


Figure III.5: Charge et décharge du super condensateur “PC 7223” avec un courant de 400A.

III.2.3.3.2 Modèle à deux branches

Afin de tenir compte de la variation de la capacité de stockage en fonction de la tension, un modèle à deux branches basé sur des considérations énergétiques est proposé par R. Bonert et L. Zubieta [27-28]. C'est un modèle qui repose sur la partition de l'énergie électrostatique en deux termes: une énergie rapidement stockée ou déchargée et une énergie lentement stockée ou déchargée. Ce modèle comporte donc deux branches RC (figure III.6) :

- La première branche (R_{b1} et C_{b1}) dite principale, tient compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge. La capacité C_{b1} est non linéaire afin de représenter la dépendance de la capacité à la tension (ou à la charge).
- La deuxième branche (R_{b2} et C_{b2}) dite lente, décrit la redistribution interne de l'énergie durant les phases de repos.

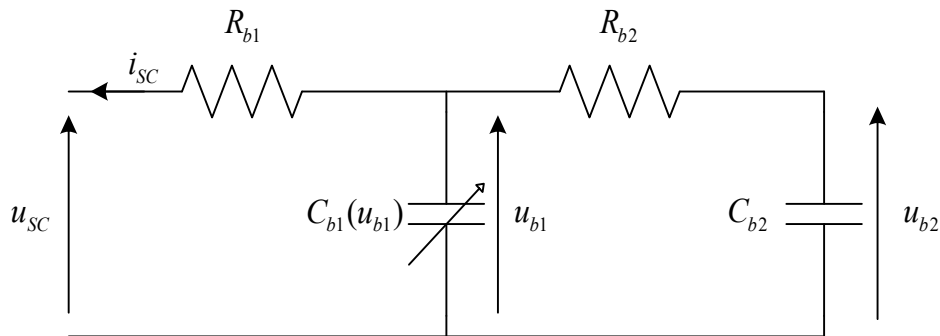


Figure III.6: Modèle à deux branches d'un super condensateur.

Il est important de rappeler que la capacité C_{b1} est variable en fonction de la tension u_{b1} , (figure III.6). Ce modèle représente correctement les phénomènes de charge et de décharge, ses paramètres sont identifiés à l'aide d'essais temporels [29-30].

La capacité de la branche principale est choisie variable en fonction de la tension à ses bornes, pour simplifier le modèle, la loi de variation adoptée étant linéaire:

$$C_{b1}(u_{b1}) = C_{b0} + C_{bv} \cdot u_{b1} \quad (\text{III. 4})$$

Pour la simulation sous Matlab/Simulink, nous avons utilisé les paramètres relatifs au super condensateur Maxwell PC7223 ci-dessous, ces paramètres sont identifiés à l'aide d'essais effectués par F. Belhachemi & all. [29-30]:

- Pour la branche principale: $R_{b1} = 0,8 \text{ m}\Omega$, $C_{b0} = 2030 \text{ F}$, $C_{bv} = 750 \text{ F.V}^{-1}$.
- Pour la branche lente: $R_{b2} = 1 \Omega$, $C_{b2} = 150 \text{ F}$.

La (figure III.7) montre la tension de charge suivie par la tension de décharge (SC PC7223) en utilisant le modèle à deux branches de la (figure III.6). À l'instant $t = 5s$, on charge le SC par un courant de $-100 A$ jusqu'à l'instant $t = 65s$, on remarque que la tension à la sortie du SC augmente rapidement avec une pente non linéaire causée par la première branche du SC. A l'instant $t = 65s$ le courant de charge du SC s'annule et la tension du SC est égale à $2,394 V$, cette dernière continue à diminuer malgré la nullité du courant de charge, elle atteint une valeur de $2,361 V$ à $t = 125s$, cette chute de tension est due à la deuxième branche dite lente qui décrit la redistribution interne de l'énergie durant les phases de repos. La même chose se reproduit mais dans le sens contraire lorsqu'on décharge le SC avec un courant égale $100 A$, en effet à l'instant $t = 125s$ le SC se décharge avec une pente non linéaire jusqu'à la fin de l'étape de décharge à $t = 185s$, à cet instant la tension du SC atteint une valeur égale à $(-0.08184V)$ et continue à augmenter jusqu'à $(-0.05128V)$, on remarque que la tension du SC ne revient pas rapidement au même point de départ.

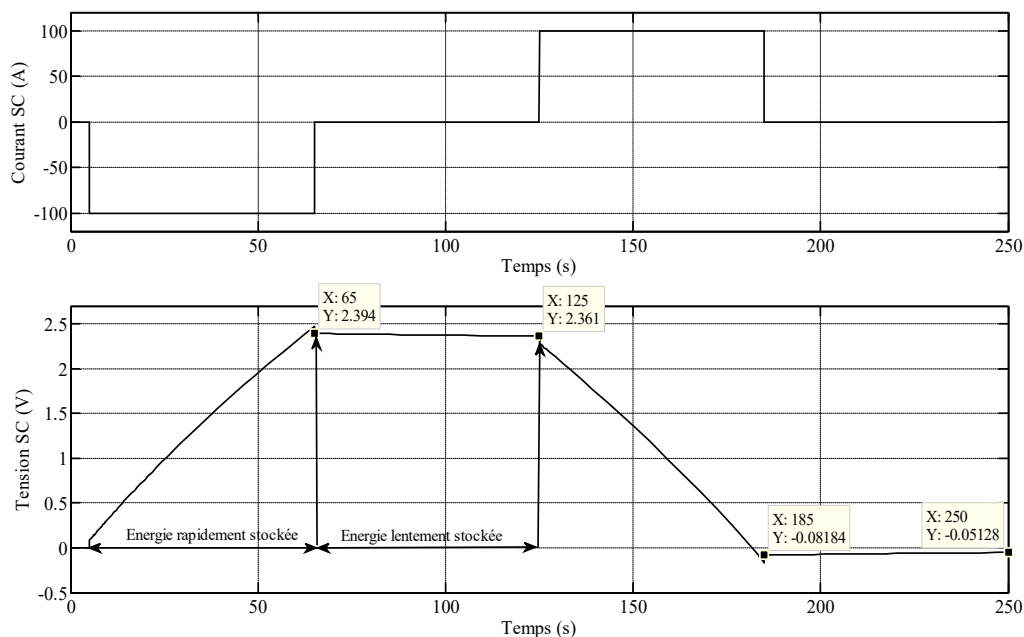


Figure III.7: Charge et décharge du SC PC7223 selon le modèle à deux branches avec un courant de 100A.

Note: Il y a lieu de noter qu'en pratique, la loi de variation non linéaire de la capacité principale (loi linéairement croissante) n'est physiquement pas conforme à ce que peut donner la théorie de la couche double qui prévoit une variation de la capacité beaucoup plus forte aux faibles potentiels qu'aux potentiels plus élevés [31-32], cet aspect fait défaut dans le modèle à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta dès lors que l'on s'écarte notablement des conditions expérimentales utilisées dans l'identification des paramètres du SC. Dans le paragraphe suivant

nous présentons le modèle multi branches proposé par F. Belhachemi [29-30] dans le but d'améliorer la précision du modèle précédent à deux couches.

III.2.3.3 Modèle multi branche

F. Belhachemi améliora la précision du modèle à deux branches, par un modèle à plusieurs branches (Figure III.8), qui se compose de [29-33]:

- Une ligne de transmission non-linéaire de résistance totale R_t et de capacité totale C_t , permettant une description fine du comportement électrique et énergétique des super condensateurs dans les temps courts.
- Quelques branches RC pour bien représenter les phénomènes lents.

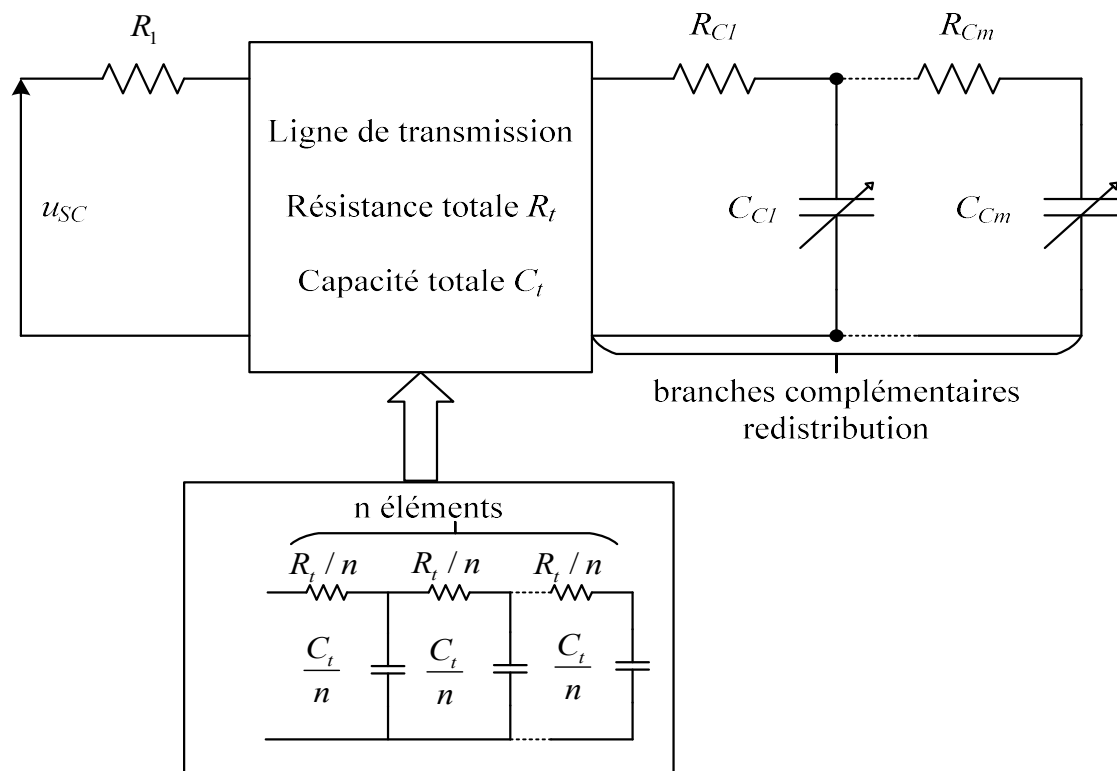


Figure III.8:Modèle énergétique multi branche d'un SC [29-33].

Dans le modèle donné en (figure III.8), les différents paramètres correspondent à:

- R_1 : Résistance d'accès à la ligne de transmission.
- R_t et C_t : Résistance totale et capacité totale de la ligne de transmission.
- n : Nombre d'éléments dans la ligne de transmission.
- C_{Cm} et R_{Cm} : Résistances et capacités des branches complémentaires.
- M : Nombre de branches complémentaires.

La détermination des valeurs des résistances et des capacités est effectuée en analysant la tension aux bornes du SC lors d'essais de charge suivie de décharge. Cette détermination est détaillée dans la thèse de Belhachemi [30] et les résultats trouvés sont résumés dans le (tableau III.1).

En utilisant les paramètres du (tableau III.1), nous avons simulé le fonctionnement du modèle énergétique multi branche de F. Belhachemi sous le logiciel Matlab/Simulink. Dans un premier temps nous avons utilisé un modèle avec trois ($n = 3$) éléments dans sa ligne de transmission et deux éléments dans ses branches complémentaires et dans un deuxième temps nous avons utilisé un modèle avec quinze éléments dans la ligne de transmission en gardant les mêmes éléments dans les branches complémentaires, les résultats de simulation sont donnés dans les figures III.9 et III.10 respectivement.

Tableau III.1: Paramètres du SC PC7223 selon le modèle énergétique de F. Belhachemi [30].

	ligne de transmission	branche (R_{C1}, C_{C1})	branche (R_{C2}, C_{C2})
Résistances	$R_t = 1,1 \text{ m}\Omega$	$R_{C1} = 100 \text{ m}\Omega$	$R_{C2} = 1 \Omega$
capacités (F) pour $u \in [0 \text{ V}, 0,5 \text{ V}]$	$C_t = 2000 + 700.u$	$C_{C1} = 90 + 30.u$	$C_{C2} = 31 + 11.u$
capacités (F) pour $u \in [0,5 \text{ V}, 1 \text{ V}]$	$C_t = 2350 + 700.(u - 0,5)$	$C_{C1} = 105 + 30.(u - 0,5)$	$C_{C2} = 36,5 + 11.(u - 0,5)$
capacités (F) pour $u \in [1 \text{ V}, 1,5 \text{ V}]$	$C_t = 2700 + 500.(u - 1)$	$C_{C1} = 120 + 22.(u - 1)$	$C_{C2} = 42 + 8.(u - 1)$
capacités (F) pour $u \in [1,5 \text{ V}, 2 \text{ V}]$	$C_t = 2950 + 200.(u - 1,5)$	$C_{C1} = 131 + 5.(u - 1,5)$	$C_{C2} = 46 + 3.(u - 1,5)$
capacités (F) pour $u > 2 \text{ V}$	$C_t = 3050$	$C_{C1} = 133,5$	$C_{C2} = 51$
résistance d'accès à la ligne (mΩ)	$R_l = 0.5$		

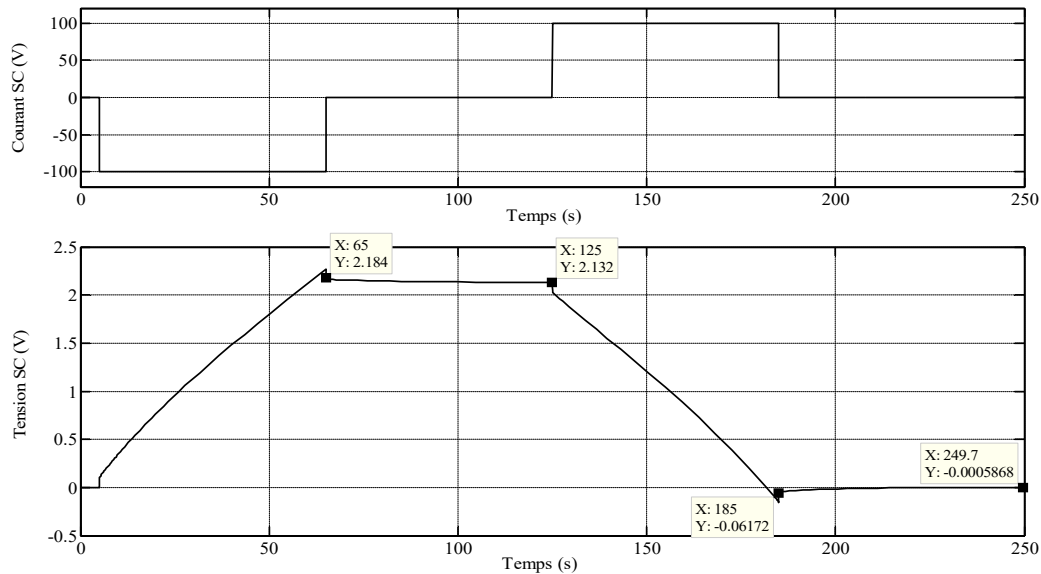


Figure III.9: Charge et décharge du modèle multi branches à trois éléments.

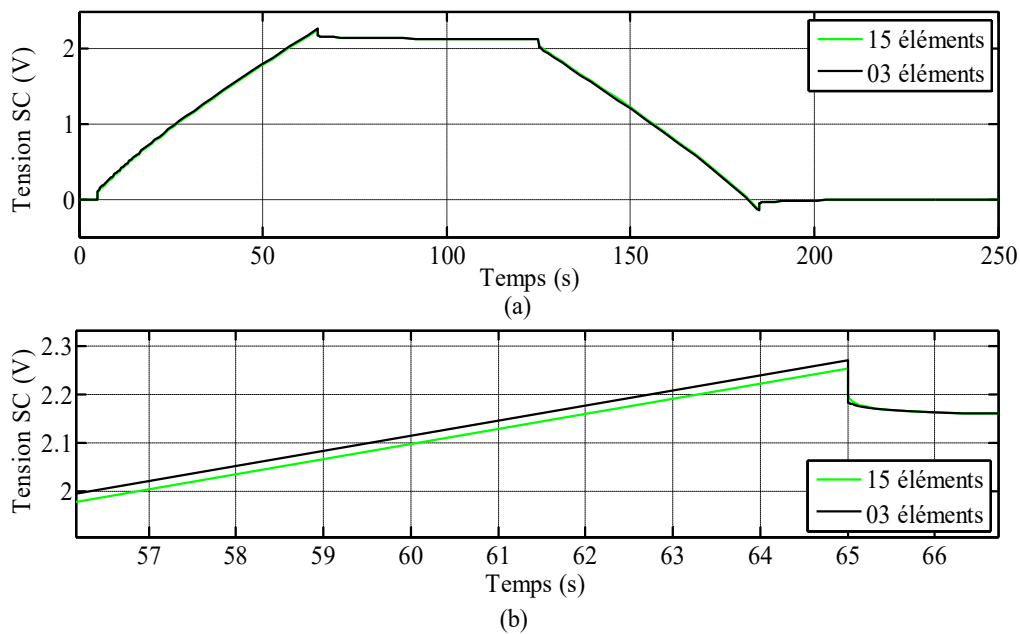


Figure III.10: Charge et décharge du modèle multi branches à quinze éléments.

Pour le modèle à 3 éléments (figure III.9), à l’instant $t = 5s$ on charge le SC par un courant de $-100 A$ jusqu’à l’instant $t = 65s$, on remarque que la tension à la sortie du SC augmente rapidement avec une pente non linéaire causée par les branches de la ligne de transmission du SC. A l’instant $t = 65s$, le courant de charge du SC s’annule et sa tension est égale à $2,184V$, cette dernière continue à diminuer malgré la nullité du courant de charge, elle atteint une valeur de $2,132V$ à $t = 125s$, cette chute de tension est due aux branches complémentaires qui décrivent la redistribution interne de l’énergie durant les phases de repos.

La même chose se reproduit dans le sens contraire lorsqu'on décharge le SC avec un courant égal à 100 A, à l'instant $t = 125$ s le SC se décharge avec une pente non linéaire jusqu'à la fin de l'étape de décharge à $t = 185$ s, à cette instant la tension du SC atteint une valeur égale à (-0.06172 V) et continue à augmenter jusqu'à (- 0.0005868 V), on remarque que la tension du SC revient lentement au même point de départ.

Si on compare les résultats de la (figure III.9) avec ceux de la figure III.7 en se basant sur les résultats expérimentaux du SC (PC7223) données dans les références [29-30], nous trouvons que le modèle de F. Belhachemi est plus précis que celui de R. Bonert et L. Zubieta.

Dans la (figure III.10) nous avons fait une comparaison entre la tension de charge et de décharge du SC avec 03 éléments dans sa ligne de transmission, à celle avec 15 éléments, il apparait que l'augmentation du nombre d'éléments de la ligne de transmission n'a pas un grand effet sur la tension (figure 10.a), cependant il révèle un petit ajustement de la partie où la variation de la tension du SC est rapide (figure III.10.b). A noter que les deux modèles (à 3 et à 15 éléments) sont assez compliqués et consomment beaucoup de temps calcul.

III.2.4. Système d'équilibrage

En pratique, la tenue diélectrique de la double couche étant faible (de l'ordre de quelques volts), un grand nombre de cellules élémentaires doit être mis en série pour aboutir à une tension élevée [34]. Cette association en série ne peut se faire simplement car la valeur de chaque élément varie. De ce fait les tensions en fin de charge seront différentes entre les différents éléments. Pour pallier à ce problème, il faut mettre en place un système d'équilibrage des tensions, on peut ainsi exploiter pleinement les capacités de stockage des éléments, de plus ce système permet d'éviter les surtensions aux bornes des éléments. Il existe différents types de circuit d'équilibrages: il peut s'agir de systèmes passifs constitués de résistances ou de diodes zéner comme il peut s'agir de systèmes actifs réalisés avec des convertisseurs statiques (exemple circuit Buck/Boost) [23].

III.2.4.1 Systèmes passifs d'équilibrage

III.2.4.1.1 Système d'équilibrage avec résistance

La structure de ce système est très simple ; elle consiste à connecter une résistance en parallèle à chaque élément de super condensateur comme représenté par la (figure III.11):

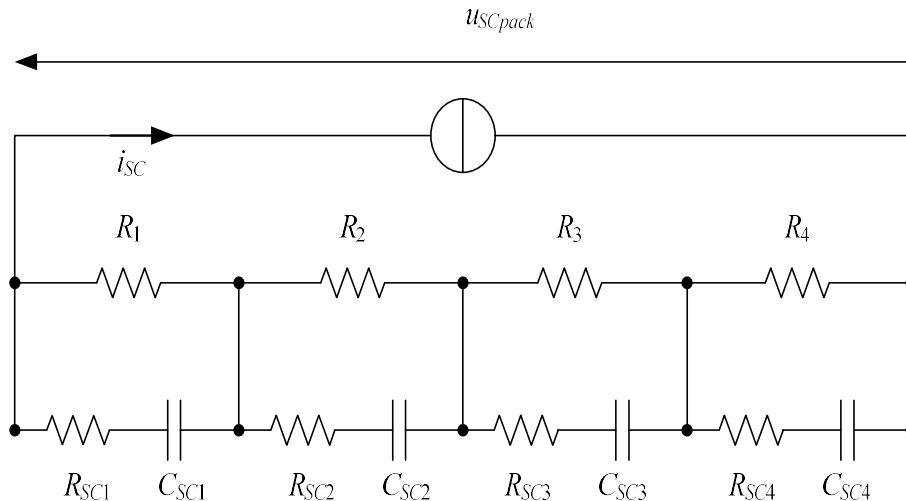


Figure III.11 : Système d'équilibrage résistif.

La valeur de la résistance est déterminée par plusieurs critères. Le critère principal est de limiter la valeur maximale de la tension aux bornes de l'élément. Parmi les inconvénients de cette structure [35- 23-34]:

- La limitation de la dynamique du Pack de super condensateur.
- Le rendement très faible (10 %) lié à la dissipation d'énergie dans les résistances.

III.2.4.1.2 Système d'équilibrage avec diodes zener

Les diodes zener sont mises en parallèle sur les éléments de SC (figure III.12):

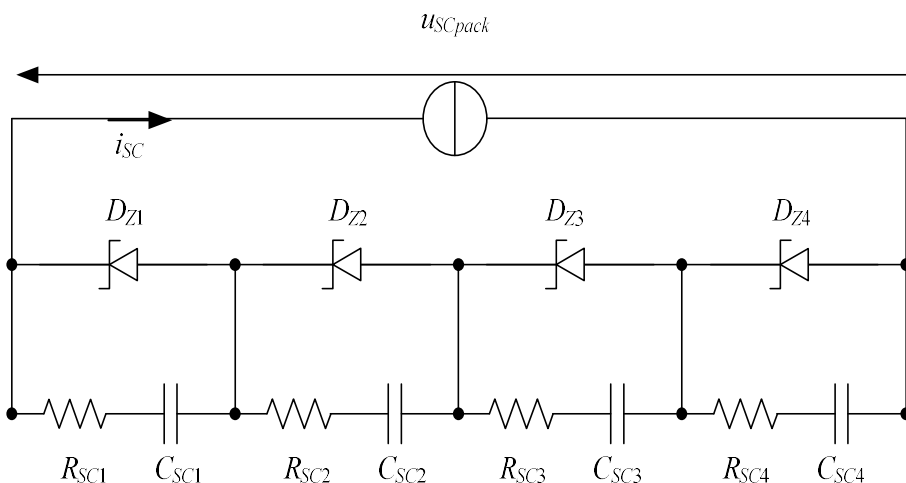


Figure III.12 : Système d'équilibrage avec diodes zener.

La tension maximale acceptée par les éléments de super condensateur détermine la tension zener des diodes. Une difficulté de ce système d'équilibrage est de trouver la diode zener qui convient pour une application donnée (I_{nom} , U_{cmax}). Cette solution offre cependant un meilleur rendement (90%) et une meilleure dynamique que le système résistif. Le principal

inconvenient de cette solution est l'utilisation des diodes zener qui dissipent de l'énergie quand la tension aux bornes de l'élément atteint sa valeur maximale. Cette dissipation peut être très importante si beaucoup d'éléments atteignent leur tension limite [35- 23- 34]. Pour pallier à ces problèmes, on peut utiliser des structures basées des convertisseurs statiques permettant de limiter les pertes par dissipation dans le système d'équilibrage.

II.2.5 Systèmes actifs d'équilibrage

La réalisation du système d'équilibrage actif est plus compliquée que celle du système passif. Dans le cas d'une association en série de plus de deux SCs, le principe de ce système consiste à placer un circuit buck-boost pour chaque paire de cellules, (figure III.13). Ce circuit à base de deux interrupteurs (MOS) permet de dévier une partie du courant de charge afin d'obtenir une dynamique de charge identique pour l'ensemble des SCs. La commande des deux interrupteurs (T_1 et T_2 par exemple) est basée sur la comparaison des niveaux des tensions des SCs (u_{SC1} et u_{SC2} par exemple) avec un rapport cyclique de 50%. La logique de cette commande est résumée ci-dessous :

- $u_{SC1} > u_{SC2}$, le transistor T_2 se bloque (OFF) et T_1 s'amorce (ON) ;
- $u_{SC1} < u_{SC2}$, le transistor T_1 se bloque (OFF) et T_2 s'amorce (ON).

Le principe de la commande est identique pour tous les circuits buck-boosts. La fréquence de commutation étant constante, l'inductance est dimensionnée pour obtenir une valeur moyenne de $(2 \cdot i_{eq})$ avec un bon rendement. Les expressions résultantes de ces considérations sont définies par les équations III.6 et III.7 [35].

$$i_{eq} = \frac{C_{SC2} - C_{SC1}}{C_{SC2} + C_{SC1}} i_{SC} = \frac{\chi}{200 + \chi} i_{SC} \quad (\text{III. 5})$$

$$L_{eq} = \frac{u_{SC1}}{16 \cdot i_{eq} \cdot f} \cdot \left\{ 1 + \frac{u_{SC1}}{u_{SC2} + U_d} \right\} \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

- χ : La différence relative en % entre C_{SC2} et C_{SC1} par rapport à la capacité de base (C_{SC1}).
- U_d : la tension de seuil des diodes.
- f : la fréquence de commutation des transistors.

Pour réaliser ce type de systèmes d'équilibrage actif, il est nécessaire d'avoir $(n_{SC} - 1)$ circuits pour n_{SC} super condensateurs mis en série. Ce système d'équilibrage (figure III.13), offre un rendement très élevé (environ 97 %) et une très bonne dynamique d'équilibrage [35].

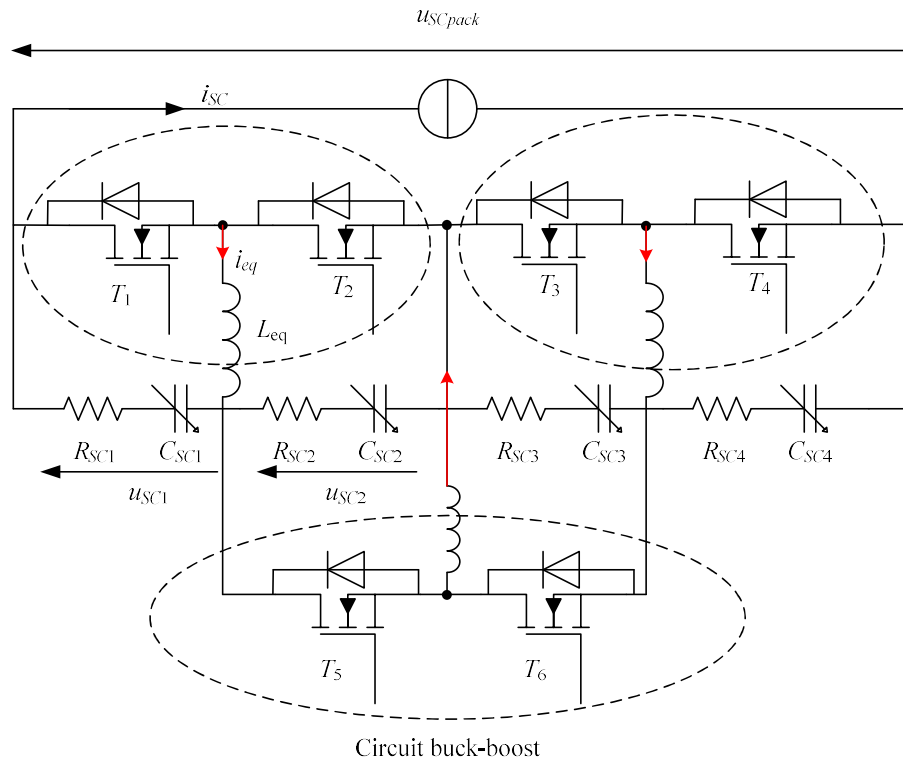


Figure III.13: Equilibrage de 4 cellules à base de convertisseurs buck-boost.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par détailler le principe de fonctionnement ainsi que les différents types des super condensateurs. Nous avons ensuite étalé quelques modèles de ces derniers. Enfin nous avons choisi un modèle simple bien adapté à notre modèle du système hybride.

Malgré quelques inconvénients des super condensateurs utilisés comme systèmes de stockage d'énergie, comme la faible tension de service qui exige la mise en série de plusieurs cellules avec un contrôle permanent de leurs niveaux de tensions par des circuits d'équilibrages, ils restent très avantageux par rapport à d'autres systèmes de stockage notamment pour l'application dans le système hybride. Parmi les avantages : un stockage direct et électrostatique rapide, un contrôle aisé de l'énergie stockée par conversion électronique de puissance, une densité de puissance élevée et une durée de vie élevée.

Chapitre VI

**Gestion d'énergie entre les sources hybrides
et le convertisseur bidirectionnel**

IV.1 Introduction

L'objectif principal de la commande est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle et ceci dans un environnement perturbé. Ces perturbations sont de nature externe (perturbation sur la mesure, perturbation sur la commande...) ou interne au système (erreur du modèle, incertitude paramétrique) et généralement non mesurable [36]. La commande de processus se fait par l'introduction dans la chaîne de commande d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour s'affranchir des perturbations. Cet algorithme de contrôle est appelé un correcteur ou parfois un régulateur [36]. Les algorithmes de contrôle pour synthétiser un correcteur sont nombreux. Les algorithmes de contrôle Proportionnel Intégral (PI), par hystérésis et par mode MLI seront appliqués au convertisseur.

Après avoir déterminé les correcteurs PI, nous les testerons ensuite en simulation sous l'environnement Simulink®.

IV.2 Choix du logiciel

La commande du convertisseur d'énergie « buck-boost », Le processeur supportant des programmes compilés à partir de schémas de commande issus de l'environnement Matlab/Simulink®, nous avons choisi par commodité de développer les modèles de simulation du convertisseur sous le même environnement.

IV.3 Choix des bibliothèques dans Matlab/Simulink®

Pour la simulation nous utilisons les composants (Figure IV.1) des bibliothèques SimPowerSystem et Simulink :

- Super condensateur
- Inductance L
- Condensateur de filtrage
- Intercepteur MOSFET
- Charge R1 et R2
- Alimentation réseau DC44 V

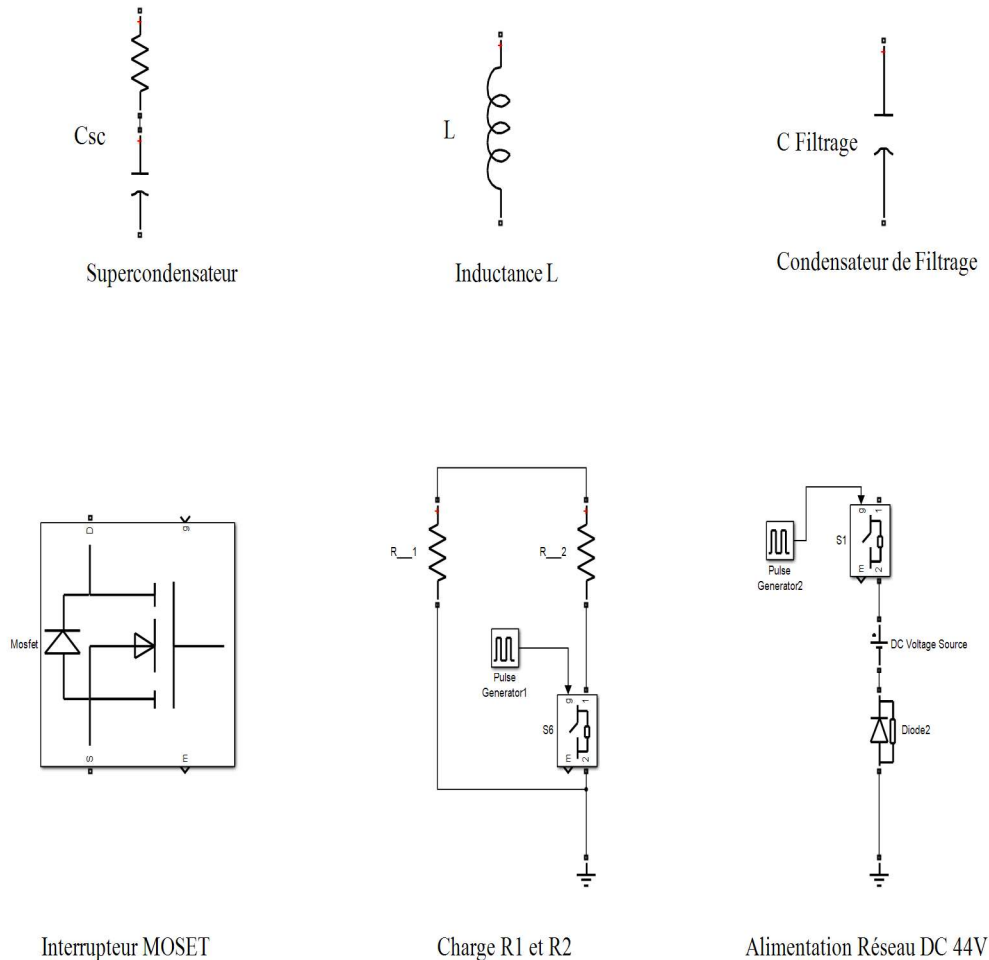


Figure IV.1: Modèles des composants servant à la simulation.

IV.5 Schéma final du convertisseur sous forme de schéma bloc

Le montage (Figure IV 2) représente l'ensemble du démonstrateur sous l'environnement Matlab/Simulink® accompagné de ses trois blocs (ANNEXE II) servant à la commande du convertisseur. Elle est composée d'un bloc pour le mode « buck » (commande hystérésis), le second pour le mode « boost » qui inclut les correcteurs PI, et le troisième servant à gérer l'ensemble du système. Ce montage permet de valider les séquences de la gestion « énergie et sécurité » pour la commande PI et en mode MLI « boost », ainsi que le fonctionnement en buck (hystérésis).

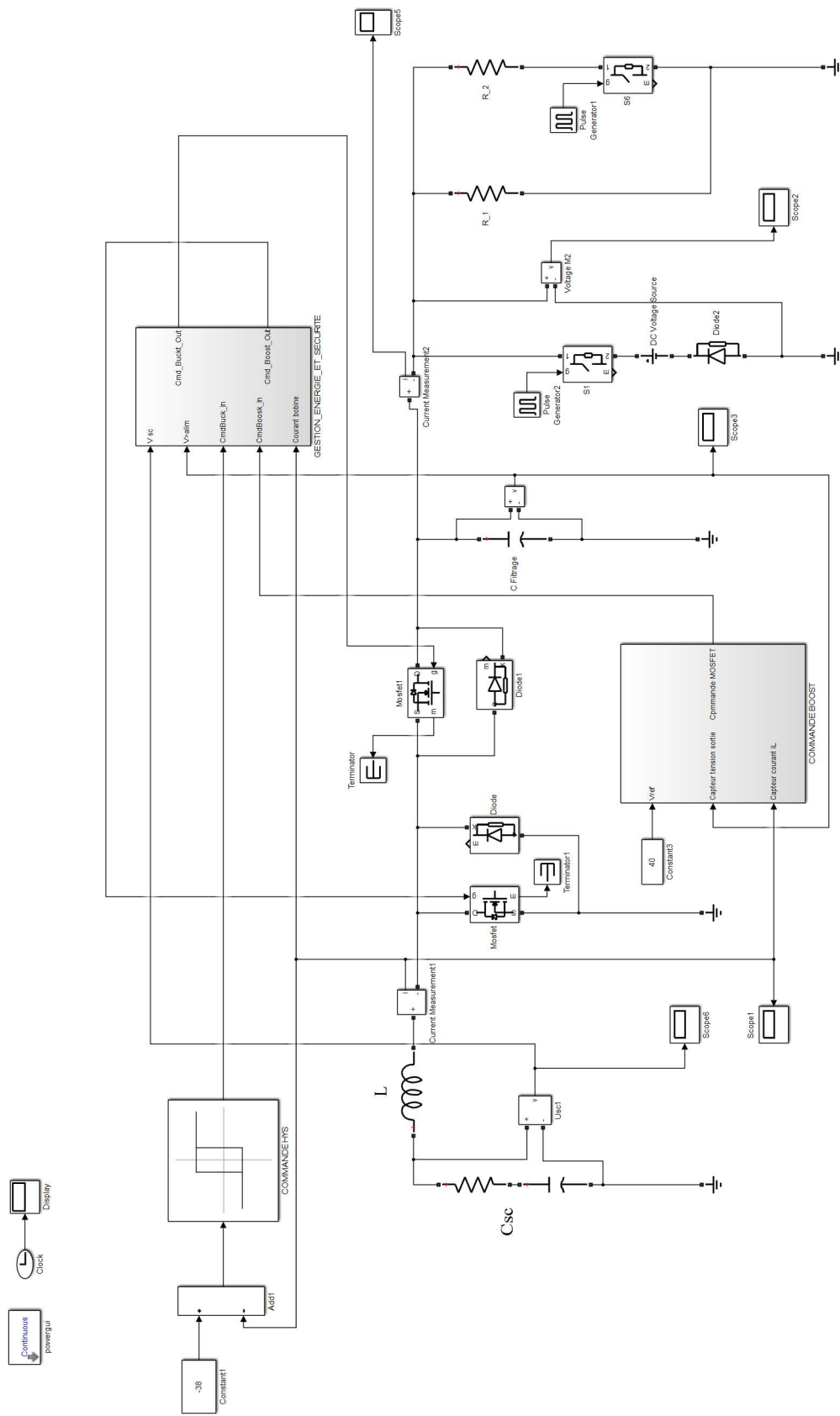


Figure IV.2: Montage complet du démonstrateur sous Simulink.

IV.6 Fonctionnement de l'ensemble du système

- En condition normale

Dans ce cas, les modules PV alimente la charge et l'ensemble (convertisseur – pack de SC). Le maintien en charge des SC est géré par la commande « buck » du convertisseur.

- Perte du réseau continu

Dans ce cas, le convertisseur assure le maintien sans interruption de l'alimentation aux bornes de la charge à 40 Vdc, en utilisant comme source l'énergie provenant du pack de SC, par une Commande « boost »

- Retour du réseau continu

Le réseau continu assure l'alimentation de la charge de nouveau, et le convertisseur recharge les SC par la commande « buck », si nécessaire.

- Recharge des SC

Les huit SC sont rechargés à courant constant maximal de 40A jusqu'à leur tension maximum autorisée 2.7V par élément.

IV.7 Schéma équivalent du pack de SC

La modélisation du pack choisie (Figure IV.3) est simple mais permet de simuler d'une manière satisfaisante le fonctionnement de l'ensemble SC et convertisseur.

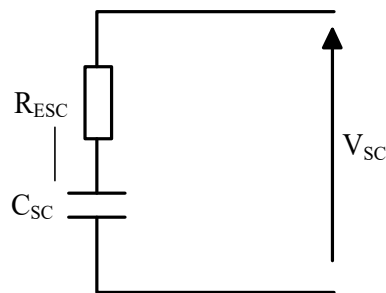


Figure IV.3: Schéma électrique équivalent d'un SC.

Avec :

RESR : résistance équivalente des huit SC branchés en série (Ω)

CSC : capacité équivalente des huit SC branchés en série (F)

VSC : tension aux bornes du pack du SC (V)

Suite aux données du constructeur, pour les huit SC en série :

- capacité équivalente $C_{sc} = 337.5$ F
- résistance équivalente $ESR = 6.8$ m Ω .

Le schème suivant (figure IV.4) représenté un organigramme qui simplifie et résume le principe de fonctionnement de notre système électrique.

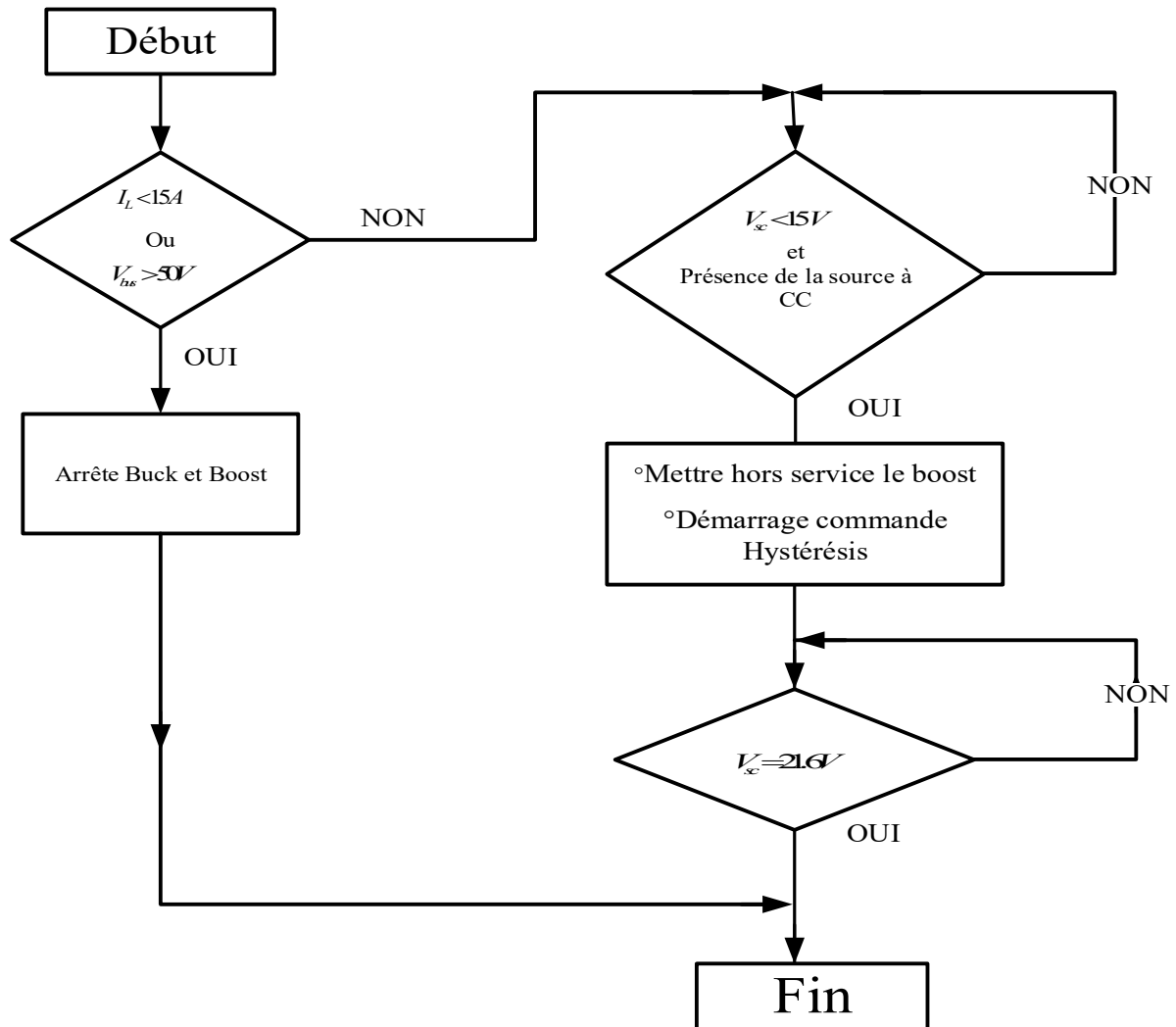


Figure IV.4: Organigramme de recharge des SC.

IV.8 Commande PI du hacheur

Ce type de contrôle très répandu dans l'industrie rentre dans la classe des commandes linéaires qui se basent sur un modèle linéaire du système pour synthétiser le contrôleur.

Nous retenons la structure à deux boucles. Son avantage est qu'elle améliore les performances dynamiques et la robustesse du contrôleur. Elle permet aussi de simplifier le contrôle du hacheur « boost » dont la fonction de transfert présente un zéro dans partie droite de l'axe des imaginaires rendant son contrôle par une seule boucle de tension compliqué. La structure de la commande est représentée par la (Figure IV.5).

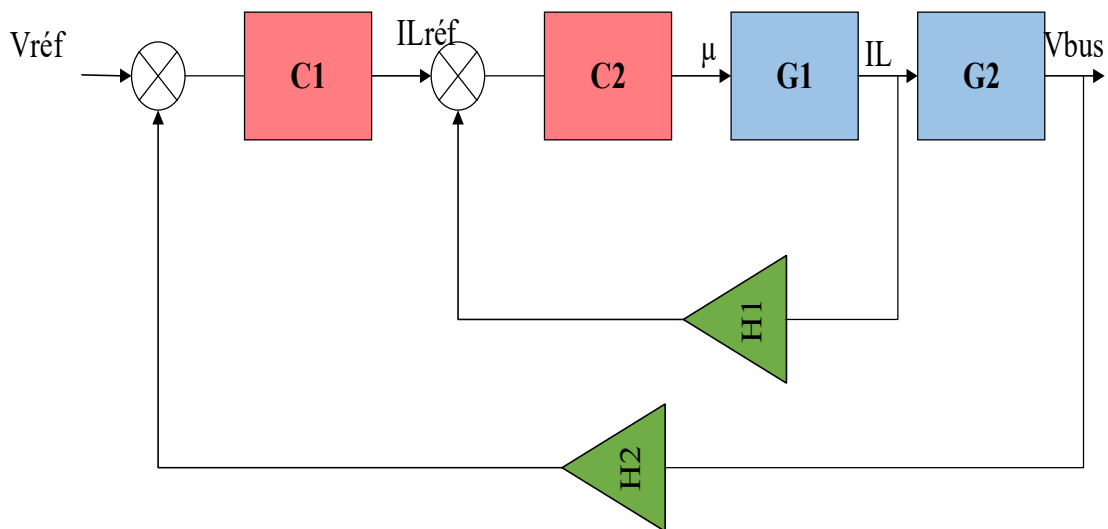


Figure IV.5: Structure de la commande par deux boucles de contrôle.

Avec :

$V_{réf}$: tension de référence V_{bus}

C1 : correcteur de la boucle externe

C2 : correcteur de la boucle interne de courant

G1 : processus $IL(s)/a(s)$

G2 : processus $V_{bus}(s)/IL(s)$

H1 : gain du capteur courant IL

H2 : gain du capteur de V_{bus}

μ : rapport cyclique de la commande PWM

L'erreur corrigée entre la tension mesurée et celui de référence sert comme une référence de courant pour la boucle interne de courant. C'est la boucle de courant qui impose la valeur du rapport cyclique μ .

IV.9 Mode « Buck » (commande hystérésis)

IV.9.1 Principe de fonctionnement (ANNEXE I)

La recharge du pack de SC se fait à courant moyen constant comme indiqué à la (Figure IV.6) L'information du courant IL , mesurée par le capteur IL sera ensuite comparée par hystérésis à aux références min et max du courant de recharge. Le résultat 0-1 de cette comparaison sert directement de commande pour la grille du transistor « buck » T2. (La roue libre de la bobine se faisant via la diode D1 du transistor « boost » T1, toujours bloqué ici).

La gestion d'énergie surveillera la tension aux bornes du pack de SC de façon à ne jamais dépasser $V_{sc} = 21.6 \text{ V}$ (soit 2.7 V par élément), et que la recharge s'effectue quand sa tension est inférieure ou égale à 15 V .

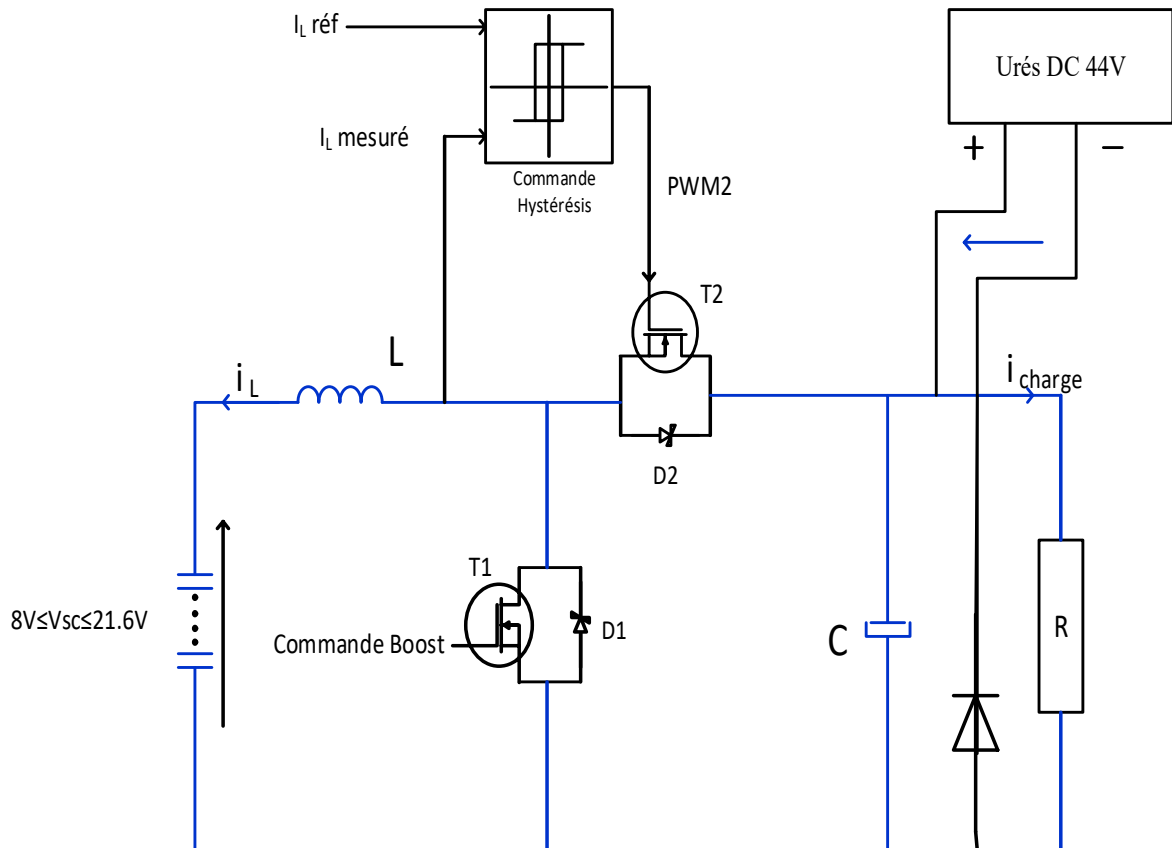


Figure IV.6: Commande par hystérésis pour la recharge des SC.

IV.10 Résultats de simulation

IV.11. Simulation de changement de charge

La simulation effectuée avec le logiciel Matlab/Simulink®, consiste à faire varier la charge de sa valeur minimale (5Ω) à sa valeur maximale (20Ω). Ceci a été fait pour différents états de charge des SC ($V_{sc} = 20$ et 12 V). Les résultats obtenus du courant i_L et V_{bus} sont présentés sur la (Figure IV.7). Le régulateur PI a été réglé à partir d'un système linéarisé autour d'un point de fonctionnement. D'après les réglages obtenus, tenant compte des contraintes de stabilité, la tension V_{bus} (Figure IV.7) peut atteindre un écart de 2.5 V à 6 V .

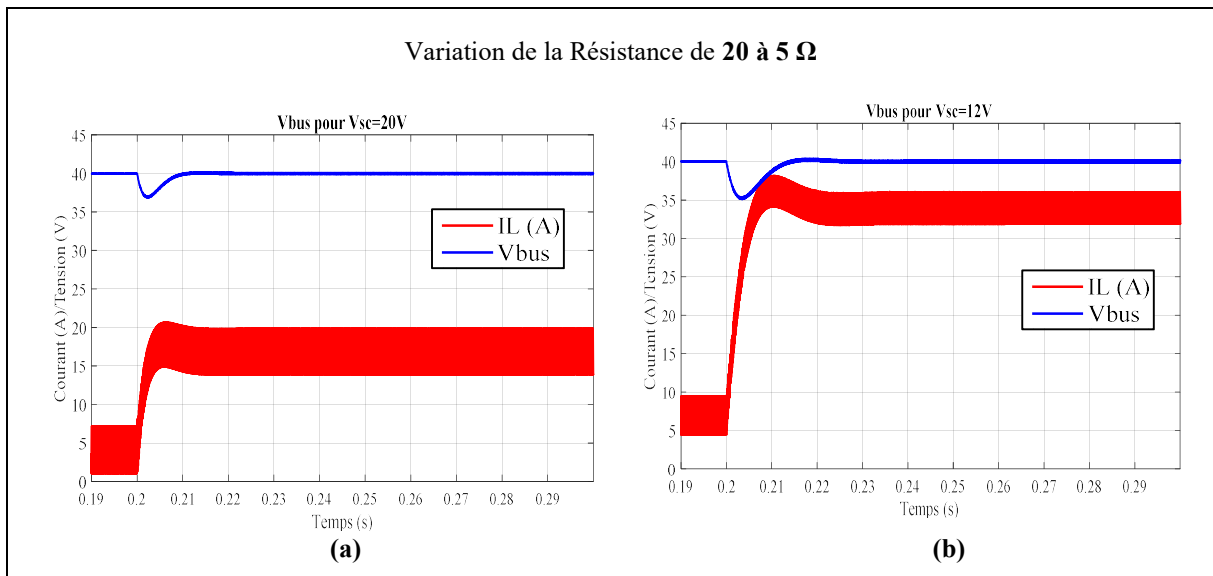


Figure IV.7: Simulation PI (variation de la résistance de 20 à 5 Ω).

IV.12 Simulation de perte de réseau lors de la recharge

Lors d'une perte de réseau, le convertisseur étant en mode « buck » (recharge du pack) à l'état initial, passe en mode « Boost »(Figure IV.7). Nous pouvons constater également que les correcteurs arrivent à bien réguler la tension du bus. La Figure IV.8 suivante, résume les variations de tension observées en simulation, lors d'un brusque changement de charge, avec les commandes à régulateur PI, pour différentes tensions de charge initiale VSC du pack de SC.

IV.13 Simulation de la variation de charge

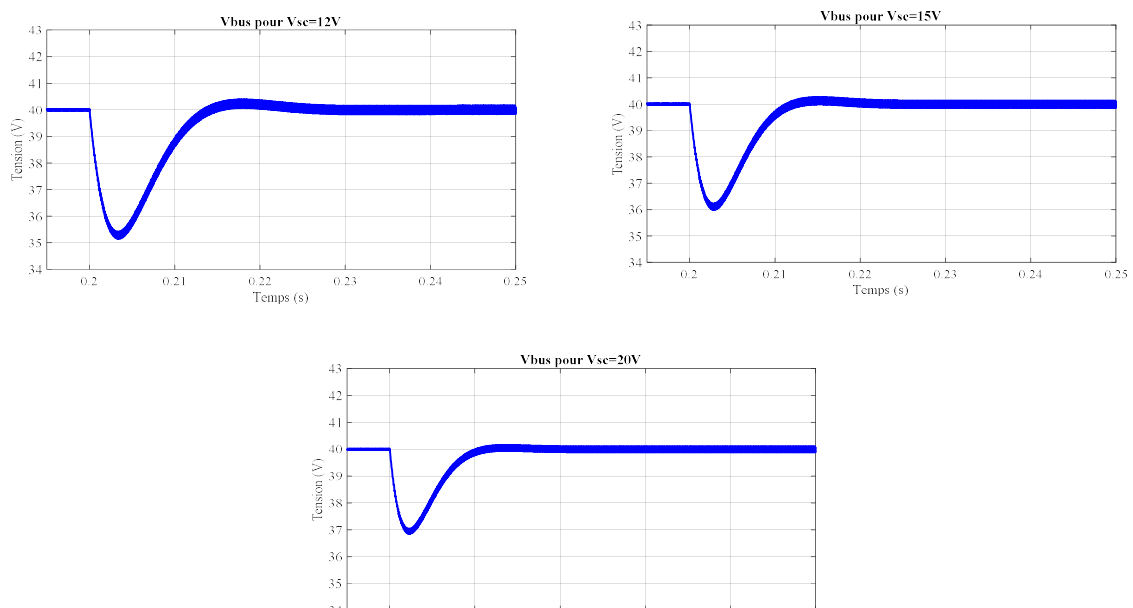


Figure IV.8 : Modèle (PI) en Variation de la résistance de 5 à 20 Ω

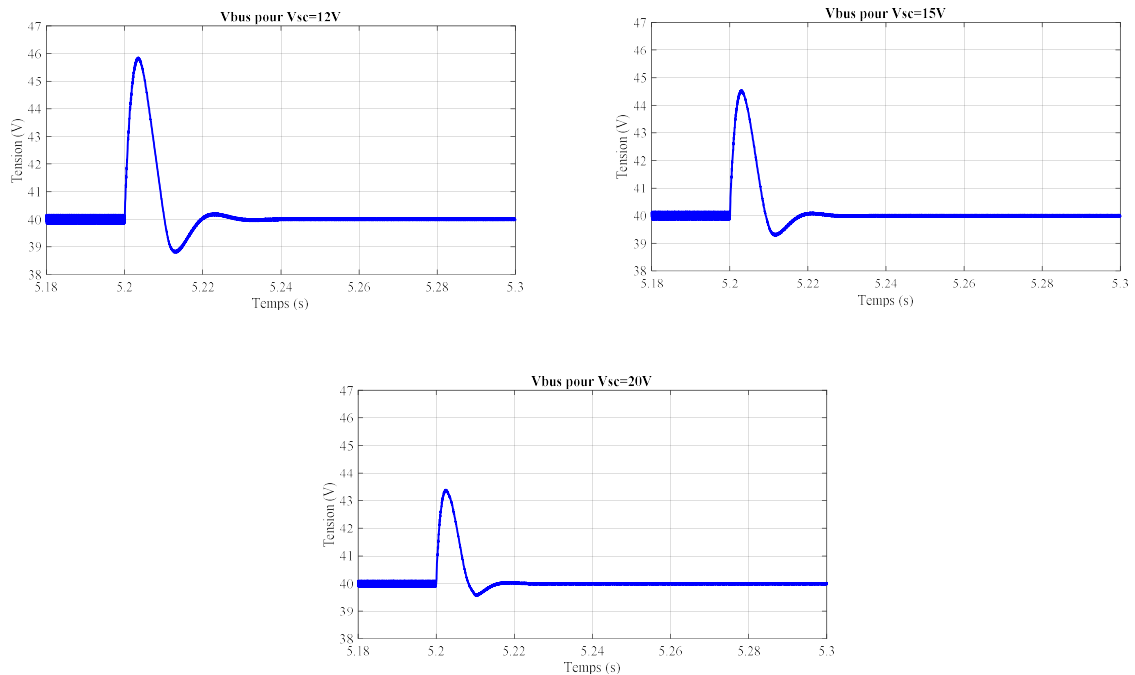


Figure IV.9 : Modèle (PI) en Variation de la résistance de 20à 5 Ω

IV.14 Résultats de Simulation

D'après les résultats obtenus sur la (figure IV 8, figure IV 9) on avoir que:

Dans le 1^{er} cas (variation de la résistance de 5 à 20 Ω) et dans le 2^{ème} cas (variation de la résistance de 20 à 5 Ω) lorsque on augmente la valeur de tension de pack SC pour les valeur suivante (V=12 ,V=15,V=20) jusqu'on approcher d'attendre sa valeur maximale (Vsc=21.6V) la valeur de pick diminuée et le régime transitoire courte, le correcteur PI assurée que la tension sera stable à sa valeur nominal.

Plusieurs campagnes d'essais ont été réalisées en vue de comparer les lois de commande dans différentes conditions :

- Perte du réseau CC par la coupure du disjoncteur
- Changement de charge par l'ouverture et fermeture disjoncteur commandé par un signal.
- Passage du mode « Buck » à « Boost »

La (figure IV.10) représente les résultats de simulation de notre système :

IV.15 simulation passage de mode hysteresis a « boost » suite a la perte du reseau dc en MODE PI

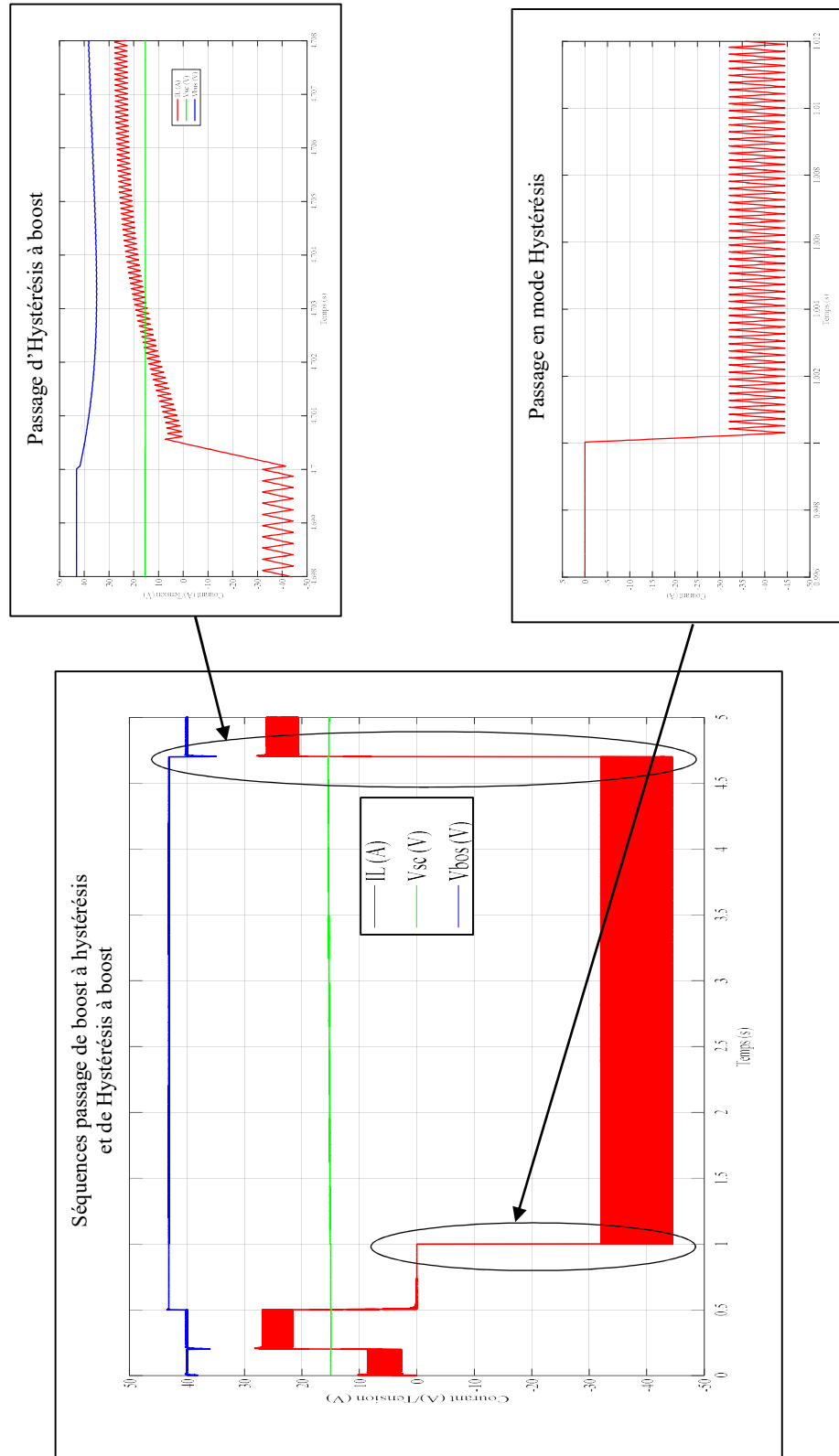


Figure IV.10: Passage de « buck » à « boost »

La variation de charge dans la première série de mesures, on fait varier brutalement la charge de 20 à 5 ohms. Les résultats obtenus pour différents niveaux de tension sont représentés sur la (Figure IV.8). La tension V_{bus} régulier avec un contrôle PI, pour minimiser L'erreur statique de la tension de bus, lorsque la tension du pack de super condensateurs approche les 12 V. Ceci est lié aux diverses pertes du convertisseur « boost » (à la commutation, résistances parasites, ...).

-Perte de réseau : nous présentons dans la deuxième série de mesures la perte de réseau (coupure de l'alimentation de source CC 44 V), afin de tester les contrôleurs « boost » partant d'un état initial de charge des super condensateurs qui est loin du point d'équilibre. Dans cet essai, à l'état initial, la source CC 44 V alimente uniquement la charge, et il n'est pas permis au pack de super condensateurs de se recharger (mode hystérésis avec T2 désactivés), c'est pourquoi il est possible ici d'avoir une tension V_{sc} de 12V à l'état initial. La tension du bus se stabilise et sans dépassement grâce au contrôleur PI.

La troisième série de mesures montrent le passage de la commande hystérésis à « boost » suite à une perte du source CC à $V_{sc} = 12\text{ V}$ et $V_{sc} = 15\text{ V}$, $V_{sc}=20\text{V}$ alors que le pack était en cours de recharge à l'état initial.

- Fonctionnement général pour différentes charges (5 Ω et 20 Ω), avec ou sans la source CC La (Figure IV 9) montre le fonctionnement général du convertisseur avec régulation « boost » géré par la routine principale de gestion d'énergie. La phase de recharge du pack de super condensateurs (commande « hystérésis ») s'effectue lorsque sa tension est inférieure ou égale à 15 V. Quel que soit la phase de fonctionnement il y a toujours la présence d'une tension aux bornes de la charge.

IV.16 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le fonctionnement de convertisseur CC-CC, contrôler par un régulateur PI. Le modèle de simulation Matlab/Simulink® du convertisseur a été développé permettons de tester les performances des contrôleurs pour plusieurs points de fonctionnement (variation de charge, perte du source et fonctionnement général), et permet de tester en simulation les commandes du convertisseur, en mode « boost » par régulation linéaire PI, et en mode « buck » par commande à hystérésis

Enfin nous pouvons constater que les correcteurs arrivent à bien réguler la tension du bus lors d'un changement de charge, d'une perte de source CC et du passage de « buck » à « boost ». La simulation met en évidence que le correcteur linéaire PI classique offre une régulation correcte de la valeur moyenne du courant de l'inductance.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'application des convertisseurs CC-CC dans le domaine d'énergie renouvelable, intègre dans un système d'énergie hybride composé par deux sources ; source primaire à base d'énergie renouvelable avec utilisation d'un super condensateur comme source auxiliaire, afin d'avoir la gestion d'énergie, nous avons utilisé un régulateur de type PI et un autre de type hystérésis.

Dans un premier temps, nous avons choisi une structure de notre système électrique hybride avec source à base d'énergie renouvelable (PV dans notre cas) comme source d'énergie principale et un super condensateur comme source d'énergie auxiliaire. L'interaction entre le Bus continu et les sources énergétiques est assurée par deux convertisseurs à courant continu: le premier convertisseur unidirectionnel en courant est utilisé à la sortie de module photovoltaïque pour régler la tension du Bus continu à une valeur désirée et charger les super condensateurs à une tension de référence, le deuxième est un convertisseur bidirectionnel en courant et assure le transfert de l'énergie du/vers les super condensateurs. Généralement la charge est un moteur, pour simplifier les calculs et pour étudier l'influence de la variation de la charge sur le système nous avons utilisé deux résistances. Dans un deuxième temps nous avons modélisé les différents éléments qui composent le système électrique hybride. Nous avons commencé par le système à base d'énergie renouvelable, nous avons dimensionné l'inductance L et la capacité C afin d'assurer la continuité de service dans le système. Nous avons aussi proposé et simulé plusieurs modèles équivalents de super condensateurs et nous avons choisi, un modèle qui ne pénalise pas la fidélité (précision), l'accessibilité (détermination et mesure des paramètres du modèle) et l'exploitation (utilisation et intégration du modèle dans les outils et supports de simulation sans augmenter le temps et la taille du modèle global). En outre, nous avons proposé une commande à base d'hystérésis et à base de l' MLI. Le système du réglage a été étudié par l'utilitaire du Matlab/Simulink et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Finalement une stratégie de gestion d'énergie des sources hybrides (ENR-SC) a été proposée, elle est basée sur une boucle de régulation à base des régulateurs Proportionnel-Intégral. Le système a été étudié par l'utilitaire de MATLAB et les résultats trouvés sont très satisfaisants.

Les résultats de simulations de tout le système d'énergie électrique hybride montrent que la structure de contrôle-commande proposée permet un très bon fonctionnement du système hybride. Il nous permet aussi d'avoir la gestion d'énergie entre deux sources par le contrôle de

la tension du bus continue dans le cas de perte de la source à base d'énergie renouvelable ou le retour de cette dernière, et cela afin de gérer la charge et la décharge du pack super condensateurs. De plus, cette stratégie est facile et respecte les contraintes imposées par les différents éléments installés au système (module PV, super condensateur, Convertisseurs électroniques de puissance...).

Les perspectives de ce travail sont très nombreuses dans le cadre actuel de la recherche concernant les systèmes hybrides à base d'énergie renouvelable, on cherche à une exploitation optimale, et une meilleur gestion d'énergie des systèmes hybride.

ANNEXE

ANNEXE I : Principe de fonctionnement du convertisseur

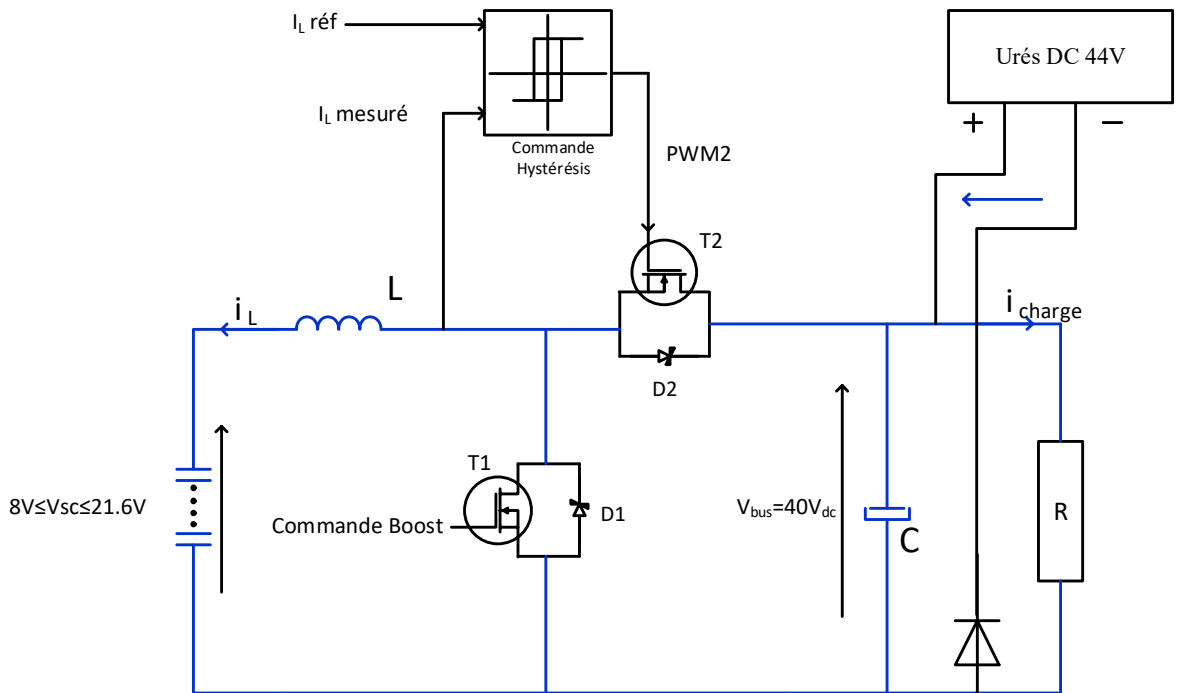


Figure 1. convertisseur « buck-boost »

Pour que ce convertisseur fonctionne en mode survolteur on commande l'interrupteur T1 et par suite la bobine emmagasine l'énergie électrique provenant du pack de SC sous forme magnétique, tandis que le condensateur C alimente la charge. Quand T1 est bloqué (la diode Schottky D2 du transistor T2 est passante) l'énergie emmagasinée dans la bobine passe dans la charge et son condensateur C.

Pour que le convertisseur fonctionne en mode dévolteur, on commute l'interrupteur T2 en remplaçant la charge par une source de tension pour charger le pack de SC.

1. En mode « boost » :

Nous fixons les hypothèses suivantes

1. Les interrupteurs sont idéaux, le condensateur de filtrage est purement capacitif et l'inductance est purement inductive.

2. Pour calculer le courant à l'entrée, on considère que la tension à l'entrée est constante dans un petit intervalle de temps et on néglige l'ondulation de la tension à la sortie vis-à-vis de la valeur moyenne.

3. Pour calculer la tension à la sortie, on considère que le courant à la sortie est constant dans un petit intervalle de temps et on néglige l'ondulation du courant à l'entrée vis-à-vis de la valeur moyenne.

Pour que le convertisseur fonctionne en mode survolteur «boost » on commande l'interrupteur T1, en effet :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$: T1 est passant

- $$v_{sc}(t) = L \frac{di_{sc}(t)}{dt}$$

$$i_{sc}(t) = \frac{v_{sc}}{L} t + i_{sc}(t=0) \quad (\text{D'après l'hypothèse 2})$$

$$\text{En } t = \alpha T : i_{sc}(\alpha T) = \frac{v_{sc}}{L} \alpha T + i_{sc}(t=0)$$

$$\text{D'où : } \Delta I_{sc} = i_{sc}(\alpha T) - i_{sc}(t=0) = \frac{v_{sc}}{L} \alpha T$$

- $$i_{bus}(t) = -C \frac{dv_{bus}(t)}{dt}$$

$$v_{bus}(t) = -\frac{i_{bus}}{C} t + v_{bus}(t=0) \quad (\text{D'après l'hypothèse 3})$$

$$\text{En } T = \alpha T : v_{bus}(\alpha T) = -\frac{i_{bus}}{C} \alpha T + v_{bus}(t=0)$$

$$\text{D'où : } \Delta V_{bus} = v_{bus}(t=0) - v_{bus}(\alpha T) = \frac{i_{bus}}{C} (\alpha T)$$

Pour $\alpha T \leq t \leq T$: T1 est bloqué.

- $$v_{sc} - v_{bus} = L \frac{di_{sc}(t)}{dt}$$

$$i_{sc}(t) = \frac{v_{sc} - v_{bus}}{L} (t - \alpha T) + i_{sc}(\alpha T) \quad (\text{D'après hypothèse 2})$$

$$\text{En } t = T : i_{sc}(T) = \frac{v_{sc} - v_{bus}}{L}(T - \alpha T) + i_{sc}(\alpha T)$$

$$\text{D'où } \Delta I_{sc} = i_{sc}(\alpha T) - i_{sc}(T) = -\frac{v_{sc} - v_{bus}}{L}(T - \alpha T)$$

- $I_{sc} - i_{bus} = C \frac{dv_{bus}}{dt}$

$$v_{bus}(t) = \frac{I_{sc} - i_{bus}}{C}(t - \alpha T) + v_{bus}(\alpha T) \quad (\text{D'après hypothèse 2})$$

$$\text{En } t = T : v_{bus}(t) = \frac{I_{sc} - i_{bus}}{C}(t - \alpha T) + v_{bus}(\alpha T)$$

$$\text{D'où : } \Delta V_{bus} = v_{bus}(t) - v_{bus}(\alpha T) = \frac{I_{sc} - I_{bus}}{C}(t - \alpha T)$$

En régime permanent, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation et de même pour la tension.

$$\Delta I_{sc \text{ ouvert}} = \Delta I_{sc \text{ fermé}}$$

$$\frac{v_{sc}}{L}(\alpha T) = -\frac{v_{sc} - v_{bus}}{L}(T - \alpha T)$$

$$v_{sc} = (1 - \alpha)v_{bus}$$

$$\frac{v_{bus}}{v_{sc}} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle de l'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α , et que théoriquement elle peut-être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de convertisseur survolteur « boost ».

De même, on peut démontrer que si on prend $\Delta I_{sc \text{ ouvert}} = \Delta I_{sc \text{ fermé}}$ alors $\frac{I_{sc}}{I_{bus}} = \frac{1}{1 - \alpha}$

De même, on peut démontrer que si on commande T2, le convertisseur fonctionne en mode dévolteur « buck », en appliquant la même démarche que précédemment.

On obtient :

$$\frac{v_{bus}}{v_{sc}} = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{et} \quad \frac{I_{sc}}{I_{bus}} = \frac{1}{\alpha}$$

2. En mode « buck » :

Pour la recharge des SC à courant constant, le mode par commande à hystérésis est retenu. Le principe de cette commande (figure 49 AI) consiste à ouvrir et fermer l'interrupteur T2 (figure.2) selon le niveau de courant atteint dans la bobine. Entre t_0 et t_1 , l'interrupteur T1 est fermé et le courant monte jusqu'à $I_{L,max}$, entre t_1 et t_2 l'interrupteur T1 est ouvert, le courant décroît et la diode D1 du transistor T1 conduit jusqu'à t_2 . En régime établi, la pente de $IL(t)$ n'est pas la même lorsque le courant croît et décroît. La fréquence en mode hystérésis varie entre 6 et 11 kHz selon le niveau de tension aux bornes du pack de SC.

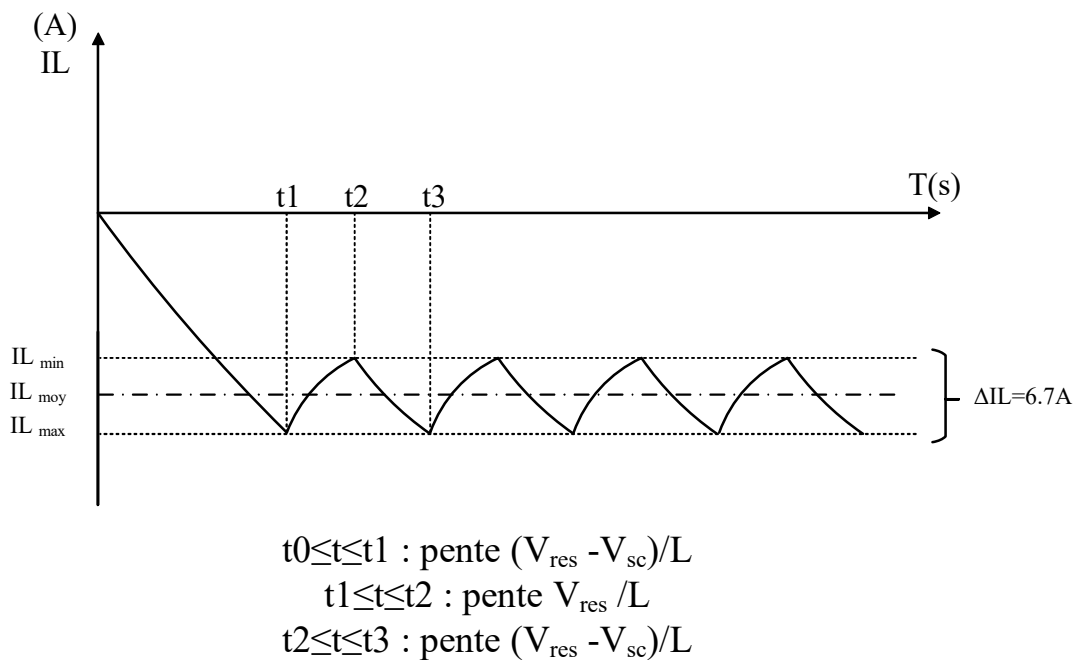


Figure 2: démarrage et régime permanent du mode hystérésis pour la recharge des

3. Calcul de la fréquence de commutation en commande hystérésis :

En prenant une ondulation $\Delta IL = 6.5A$ et en négligeant les pertes dans les transistors T1 et T2, les résistances internes de l'inductance, du pack de SC et de la connectique nous pouvons écrire :

- $0 \leq t \leq t_1$, T2 est fermé, D1 ne conduit pas

$$V_{DC} - V_{SC} = U_L \frac{di_L}{dt} \quad \text{d'où} \quad i_L(t) = \frac{V_{DC} - V_{SC}}{L} t$$

la pente de la courbe dépendra de V_{DC} , V_{SC} et de L .

- $t1 \leq t \leq t2$, T2 est ouvert, D1 conduit

$$V_{SC} = U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{d'où} \quad i_L(t) = \frac{V_{SC}}{L} t \quad (2), \text{ la pente de la courbe dépendra de } V_{SC} \text{ et de } L.$$

- $t2 \leq t \leq t3$, T2 est fermé, D1 ne conduit pas

La pente de la courbe dépendra de V_{DC} , V_{SC} et de L .

Lorsque $V_{rés}=44V$ est que la tension du pack de SC est dans les alentours de 20V alors la

fréquence du signal du courant en mode hystérésis sera d'environ $f = \frac{1}{t2 + t3} = 10.6KHz$

$$ID1_{moy} = \frac{1}{t3 + t1} = [IL_{moy}(t2 - t1)] = \frac{IL_{moy}}{t3 - t1} (t2 - t1)$$

$$ID2_{moy} = \frac{1}{t3 + t1} = [IL_{moy}(t3 - t2)] = \frac{IL_{moy}}{t3 - t1} (t3 - t2)$$

Pour $IL_{moy}=40A$ avec un $\Delta IL=6.5A$ et $V_{rés}=44V$

de SCs.

Le modèle instantané du convertisseur en mode survolteur « boost » s'écrit de la manière suivante :

$$v_{sc}(t) - (1-u)v_{bus}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$(1-u)i_L(t) - i_{charge}(t) = C \frac{dv_{bus}(t)}{dt}$$

$$\text{Avec } v_{sc}(t) = v_c(t) - R_{sc}i_L(t)$$

$$i_L(t) = -C \frac{dv_c(t)}{dt}$$

Avec :

u : égale « 1 » T1 fermé, « 0 » T1 ouvert

V_{sc} : tension aux bornes du pack de SCs

C_{sc} : capacité équivalente du pack de SC

C : capacité équivalente des condensateurs de s de filtrages

V_{bus} : tension aux bornes de la charge

i_{bus} : courant dans la charge

i_L : courant dans l'inductance

Pour réaliser une simulation du convertisseur dans un environnement de type SIMULINK il faut écrire ces équations dans le domaine de Laplace.

ANNEXE II : Bloc du convertisseur « Boost » et « buck »

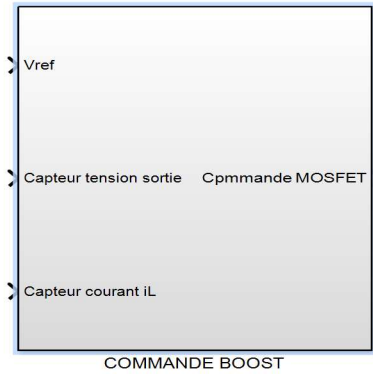
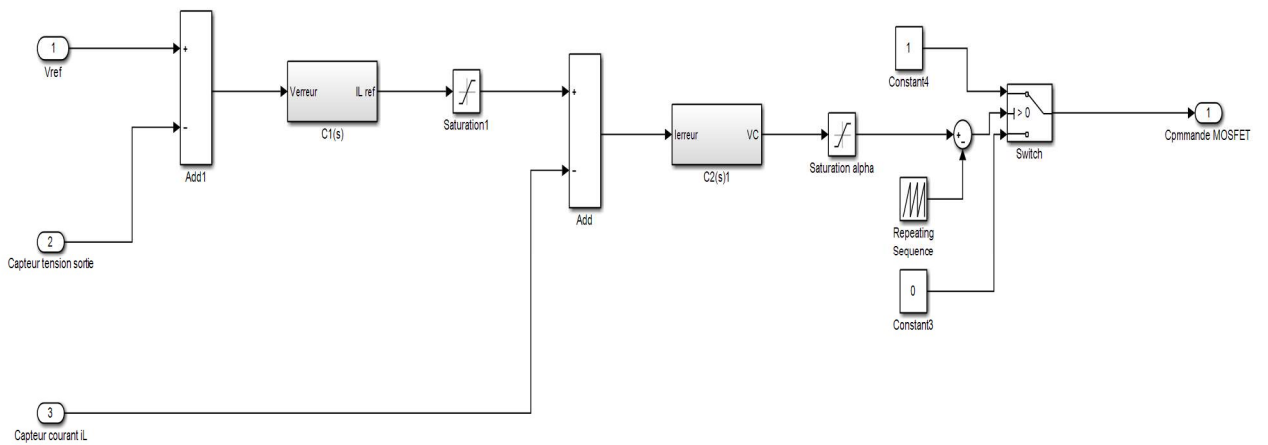
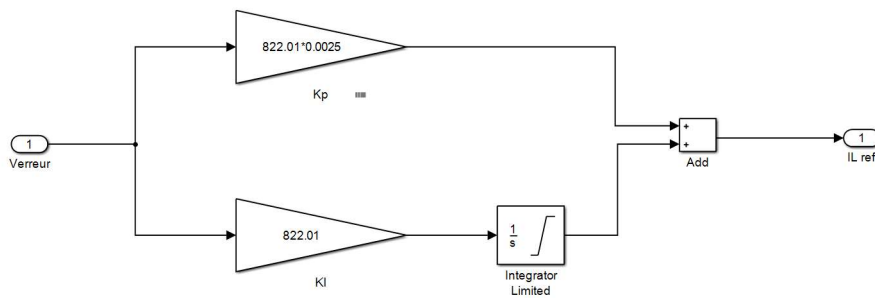


Figure 3: Schéma bloc du convertisseur « Boost »

Composition interne du bloc « convertisseur boost »



Composition interne des blocs C1



Composition interne des blocs C2

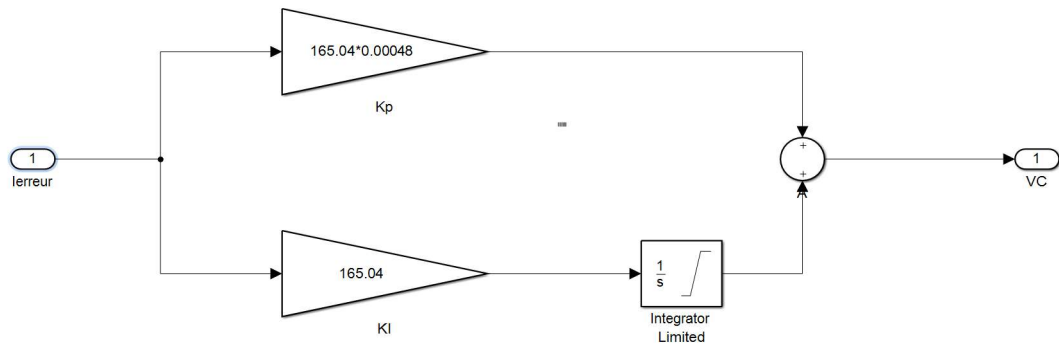
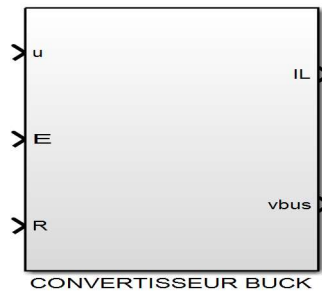
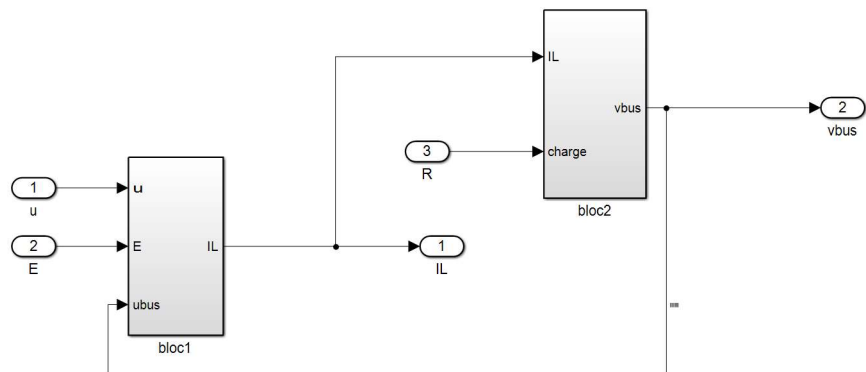


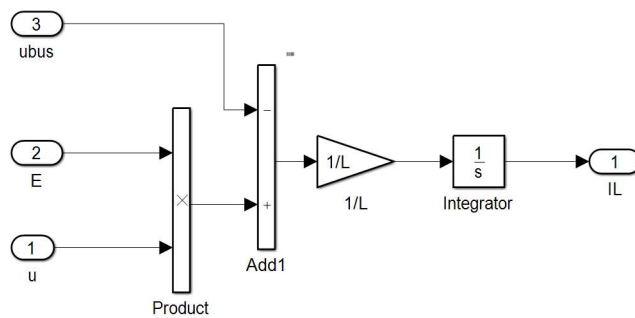
Schéma bloc du convertisseur « Buck »

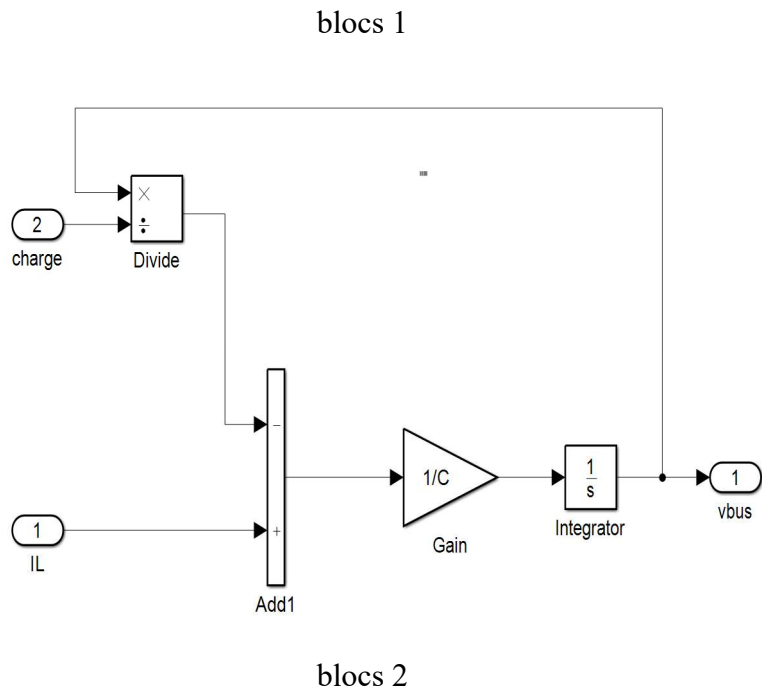


Composition interne du bloc « convertisseur buck »



Composition interne des blocs 1 et 2





Bloc «gestion énergie et sécurité»

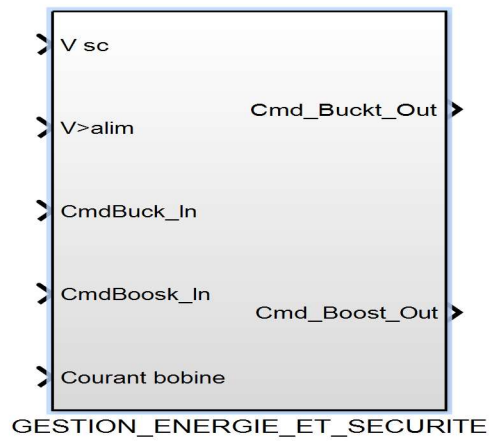
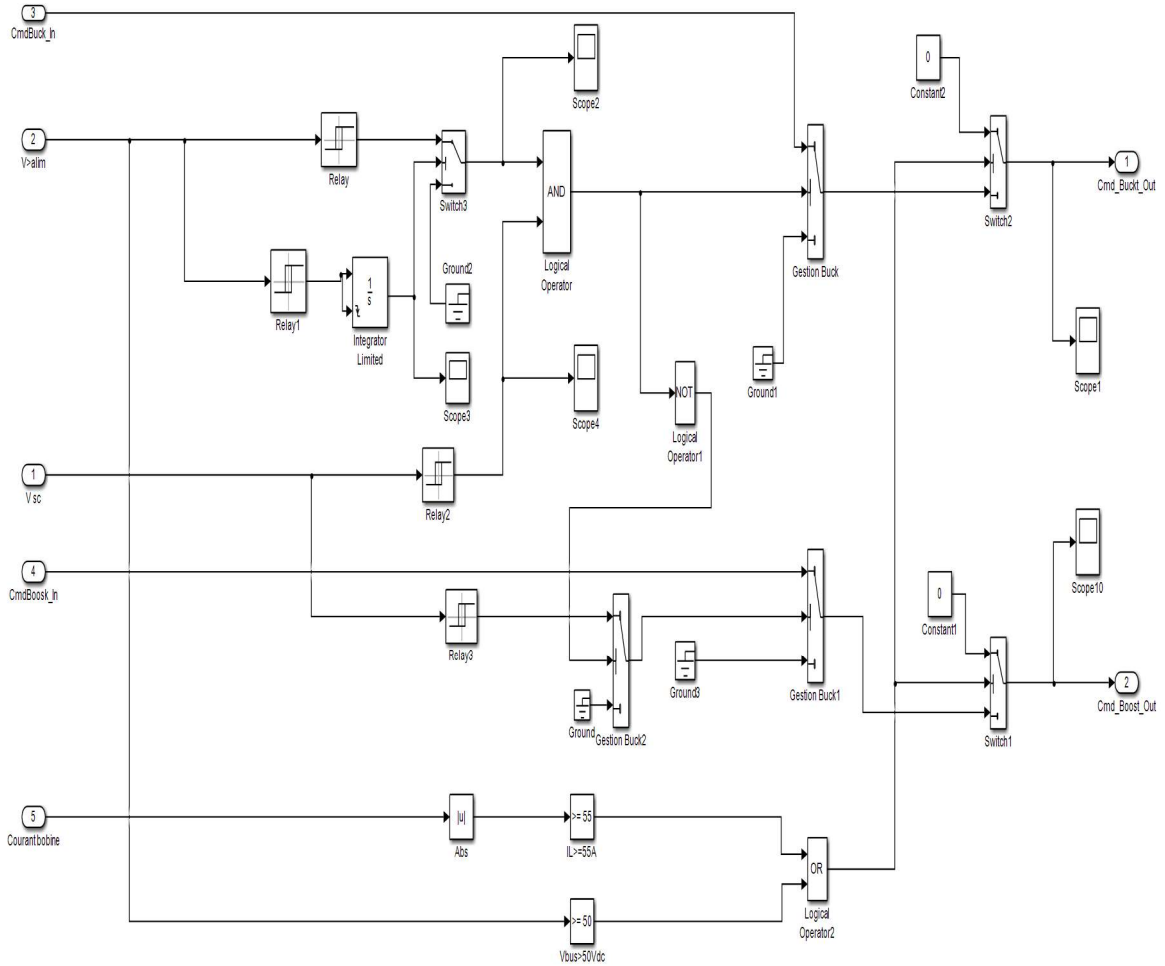


Figure 4: Schéma bloc «gestion énergie et sécurité»

Bloc de la gestion d'énergie : elle est identique en régulation PI



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Baghdadi Fazia .Thèse « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables. université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ».2011
- [2] Mehrdad Ehsani; Yimin Gao; Ali Emad, “Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory and design”, 2e Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
- [3] M. G. Villalva, J. R. Gazoli et E. Ruppert F., «MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS,» *Brazilian Journal of Power Electronics*, vol. 14, n° 1, pp. 35-45, 2009
- [4] Toufik Azib; Olivier Bethoux; Ghislain Remy; Claude Marchand; Éric Berthelot, “Comparaison d'architectures d'hybridation d'une pile à combustible avec des supercondensateurs”, Conférence Électrotechnique du futur (EF 2009), Compiègne, France, 24-25 Septembre 2009
- [5] B. Borowy et Z. Salameh,«Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind / PV system,»*IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, n° 13, pp. 482-488, 1994.
- [6] Dhaker Abbes.« Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ».2012
- [7] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, 2010.
- [8] K.Burges et al.”Modular Hybrid Energy Supply System for Industrial Processes and Rural Electrification ”, *Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini, juin 1996.
- [9] O.Ulleberg, “ Stand-Alone power systems for the future: Optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems”, NTNU, Trondheim, Norvège, p 210, 1998.
- [10] M.Ashari, C. V. Nayar, “An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system”, *Renewable Energy*, vol. 66, No. 1, pp. 1–9, Elsevier Science 1999

- [11] B. Wichert, "PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209–228, Elsevier Science 1997.
- [12] Adouane M, Haddadi M, Touafek K et Ait Cheikh S. "Monitoring and smart management for hybrid plants (photovoltaic generator) in Ghardaia". *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6, 023112 (2014)
- [13] Eduardo Lorenzo. "Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems", pp.59-77 (1994)
- [14] Nichiporuk Oleksiy, simulation fabrication et analyse de cellule photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2005).
- [15] M. MESSAOUDENE Hichem « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques » mémoire de magister Université de Batna, 2014
- [16] Électrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération « Ouvrage dirigé par Nick Jenkins »
- [17] P. Rueda, E. Fernandez, "Multi jonction Ga/As Solar Cell Capacitance and its impact upon Solar Array Regulators", 6th European Space Power Conference, Porto, Portugal, pp.29-34 (2002).
- [18] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le Pompage Photovoltaïque", Éditions, MultiMondes, 1998.
- [19] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Institut National de Science Appliquée de Toulouse.
- [20] SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique »
- [21] Guy Séguier . Francis labrique , philippe Delarue « Électronique et puissance structure , commandes application », 10 édition . Dunod, Paris, 2004, 2011, 2015
5 rue Laromiguière, Paris 5e ISBN 978-2-10-073975-2, www.dunod.com
- [22] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateur", Thèse de doctorat à L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005

- [23] Jérôme Lachaize, “Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PàC) destinés à la traction.”, Thèse de Doctorat à L’Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [24] Mamadou Baïlo Camara, “Supercondensateurs pour échange dynamique d’énergie à bord du véhicule électrique hybride: modélisation, étude des convertisseurs et commande”, Thèse de Doctorat à l’Université de Franche-Comté, France, 2007.
- [25] D. Candusso, “ Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l’alimentation d’un véhicule électrique ”, Thèse de doctorat à l’Institut National Polytechnique De Grenoble, France, 2002.
- [26] N. Rizoug, “Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : application au cyclage d’un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance ”, Thèse de doctorat à l’Ecole Centrale de Lille et l’Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2006.
- [27] L. Zubieta; R. Bonert, “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, N° 1, 2002.
- [28] L. Zubieta; R. Bonert, “Characterization of double-layer capacitors (DLCs) for power electronics applications”, IEEE, Industry Applications Conference (IAS’ 98), St. Louis, MO, USA, 12-15 Oct. 1998.
- [29] F. Belhachemi; S. Rael; B. Davat, “A physical based model of power electric double-layer supercapacitors”, IEEE, Industry Applications Conference (IAS’ 2000), Rome, Italy, 8-12 Oct. 2000.
- [30] F. Belhachemi, “Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance”, Thèse de doctorat à l’Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2001.
- [31] P. Moraal; I. Kolmanovsky, “Turbocharger modeling for automotive control applications”, SAE Technical Paper 1999-01-0908, 1999.
- [32] T. E. Springer; T. A. Zawodzinski; S. Gottesfeld, “Polymer electrolyte fuel cell model”, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 138, N°8, 1991.

- [33] Nassim Rizoug; Patrick Bartholomeüs; Philippe Le Moigne, “Modeling and Characterizing Supercapacitors Using an Online Method”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 12, 2010.
- [34] Damien Paire, “Dimensionnement et gestion d’énergie de systèmes d’entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d’énergie”, Thèse de doctorat à l’Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2010.
- [35] Ahmed Neffati, “Stratégies de gestion de l’énergie électrique d’un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride”, Thèse de Doctorat à l’Université de Toulouse III Paul Sabatier, France, 2013.