الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Option : Energie Solaire et Eolienne

THEME

Modélisation et simulation d'un système de stockage photovoltaïque par supercondensateurs

Proposé et dirigé par,

Mr. MORSLI ABDELKADER

Mr. OULD CHERCHALI. NOUREDDINE

Préparé et présenté par,

Melle. MOSTEFAOUI Selma

Melle. BELLADJEL Razika

AnnéeUniversitaire 2016-2017

الملخص

التخزين بواسطة المكثفات الفائقة في الطاقة الكهروضوئية يكون بنموذج جيد يمكننا من الوصول إليها بما فيه الكفاية لدمجهم في سلسلة تحويل الطاقة الشمسية. على غرار المكثفات الفائقة من قبل الدارات الكهربائية متعددة الفروع التي تضم المقاومات والمكثفات المتغيرة وفقا للتوتر،و التي يتم تحديد قيمها بدقة جيدة بواسطة تجربة تمييز.

علاوة على ذلك، وعلى غرار جميع عناصر السلسلة النموذجية من تحويل الطاقة الضوئية مع مطلب / SIMULINK (الإشعاع الشمسي، التحول الكهروضوئي للوحات ، المنظم ، البطارية و الشحنات). و يتم التحقق من صحة نموذج تخزين الخلايا الكهروضوئية وذلك من قبل التوافق الجيد للقياسات المأخوذة في ظروف حقيقية مع النتائج المتوصل إليها في المحاكاة.

كلمات مفتاحية : التحول الكهروضوئي . تخزين الطاقة الكهربائية . المكثفات الفائقة. النمذجة.

Résumé

Le stockage par supercondensateurs de l'énergie photovoltaïque est modélisé afin de disposer d'un modèle suffisamment fin et accessible permettant de les intégrer dans des chaînes de conversion de l'énergie solaire. Les supercondensateurs sont modélisés par un circuit multi-branche comportant des résistances et des capacités variables suivant la tension, dont les valeurs sont déterminées par une expérience de caractérisation ayant une bonne précision.

Par ailleurs, tous les éléments d'une chaîne typique de conversion de l'énergie photovoltaïque sont modélisés avec le logiciel Matlab/Simulink (gisement solaire, conversion photovoltaïque des panneaux, régulateur, batterie et charges). Le modèle de stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs est ensuite validé par la bonne concordance des mesures relevées en conditions réelles avec les résultats donnés par les simulations.

Mots clés Conversion photovoltaïque ; stockage d'énergie électrique ; supercondensateur ; modélisation.

Abstract

Photovoltaic energy supercapacitors are modeled in order to have a sufficiently fine and accessible model to integrate them into solar energy conversion chains. The supercapacitors are modeled by a multi-branch circuit comprising resistances and variable capacitances according to the voltage, the values of which are determined by a characterization experiment having a good accuracy.

In addition, all the elements of a typical photovoltaic energy conversion chain are modeled with the Matlab / Simulink software (solar field, photovoltaic panel conversion, regulator, battery and loads).

The model for storing photovoltaic energy by supercapacitors is then validated by the good agreement of the measurements taken in real conditions with the results given by the simulations.

Key words: Photovoltaic conversion; Storage of electrical energy; Supercapacitor ; modelization.

Dédicaces

Je dédie ce travail :
A mes très chers parents, pour leurs
Sacrifices et encouragements,
A toute ma famille.
A tous mes amis.

Selma

Dédicaces

Je dédie ce travail :
A mes très chers parents, pour leurs
Sacrifices et encouragements,
A toute ma famille.
A tous mes amis.

Razika

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu le DIEU qui nous a donné la volonté et le courage afin d'arriver à ce modeste travail. Nous remercions nos promoteurs : Mr. A. MORSLI et Mr. N. OULD CHERCHALI qui nous ont orientés et aidés dans toute la durée de notre travail par leurs critiques et leurs suggestions nombreuses.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour avoir accepter de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie électrique de l'Université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont Participés à notre formation.

TABLES DES MATIERES

Introduction général.....1

Chapitre I : Généralistes sur le système photovoltaïque

I.1 Introduction…….....…3

I.2 Différents types de rayonnement solaire ……3

I.3 Principe de fonctionnement la cellule PV……..…4

I.4 Type et rendement des cellules PV……...……..……..5

I.4.1 Rendement d'une cellule……..6

I.5 Association en série…….……6

I.6 Association en parallèle…….…….7

I.7 Présentation des organes du système PV……..8

I.7.1 Définition d'un système PV……..……8

I.8 La cellule PV……...…..……..……9

I.9 Le générateur photovoltaïque……...….....…….9

I.10 Système de conversion……...…9

I.11 Le convertisseur DC/DC…….10

I.11.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur) ……..10

I.11.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)…….....10

I.11.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur) ……...10

I.12 Les batteries…….……11

I.12.1 Les accumulateurs Lithium-Ion……..11

I.12.2 Principe de fonctionnement des accumulateurs Lithium-Ion…….…11

I.13 Les supercondensateurs…….…….13

I.13.1 Principe de fonctionnement des supercondensateurs ……..13

I.13.1.1 Matériaux d'électrodes……..……15

I.13.1.1.1 Le charbon actif……..15

I.13.1.1.2 Les tissus activés…….……16

I.13.1.2. L'électrolyte……..16

I.13.1.3 Le séparateur……...……...…..16

I.14 Conclusion…….....……..16

Chapitre II: Modélisation du système photovoltaïque

II.1 Introduction.....17

II.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque.....17

II.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale.....17

II.2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle.....18

II.2.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode.....18

II.3 Les convertisseurs DC-DC 19

II.3.1 Hacheur dévolteur 20

II.3.1.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D).....22

II.3.2 Hacheur survolteur 23

II.3.2.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D).....24

II.3.3 Hacheur dévolteur-survolteur 26

II.3.3.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de converion M(D).....27

II.4 Modélisation d'une batterie.....29

II.5 Modélisation des supercondensateurs 31

II.5.1 Etude théorique de la double couche électrique.....31

II.5.2 Couche de Helmholtz.....31

II.5.3 Couche de Gouy et Chapman.....32

II.5.4 Modification de Otto Stern-Hamburg……...38

II.5.5 Redistribution des charges.....42

II.5.6 Etude de l'effet de signaux alternatifs sur le SC.....45

II.5.6.1 Effet sur le diélectrique.....45

II.5.6.2 Effet sur la capacité.....48

II.5.6.3 Effet sur la résistance.....49

II.5.6.4 Effet sur l'impédance.....51

II.6 Conclusion.....52

Chapitre III Systèmephotovoltaique commande par P & O

III.1 Introduction.....53

III.2. Simulation du GPV sans MPPT.....53

III.2.1 Simulation PV avec variation de la température 55

III.2.2 Simulation du PV avec variation de l'irradiation 56

III.3 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT).....57

III.3.1 Simulation de la méthode MPPT 59

III. 3.1.1 Principe des commandes p&o 59
III.4 Simulation du GPV avec MPPT 62
III.5 Conclusion.....63

Chapitre IV hybridation sc batterie

VI.1 Introduction 64
IV.2 Domaines d'applications 64
IV.3 Conception du stockage hybride 66
IV.3.1 Régulation de courant du convertisseur boost.....66
IV.3.2 Régulation de courant du convertisseur buck/boost.....67
IV.3.3 Résultats de simulation du système hybride.....68
IV.4 Batterie.....68
IV.5 Supercondensateur.....71
IV.6 Conclusion.....74

Conclusion general 75
Annex.....77
Bibliographies 85

LISTES DES FIGURES

Chapitre (I)

Figure I.1. Les composants du rayonnement solaire.....4

Figure I.2. Structure d'une cellule PV.....5

Figure I.3. Types de cellules PV.....5

Figure I.4. Association des modules en série.....6

Figure I.5. Caractéristique I-V en association en série.....7

Figure I.6 Caractéristique I-V en association en série.....7

Figure I.7.Association des modules en parallèle 7

Figure I.8. Caractéristique I-V en association en parallèle.....8

Figure I.9. Caractéristique V-P en association en parallèle.....8

Figure I.10. Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV.....9

Figure I.11. Principe de fonctionnement des l'accumulateur au lithium –ion.....12

Figure I.12 Condensateur électrolytique (a) et SC (b).....13

Figure I.13 .Exemple des supercondensateurs du fabriquant EPCOS.....14

Figure I.14. Création des couches double électrique.....14

Figure I.15. Schéma représentatif d'un supercondensateur.....15

Figure I.16. Structure microscopique d'une électrode au charbon actif.....15

Figure I.17. Structure microscopique d'un tissu activé.....16

Chapitre (II)

Figure II.1. Circuit model d'une cellule photovoltaïque idéale.....17

Figure II.2. Modèle électriue d'une cellule solaire avec une seule diode et une R shunt..18

Figure II.3. Modèle électrique d'une cellule solaire sans R shunt.....18

Figure II.4. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....19

Figure II.5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....20

Figure II.6. Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....20

Figure II.7. Schéma équivalents du hacheur dévolteur 21

Figure II.8. Forme d'onde de la tension d'inductance Vl (t) pour un hacheur buck idéal.....22

Figure II.9. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Buck.....23

Figure II.10. Schéma de principe d'un convertisseur Boost 23

Figure II.11. Schéma équivalents du hacheur survolteur.....24

Figure II.12.Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Boost.....26

Figure II.13. Convertisseur dévolteur-survolteur.....26

Figure II.14. Schéma équivalents du hacheur 26

Figure II.15. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Buck-Boost.....28

Figure II.16. Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide.....29

Figure II.17. Représentation de l'électrolyte en lames Tirée de Bard et Faulkner.....32

Figure II.18. Potentiel de surface suivant le modèle de Gouy-Chapman.....36

Figure II.19. Potentiel de surface suivant le modèle de Gouy-Chapman et un potentiel d'électrode de 1.5V.....37

Figure II.20. Capacité surfacique suivant le modèle de Gouy-Chapman.....38

Figure II.21. Capacité surfacique de la double couche avec le modèle de Stern et les couches de Helmholtz et Gouy-Chapman.....40

Figure II.22. Capacité surfacique de la double couche avec le modèle de Stern.....40

Figure II.23. Capacité surfacique en fonction de la tension du modèle de Stern.....41

Figure II.24. Capacité en fonction de la tension avec le modèle de Stern.....42

Figure II.25. Régulation à 48V d'un module de SC.....43

Figure II.26 Mesure de la tension du SC lors de la redistribution des charges.....43

Figure II.27. Tension du SC lors de la redistribution des charges avec l'équation de Tafel.....44

Figure II.28. Courant calculé avec l'équation de Tafel.....44

Figure II.29. Diélectrique en fonction de la fréquence.....45

Figure II.30. Capacité et résistance en fonction de la fréquence Tirée de Kotz, Hahn, et Gallay 47

Figure II.31. Diélectrique en fonction de la fréquence.....47

Figure II.32. Capacité calculée en fonction de la fréquence.....48

Figure II.33. Capacité en fonction de la fréquence.....48

Figure II.34. Conductance en fonction de la fréquence. 50

Figure II.35. Résistance en fonction de la fréquence.....50

Figure II.36. Capacité en fonction de la fréquence.....51

Figure II.37. Tracé de Nyquist du SC.....52

Figure II.38. Efficacité du stockage suivant la fréquence.....53

Chapitre (III)

Figure III.1. Caractéristique I -V d'un module PV.....54

Figure III.2. Caractéristique P -V d'un module PV.....55

Figure III.3. Caractéristique I-t d'un module PV.....55

Figure III.4. Caractéristique V- t d'un module PV.....55

Figure III.5. Caractéristique P-t d'un module PV.....56

Figure III.6. Caractéristiques I-V d'un module PV pour différente T et E =1000W/m2.....56

Figure III.7. Caractéristiques P -V d'un module PV Pour différente T et E= 1000W/m2.....57

Figure III.8. Caractéristiques I-V d'un module PV pour différents E et T=25C°.....57

Figure III.9. Caractéristique P-V d'un module PV Pour déférente E et une T=25C°.....58

Figure III.10. Schéma synoptique d'un système PV avec MPPT.....59

Figure III.11. Puissance et la tension V de sortie avec et sans MPPT (rapport cyclique fixé à 0.85), pour des G et T variables.....59

Figure III.12. Caractéristique PPV -VPV d'un panneau solaire.....61

Figure III.13. Algorithme type de la méthode P&O.....62

Figure III.14. Caractéristiques I-t d'un module PV.....65

Figure III.15. Caractéristiques V-t d'un module PV.....65

Figure III.16. Caractéristiques P-t d'un module PV 65

Figure III.17. Caractéristiques D-t d'un module PV.....66

Chapitre (IV)

Figure IV.1. Schéma comparatif.....68

Figure IV.2. Synoptique de la source hybride.....69

Figure IV.3. Schéma du convertisseur Boost contrôlé par PI.....70

Figure IV.4. Schéma du convertisseur Buck/Boost contrôlé par PI.....70

Figure IV.5. Schéma Simulink du modèle de l'ensemble batterie– SC.....71

Figure IV.6. Courant de référence de la batterie.....72

Figure IV.7. Courant de la batterie.....72

Figure IV.8. Tension de la batterie.....73

Figure IV.9. Puissance de la batterie.....73

Figure IV.10. État de charge de batterie.....73

Figure IV.11. Courant de référence du supercondensateur.....75

Figure IV.12. Courant de SC.....75

Figure IV.13. Tension de SC.....75

Figure IV.14. Puissance de SC.....76

Figure IV.15. État de charge de SC.....76

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre (I)

Tableau I.1. Les différents types des cellules avec leur rendement.....6

Tableau I.2. Caractéristique des batteries Lithium-Ion.....12

Nomenclature

V	tension aux bornes de la jonction P-N d'une cellule photovoltaïque (v)
I_D	courant d'obscurité (A)
I_S	courant de saturation de la diode (A)
V_C	tension de la cellule (V)
k	constante de Boltzman
T_{CK}	température de la cellule (°K)
I_C	courant de la cellule (A)
I_{CC}	courant de court-circuit de la cellule (A)
I_{Ph}	photo courant de la cellule (A)
I_S	courant de saturation de la cellule (A)
V_C	tension de la cellule (V)
R_S	résistance série (Ω)
R_{Sh}	résistance shunte (Ω)
n	constante non-idéalité de la diode.
σ	la densité de charge en C .m^{-2}
E	l'éclairement.
C_d	la capacité surfacique en F· m^{-2} .
η	l'éclairement
i_0	densité de courant d'échange
α	détermine la courbe de Tafel.
D	rapport cyclique.

Abréviation

PV	photovoltaïque
SC	supercondensateur
P&O	Perturbation et observation
MPPT	maximum power point tracking
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
GPV	Générateur photovoltaïque.
CA	Courant alternatif.
CC	Courant continu.
SPS	Sim Power Systems
Li-Ion	Lithium Ion
DC	Courant Continu (Direct Current).
AC	Courant Alternatif (Alternative Current).

Les autres abréviations et Nomenclature sont expliqués dans le texte.

ABREVIATIONS

PV	Photovoltaïque
SC	Supercondensateur
P&O	Perturbation et observation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
GPV	Générateur photovoltaïque
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu.
SPS	Sim Power Systems
Li-Ion	Lithium Ion
DC	Courant Continu (Direct Current)
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)

INTRODUCTION GENERALE

Le développement de l’exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d’électricité par des sources d’énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d’approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l’énergie. Le caractère renouvelable d’une énergie dépend de la vitesse à la quelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à la quelle elle est consommée.

Afin de limiter les émissions de gaz à effets de serre, on assiste actuellement au développement de moyens de production d'électricité propres et compatibles avec un développement durable : éolien, solaire, énergie des vagues, hydroélectricité, etc. Ces moyens nécessitent l'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie électrique de deux types : batteries et supercondensateurs. Lorsque l'énergie est produite de façon continue sur plusieurs heures (dans le cas du solaire par exemple), elle peut être stockée de façon régulière dans des batteries, avec des temps de charge et de décharge (lors de la restitution de cette énergie à l'utilisateur) de plusieurs heures. Au contraire, lorsque le moyen de production d'électricité fonctionne sous un régime impulsionnel (dans le cas de piles électrochimiques, par exemple), il est nécessaire d'avoir des dispositifs de stockage acceptant des charges et décharges rapides (quelques secondes à quelques minutes) comme des supercondensateurs. L'énergie électrique ainsi produite et stockée peut être utilisée notamment dans le domaine des transports pour des véhicules électriques ou hybrides, des tramways et trains sans caténaires (fils de contact) évoluant en milieu urbain. Là encore les systèmes de stockage jouent un rôle déterminant car ils assurent à la fois l'autonomie du véhicule - grâce aux batteries - mais également sa puissance dans les phases de démarrage, de dépassement ou de franchissement d'obstacles - grâce aux supercondensateurs. Afin d'assurer le développement des véhicules électriques hybrides et leur commercialisation, l'industrie a actuellement besoin de supercondensateurs [1].

Ces derniers constituent une nouvelle technologie de stockage, d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques [2].

Ce travail comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, Généralités sur le système solaire photovoltaïque.

Le second chapitre, sera présenté la Modélisation du système photovoltaïque.

Au troisième chapitre, on présentera commande par la technique de la perturbation et observation "P&O" du system photovoltaïque.

Enfin, le quatrième chapitre sera présenté sur l'hybridation supercondensateur et batterie.

Et on termine ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Chapitre I : Généralistes sur le système photovoltaïque

I.1 Introduction……...…3

I.2 Différents types de rayonnement solaire ……3

I.3 Principe de fonctionnement la cellule PV……..…4

I.4 Type et rendement des cellules PV……...……...……..5

I.4.1 Rendement d'une cellule……..6

I.5 Association en série…….……6

I.6 Association en parallèle…….…….7

I.7 Présentation des organes du système PV……..8

I.7.1 Définition d'un système PV…….……8

I.8 La cellule PV……...…..……...……9

I.9 Le générateur photovoltaïque……...….....……9

I.10 Système de conversion……...…9

I.11 Le convertisseur DC/DC…….10

I.11.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur) ……..10

I.11.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)…….....10

I.11.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur) ……...10

I.12 Les batteries…….……11

I.13 Les supercondensateurs…….…….13

I.13.1 Principe de fonctionnement des supercondensateurs ……..13

I.14 Conclusion…….....……16

I.1 Introduction

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus Proche de la terre, Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [3]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule PV.

Le nom PV vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule PV fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. [4]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le PV prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules PV.

I.2 Différents types de rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère. Le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol. On distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct : Est reçue directement du soleil. Sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentre par des miroirs.
- Le rayonnement diffus : c**'**est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.…).

- Le rayonnement global **:** le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol) [5]. Dans la figure ci-dessous figure (I.1) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

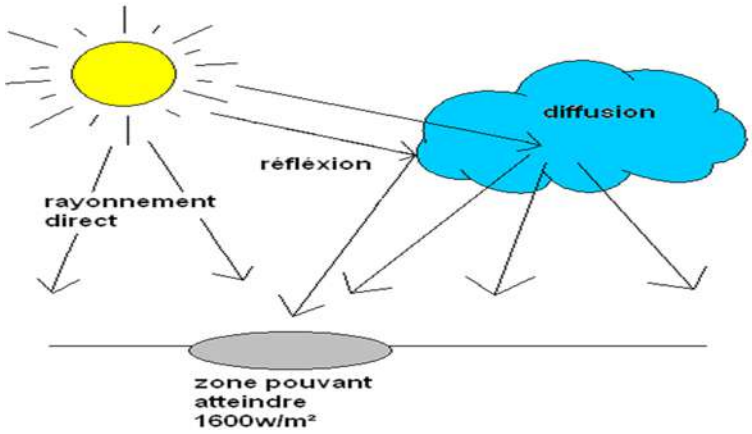


Figure I.1. Les composants du rayonnement solaire.

I.3 Principe de fonctionnement la cellule PV

Une cellule PV est un dispositif semi-conducteur généralement a base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [6].

La structure d'une cellule PV est illustrée dans la figure (I-2) ci-dessous.

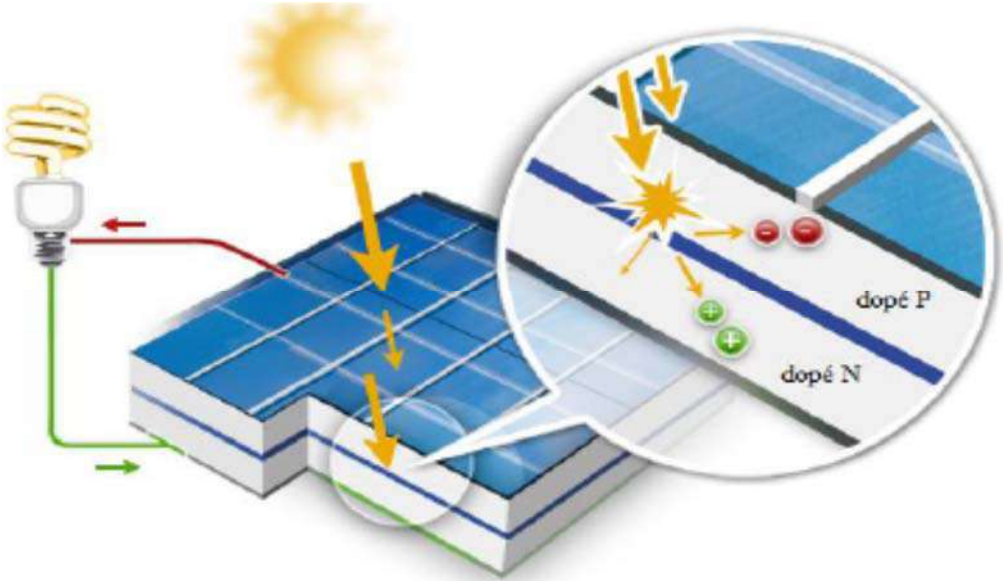
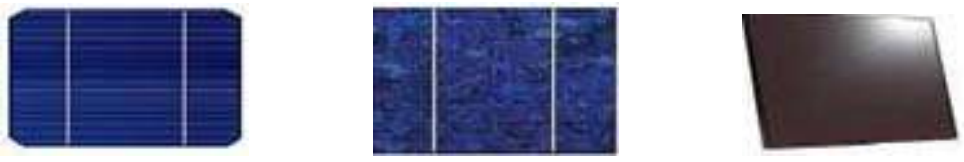


Figure I.2. Structure d'une cellule PV.

I.4 Type et rendement des cellules PV

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules PV), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7].

- Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- Les cellules poly cristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication st moins important, cependant leur rendement est plus faible.
- Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



(a) (b) (c)

Figure I.3. Types de cellules PV. (a) silicium monocristallin. (b) silicium poly cristallin. (c) silicium amorphe **[8]**

I.4.1 Rendement d'une cellule

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Tableau I.1. Les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe	13%	5 à 9%
Silicium poly cristallin	19.8%	11 à 15%
Silicium monocristallin	24.7%	13 à 17%

I.5 Association en série

Dans une association en série, comme illustré sur la figure ci-dessous, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules.

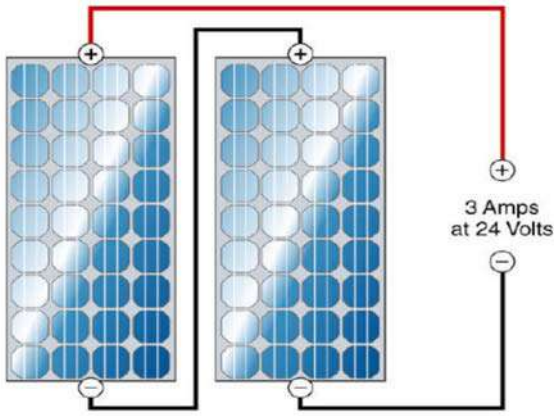


Figure I.4. Association des modules en série [9].

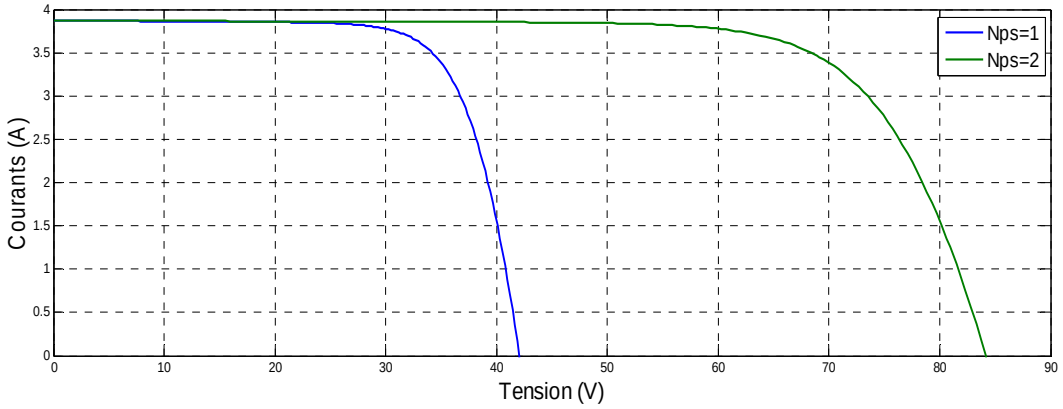


Figure I.5. Caractéristique I-V en association en série.

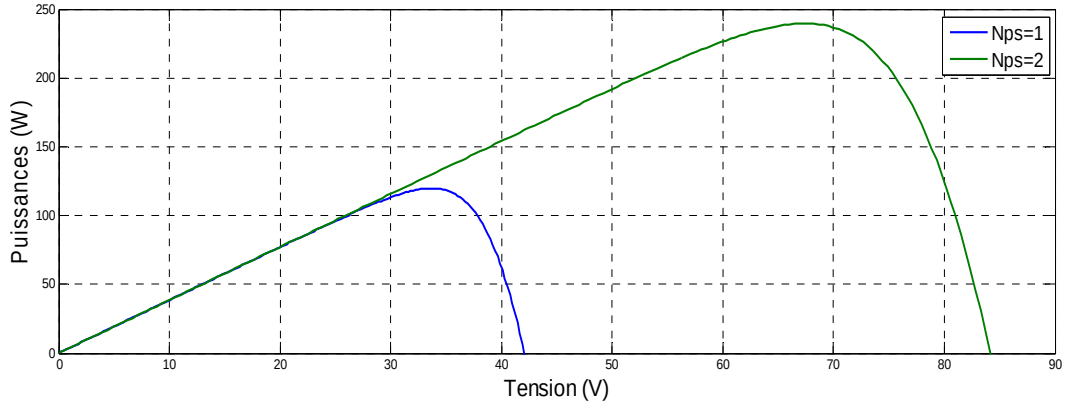


Figure I.6 Caractéristique I-V en association en série.

I.6 Association en parallèle

Si un grand courant est exigé dans un système, les piles solaires sont reliées en parallèle comme illustré sur la figure ci-dessous.

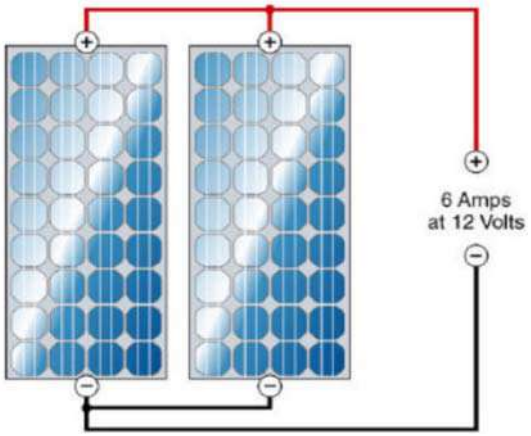


Figure I.7. Association des modules en parallèle [10].

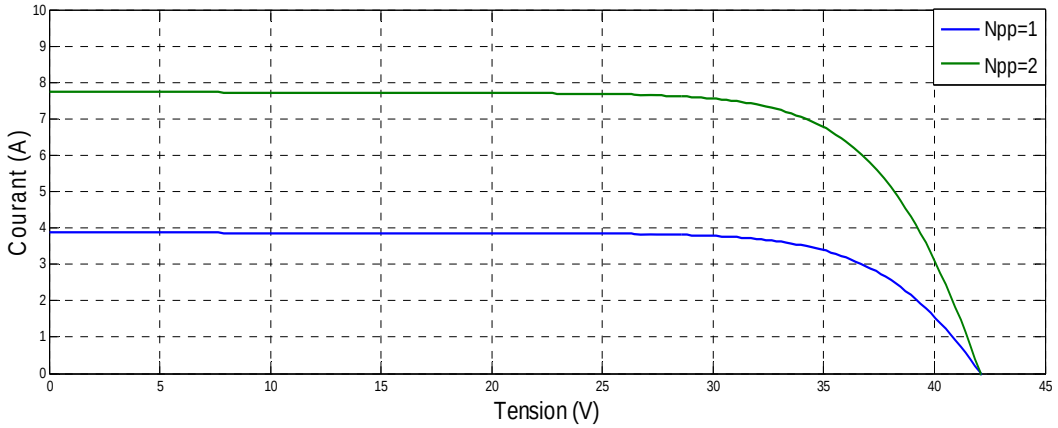


Figure I.8. Caractéristique I-V en association en parallèle.

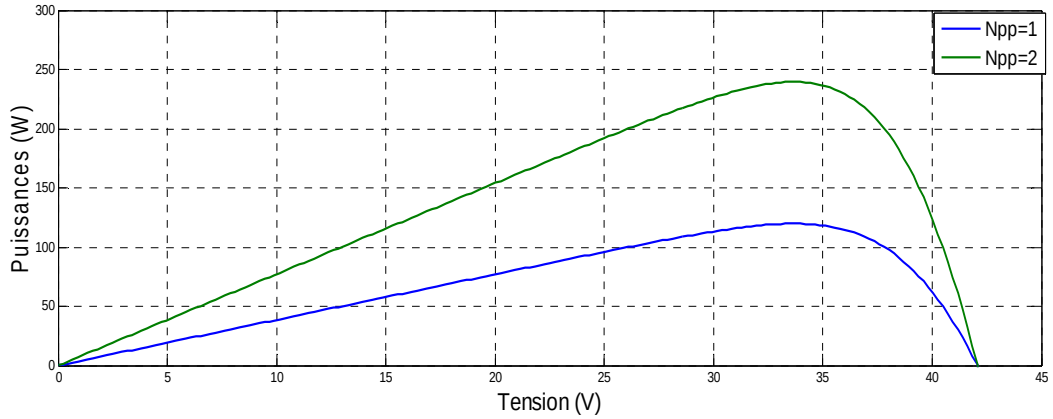


Figure I.9. Caractéristique V-P en association en parallèle.

I.7 Présentation des organes du système PV

I.7.1 Définition d'un système PV

L'intérêt essentiel des générateurs PV est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard, puis très largement par la suite pour l'espace. Les premières installation PV utilisées au sol datent de 1956 et ont été conçues pour des applications en sites isolés et principalement dans les pays en voie de développement où les réseaux de distribution d'énergie sont généralement restreints aux grands centres urbains.

Les premiers systèmes conçus ne délivraient que de très faibles puissances, de l'ordre de quelques dizaines de watts, pour subvenir à des besoins très spécifiques, tels que balises de navigation ou émetteurs radio.

Un système PV se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications les récepteurs.

Cet ensemble, appelé aussi "Balance Of System" ou BOS, comprend tous les équipement entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [11].

I.8 La cellule PV

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un GPV [12].

I.9 Le générateur photovoltaïque

Des modules multiples peuvent être câblés ensemble en série ou parallèle pour livrer la tension et le courant nécessaire. Le groupe de modules s'appelle un panneau PV.

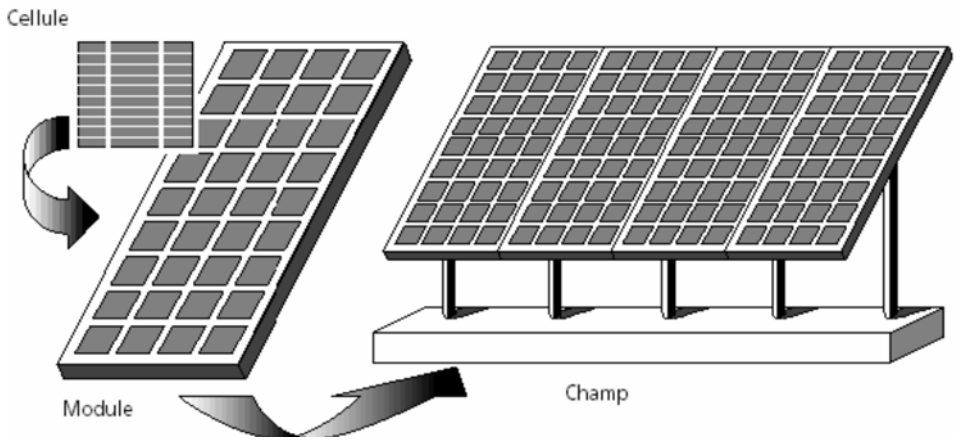


Figure I.10. Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV [13].

I.10 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur DC/DC), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur DC/AC).

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant *I* et de tension *V* du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{PV}=I_{PV}*V_{PV}$.

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée. [14][15].

I.11 Le convertisseur DC/DC [16]

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au MPP Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT. Son rendement se situe entre 90 et 95%.

I.11.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur)

Le convertisseur Buck (abaisseur) joue le rôle de conversion sa tension d'entrée en une tension de sortie plus faible.

I.11.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)

Le nom implique son application typique de la conversion d'une faible tension d'entrée à une haute tension de sortie, l'essentiel le fonctionnement est l'inverse d'un convertisseur buck.

I.11.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des configurations de buck et de boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension d'entrée DC en n'importe quelle tension de sortie DC désirée.

I.12 Les batteries

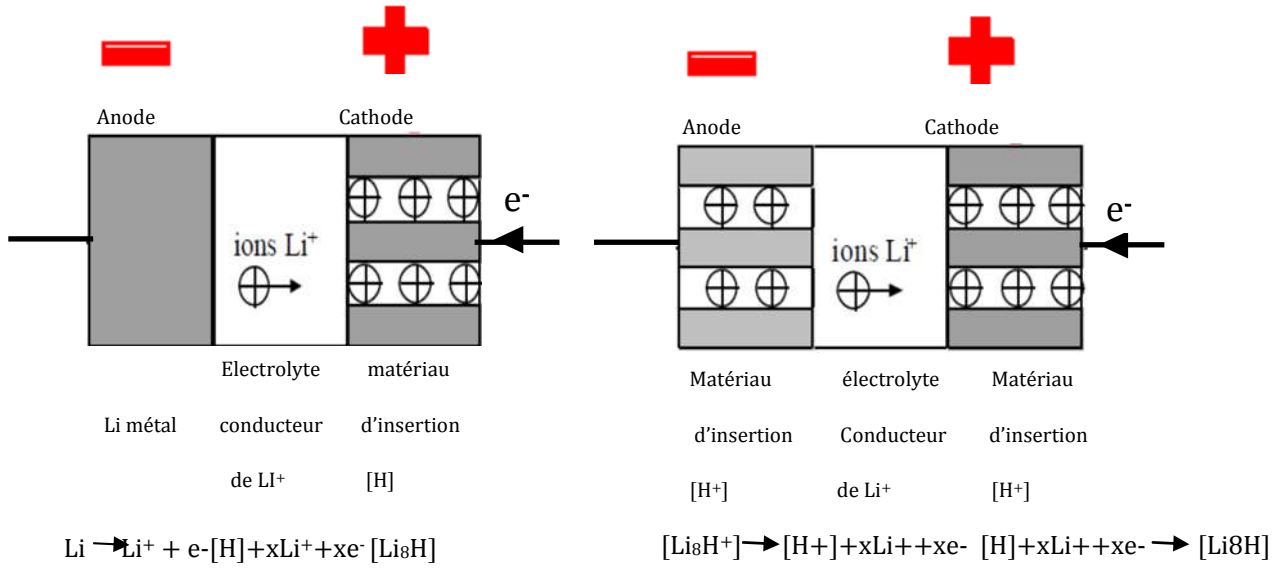
I.12.1 Les accumulateurs Lithium-Ion

Ces accumulateurs font partie des nouveaux types diffusés depuis 10 ans et fort prometteurs. Leur énergie et puissance massique sont très élevées par comparaison au Plomb-Acide, respectivement 150 Wh.kg-1et 300 W.kg-1. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur [17]

I.12.2 Principe de fonctionnement des accumulateurs Lithium-Ion [18]

Il existe deux types d'accumulateur au lithium. Les accumulateurs « Lithium Carbone » ou « Lithium - Ion » et les accumulateurs « Lithium - Métal ». Mais, le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone.

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative sous forme ionique Li^+migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion Li^+dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La Figure (I-11)a montre le fonctionnement d'un accumulateur Lithium métal. L'électrode métallique libère un ion qui vient s'insérer dans l'électrode positive. Dans le cas du Lithium - Ion Figure (I- 11b), appelé ainsi car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, le lithium fait « le va- et-vient » entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur. Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite, d'où le nom donné à ce type d'accumulateurs. Lors de la décharge, la structure en carbone de l'anode libère alors ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode.



a. Accumulateur au lithium métal **b.** Accumulateur aux ions lithium

Figure I.11. Principe de fonctionnement des l'accumulateur au lithium –ion.

La réaction générale mise en jeu dans un accumulateur Lithium- Ion à oxyde LiNiO2 est la suivante :

$$Li_{(1-x)}NiO_2 + Li_xC_6 \leftrightarrow LiNiO_2 + 6C$$

Le tableau suivant résume les autres caractéristiques principales d'un accumulateur Lithium Ion :

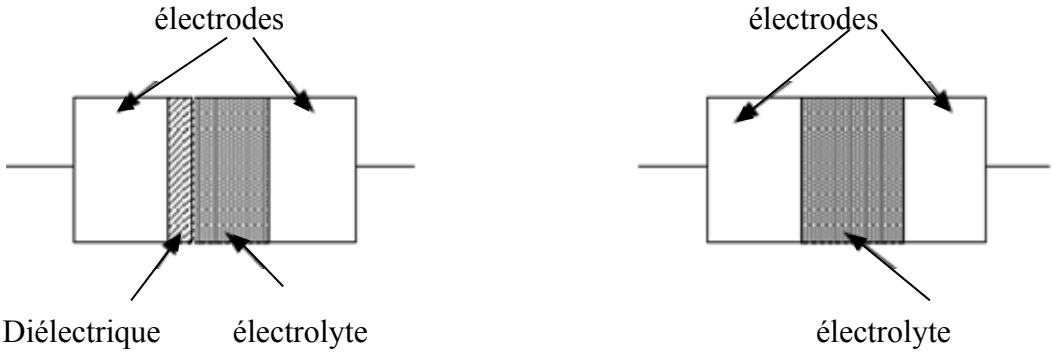
Tableau I.2. Caractéristique des batteries Lithium-Ion.

Couple	Li/LiMO2	
Température de fonectionnement	-25 à 60	[°C]
Energie massique théorique	275	[Wh/Kg]
Densité d'énergie	90 à 150	[Wh/Kg]
Puissance massique	150 à 300	[W/Kg]
Coefficient de surcharge admissible	1 à 2	[%]
Rendement énergitique	85 à 95	[%]
Tension par cellule chargée	3.2	[V]

I.13 Les supercondensateurs

I.13.1 Principe de fonctionnement des supercondensateurs [19][20]

Un SC se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide Figure (II.13). L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du solvant contenu dans l'électrolyte. En effet, ces SC n'exploitent pas la polarisation diélectrique pour le stockage de l'énergie mais la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode-électrolyte.



Condensateur classique(a) supercondensateur(b)

Figure I.12 Condensateur électrolytique (a) et SC (b).

L'utilisation d'un système de stockage d'énergie est souvent nécessaire pour les applications de type traction électrique. Le composant de stockage est utilisé :

- dans les systèmes isolés où il alimente des dispositifs demandant une énergie réduite.

- dans les systèmes hybrides où il joue un rôle en terme d'apport de puissance ou d'énergie selon l'application (ex : phases d'accélération ou de freinage). Jusqu'à maintenant, les systèmes les plus utilisés sont les accumulateurs qui ont une puissance spécifique et une autonomie relativement élevée. Les condensateurs classiques ont une autonomie insuffisante, mais possèdent une puissance spécifique incomparable. Les SC apparaissent comme des composants intermédiaires en termes de propriétés énergétiques qui les rendent très intéressants car ils n'ont pratiquement pas de concurrents dans ce domaine.



Figure I.13 . Exemple des supercondensateurs du fabriquant EPCOS.

Dans un condensateur, l'énergie emmagasinée est liée à la valeur de C et à la tension de service $= \frac{1}{2} CV^2$, où $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{D}$ (S : surface en regard, D : épaisseur diélectrique).

Si on veut accroître la capacité de stockage, il faut augmenter la permittivité relative ou accroître la valeur du rapport $\frac{S}{D}$. Le principe de base des SC est lié à la valeur élevée de $\frac{S}{D}$. Ainsi, les charges se trouvent localisées sur des surfaces très importantes (électrodes poreuses) et à des distances très faibles. Il y a création de 2 zones de charge d'espace (principe de double couche électrochimique) (Figure I.15) où apparaissent les ions de l'électrolyte et les charges opposées au sein de l'électrode [21].

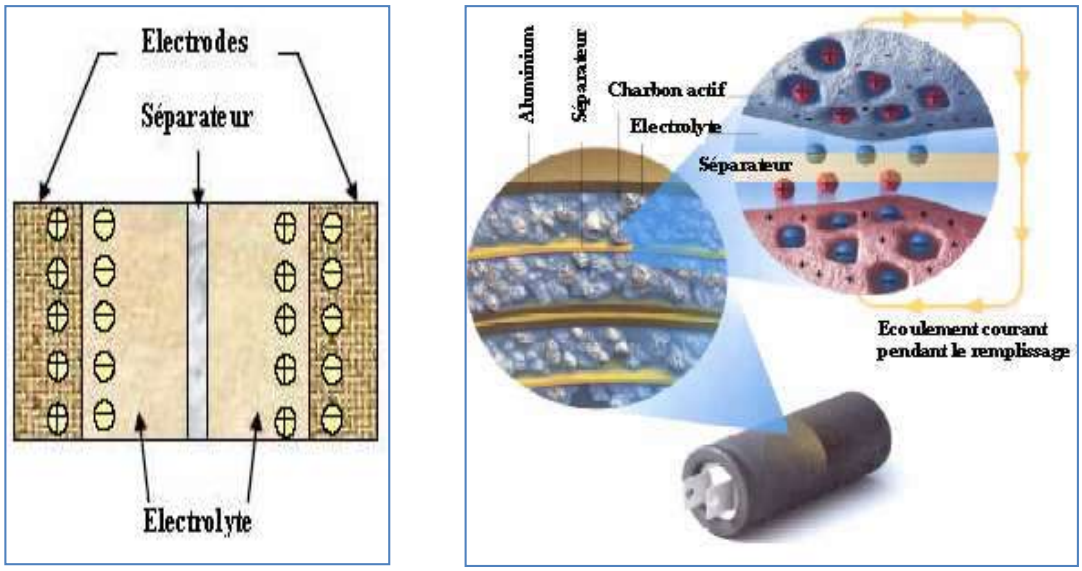


Figure I.14. Création des couches double électrique.

Un SC peut être schématisé par deux capacités représentatives des charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte **(**Figure 1.18**)**.



Figure I.15. Schéma représentatif d'un supercondensateur.

I.13.1.1 Matériaux d'électrodes

Il existe différents types de composés carbonés pouvant servir de matériaux d′électrodes polarisables. En particulier, les charbons actifs et les fibres de tissu activé, qui possèdent des surfaces actives très importantes et permettent d′accroître la capacité.

I.13.1.1.1 Le charbon actif

Le charbon actif est un composé carboné. Les procédés de fabrication des carbones activés sont de deux types : l'activation dite « physique » et l'activation « chimique ». Il existe divers types de charbon actif ayant des surfaces spécifiques comprises entre 100m^2/g et 2500m^2/g. La tendance actuelle est d'utiliser des charbons de surfaces comprises entre 700 et 1800 m^2/g. Des études récentes montrent qu'une surface trop développée a deux inconvénients : une capacitance volumique relativement faible et un taux d'oxygène trop élevé [22]. D'autres études dans ce domaine ont montré que la résistance est plus faible et les caractéristiques électrochimiques meilleures lorsque la taille des pores est adaptée à la taille de l'ion actif dans la double couche. Enfin un taux d'impuretés métalliques trop important (>100ppm) entraîne une autodécharge importante. La figure suivant montre la structure carbonée de base.

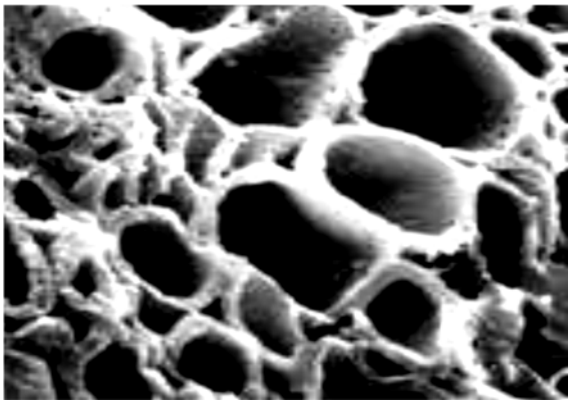


Figure I.16. Structure microscopique d'une électrode au charbon actif.

I.13.1.1.2 Les tissus activés

Ce sont des produits basés sur l'utilisation de fibres polymères ayant subi une calcination et une activation. Les surfaces spécifiques actives atteignent là encore 2000 m2/g. Par rapport aux charbons actifs, ces produits présentent des porosités bien supérieures, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés [23, 24, 25, 26, 27]. Le seul désavantage de ce type d'électrode est le coût très supérieur par rapport à la technologie basée sur les charbons actifs. La figure suivante montre la structure d′un tissu activé, observé en microscopie électronique :



Figure I..17. Structure microscopique d'un tissu activé.

I.13.1.2. L'électrolyte

Le choix de l'électrolyte se base sur deux critères : la conductivité et le potentiel maximal supporté par l'électrolyte. Il existe deux types d'électrolyte : aqueux comme H2SO4 ou KOH qui possèdent un domaine de potentiel limité, mais une conductivité élevée. L'autre solution est l'utilisation d'un électrolyte organique (tel que le Carbonate de Propylène) avec un domaine de potentiel plus élevé mais une conductivité plus faible. L′électrolyte peut être liquide ou polymère (plastique ou gel). Afin d'obtenir des densités de puissances importantes, la technologie ″film mince-électrolyte liquide″ semble la mieux adaptée.

I.13.1.3 Le séparateur

Il existe peu de solutions pour le séparateur : le séparateur le plus utilisé est sans doute le Celgard, mais il existe aussi des séparateurs cellulosiques [28, 29, 30].

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général, Nous avons donnée une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule PV, les différents types des cellules solaires les différents d'assemblage des GPV et aussi éléments de stockage d'énergie (SC et la batterie).

CHAPITRE II

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1 Introduction.....17
II.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque.....17
II.3 Les convertisseurs DC-DC 19
II.4 Modélisation d'une batterie.....29
II.5 Modélisation des supercondensateurs 31
II.6 Conclusion.....52

II.1 Introduction

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système PV avec stockage, Nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul MATLAB – Simulink. Dans le chapitre précédent, nous avons énumère les différents composants d'un tel système. Nous présentons le modèle d'un système PV avec un élément de stockage énergétique.

II.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque

II.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

Le courant dans la cellule produit par l'irradiation solaire est appelée "photo courant" I_{Ph}. Sa valeur reste la même quelle que soit la tension externe et, par conséquent, il peut être mesuré par le courant de court-circuit ($I_{CC} = I_{Ph}$). [31].

Ce courant varie de façon linéaire avec l'intensité du rayonnement solaire. Le courant est alors décrit comme la différence entre le courant d'obscurité (Ic) et la photo courant(Ie). Si la convention de signes de courant est inversée pour décrire le courant qui est produit par une cellule éclairée (I_C), alors l'équation de la cellule peut être écrite comme indiqué en équation (II-2) :

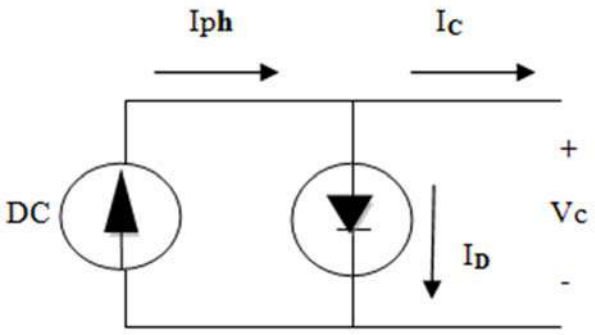


Figure II.1. Circuit model d'une cellule photovoltaïque idéale [23].

$$I_D = I_S\, e^{\left(\frac{q\,V_c}{k\,T_{ck}}\right)} - 1 \qquad \text{(II.1)}$$

$$I_D = I_S\, e^{\left(\frac{q\,V_c}{k\,T_{ck}}\right)} - 1 \qquad \text{(II.2)}$$

C'est l'équation mathématique qui modélise le comportement d'une cellule PV idéale montré dans la figure (II.1). La production de photo courant est modélisée avec une source de courant DC et le courant d'obscurité est modélisée avec une diode dénommée diode de diffusion [32]

II.2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque réelle.

II.2.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode

Le circuit d'un modèle de cellules PV souvent utilisé à des fins de recherche est illustré à la figure (II.2).

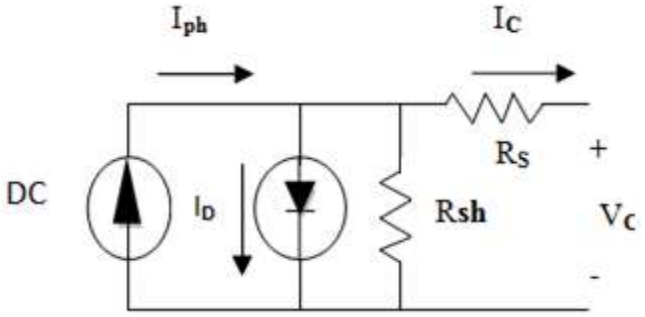


Figure II.2. Modèle électrique d'une cellule solaire avec une seule diode et une R shunt [33].

L'équation (II-3) décrit les caractéristiques I-V de cette cellule :

$$I_C = I_{ph} - I_S\left(e^{\left(\frac{(V_C+I_C R_S)q}{n\,k\,T_{ck}}\right)} - 1\right) - \frac{V_C + I_C\,R_S}{R_{Sh}} \qquad \text{(II.3)}$$

La résistance shunt peut être négligée :

$$R_{Sh} = \infty \qquad \text{(II.4)}$$

Le circuit équivalent est représenté par la figure (II.3) [34]:

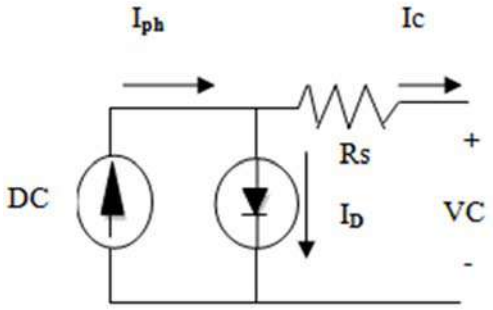


Figure II.3. Modèle électrique d'une cellule solaire sans R shunt [35].

$$I_C = I_{Ph} - I_s\left(e^{\frac{(V_C+I_C R_S)q}{n\,k\,T_{ck}}} - 1\right) \qquad \text{(II.5)}$$

V_{th} : la tension thermique. Elle est donnée par :

$$V_{th} = \frac{T_{ck}\ k}{q} \qquad \text{(II.6)}$$

T_{CK} : température de la jonction de la cellule qui est donnée par la relation suivante :

$$T_{ck} = T_a + (NOCT - 20)\frac{G_i}{800} \qquad \text{(II.7)}$$

NOCT : température nominale de fonctionnement des cellules PV dans les conditions suivantes : un ensoleillement de 800 W/m², une température ambiante de 20°C et une masse d'air optique AM égale à 1. (Nominal Operating Cell Température),

Gi : irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m²),

Ta : température ambiante [36].

II.3 Les convertisseurs DC-DC

Les hacheurs sont des convertisseurs du type DC-DC permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [37].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [38].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage Figure (II.4), la tension d'entrée est "hachée" à une Fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [39].

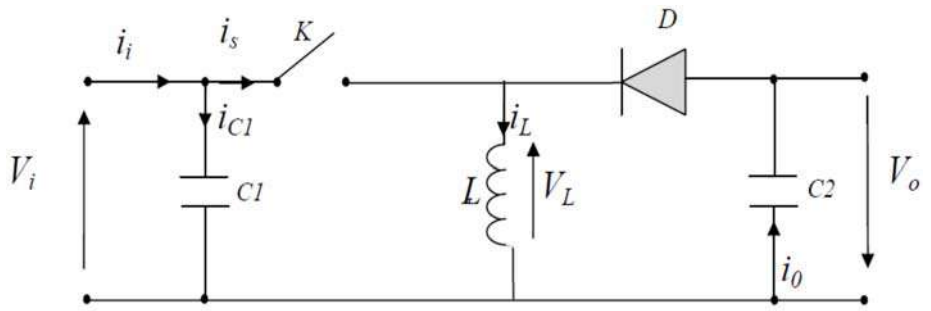


Figure II.4. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant figure(II.5). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le

dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [40].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante $\mathbf{f_s}$ avec un temps de fermeture **=dTs** et un temps d'ouverture = **(1-d) Ts**. Où:

• $\mathbf{T_s}$ est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$

• **d** le rapport cyclique du commutateur **(d ∈ [0, 1]**).

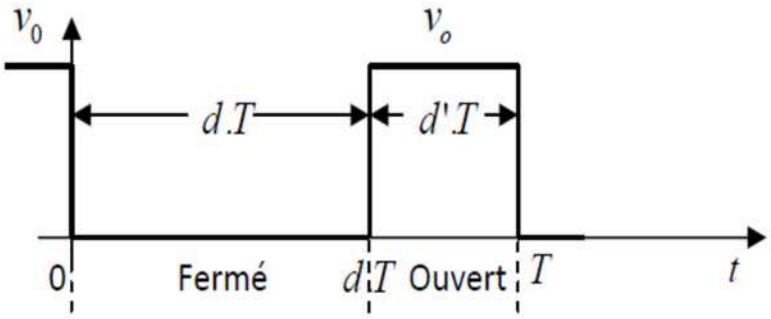


Figure II.5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges [41, 42, 43,44].

II.3.1 Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.6) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [45]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M=Vo/Vi$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

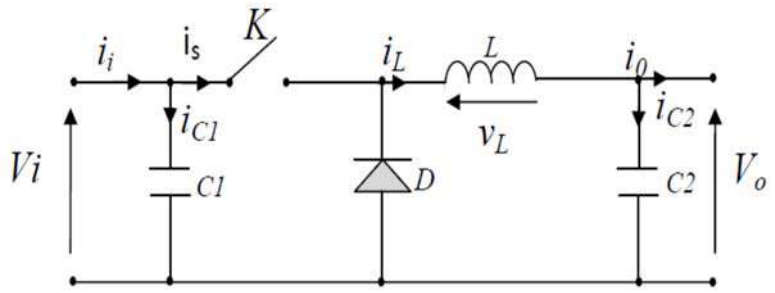


Figure II.6. Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure(II.7) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant ***dTs*** et l'interrupteur ouvert pendant ***(1-d)*** T_S [46, 47, 48,49].

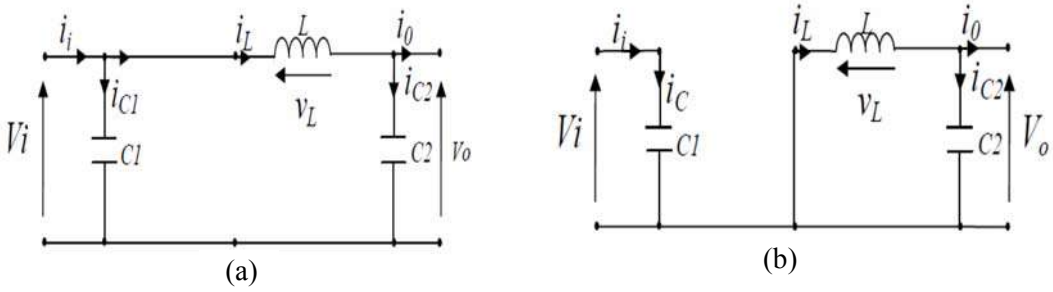


Figure II.7. Schéma équivalents du hacheur dévolteur (a): K fermé, (b) : ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.7), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période dTs :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{dL_i}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

Pour la deuxième période (1-d)T_s :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.9)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période Ts, on utilise généralement l'expression suivante [50] :

$$\langle \frac{dx}{dt} \rangle T_s = \frac{dx}{dt \Delta T_s} dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)T_s}(1-d)T_s \quad \text{(II.10)}$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.8) et (II.9), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s (i_i - i_L) + (1-d) T_s i_i \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} T_s = dT_s (i_L - i_0) + (1-d) T_s (i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s (V_i - V_0) + (1-d) T_s (-V_0) \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

Après arrangement, on obtient

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d}\left(i_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}\right) \\ V_i(t) = \frac{1}{d}\left(L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t)\right) \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

II.3.1.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D)

Les équations (II-8) et (II-9) motivent la construction de la tension de l'inductance utilisant l'approximation des petites ondulations comme le montre la figure (II.8).

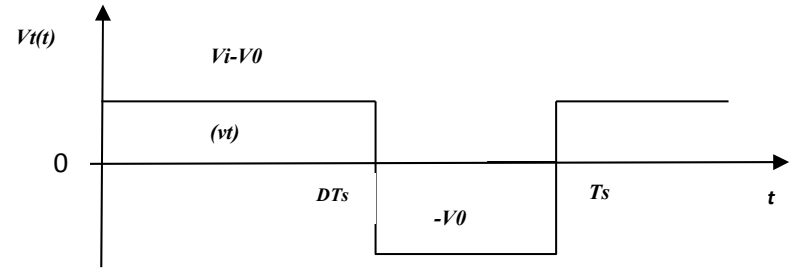


Figure II.8. Forme d'onde de la tension d'inductance V_l (t) pour un hacheur buck idéal [51].

L'expression de la tension moyenne de l'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde de la figure (II.8). Selon le principe de l'inductance volt-seconde balance et capacité charge balance la tension moyenne d'inductance est égale à zéro au cas de l'état stable ainsi :

$$\langle V_t(t) \rangle = D(V_i - V_0) + D'(-V_0) = 0 \quad \text{(II.13)}$$

En utilisant les équations (II-8) et (II-9) et en appliquant le principe de capacité charge balance conduit à des expressions pour les courants moyens du C :

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = D(I - I_L) + D'I = 0 \quad \text{(II.14)}$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = D(I_L - I_0) + D'(I_l - I_0) = 0 \quad \text{(II.15)}$$

En outre la conversion de (II-13)-(II-15) associée à $D' = 1 - D$ conduit à trois équations simples qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état stable d'un hacheur buck :

$$DV_i = V_0 \quad \text{(II.16)}$$

$$I = DI_L \quad \text{(II.17)}$$

$$I_L = I_0 \quad \text{(II.18)}$$

Où (II-16) donne le rapport de conversion *M (D)* de l'hacheur buck :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_i} = D \quad \text{(II.19)}$$

La figure (II.6) illustre cette relation linéaire.

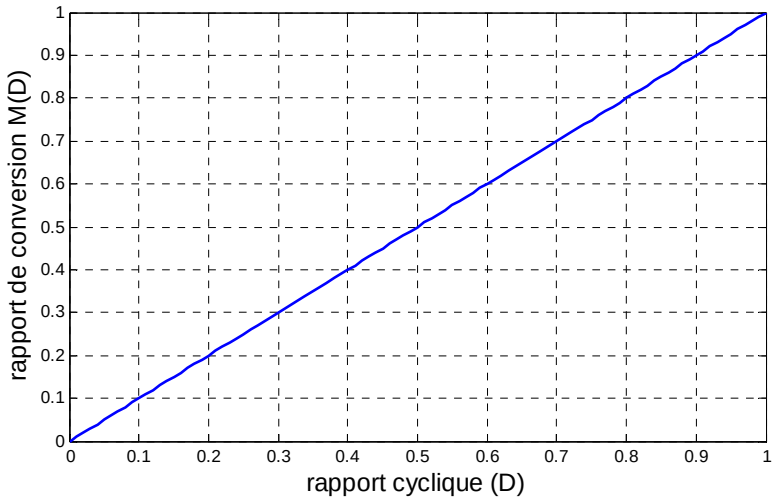


Figure II.9. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Buck.

II.3.2 Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.10). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [52].

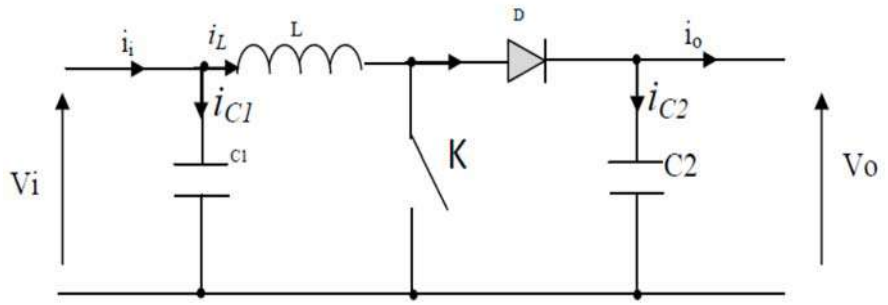


Figure II.10. Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.11) des deux phases de fonctionnement donne [53] :

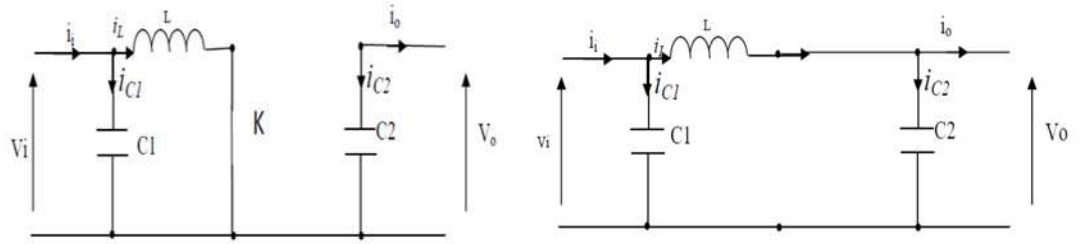


Figure II.11. Schéma équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période [d.Ts] :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{dL_i}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.20) et (II.21), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [54] :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d) i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-d) V_0 \end{cases} \quad \text{(II.22)}$$

II.3.2.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D)

L'approximation des petites ondulations comme expliquée sur la page 21, il est possible de négliger l'ondulation de commutation dans les signaux de convertisseur et de les remplacer par leurs valeurs moyennes de (II-29) :

$$i_{c1} = I - I_L \quad \text{(II.23)}$$

$$i_{c2} = -I_0 \quad \text{(II.24)}$$

$$v_L = V_i \quad \text{(II.25)}$$

Et (II-21) à :

$$i_{c1} = I - I_L \tag{II.26}$$

$$i_{c2} = I_L - I_0 \tag{II.27}$$

$$v_L = V_i - V_0 \tag{II.28}$$

Pour trouver les valeurs moyennes de $i_{C1}, i_{C2}, \text{et} v_l$, pendant toutes les périodes de commutation *Ts*, les équations (II-23.24.25) et (II-26.27.28) sont remplacées en (II-30):

$$\langle x(t)\rangle = \frac{1}{T_s}\int_t^{t+T_s} x(\tau)d\tau \tag{II.29}$$

$$= \frac{1}{T_s}\left[\int_t^{t+DT_s} x|_{[0,DT_s]}(\tau)d\tau + \int_{t+DT_s}^{t+T_s} x|_{[0,DT_s]}(\tau)d\tau\right] \tag{II.30}$$

$$= X \approx x(t)$$

En appliquant le principe d'inductance volt-second balance et capacité charge balance de l'inductance, enfin, les moyennes d'un modèle en courant continu d'un convertisseur Boost sont :

$$\langle i_{c1}(t)\rangle = D(I - I_L) + D'(I - I_L) = 0 \tag{II.31}$$

$$\langle i_{c2}(t)\rangle = D(-I_0) + D'(I_L - I_0) = 0 \tag{II.32}$$

$$\langle v_L(t)\rangle = DV_i + D'(V_i - V_0) = 0 \tag{II.33}$$

Avec *D' = 1-D*, ce peut être encore simplifiée pour une dernière série d'équations décrivant les caractéristiques de l'état d'équilibre en composant continu :

$$I = I_L \tag{II.34}$$

$$I_0 = D'I_L \tag{II.35}$$

$$V_i = D'V_0 \tag{II.36}$$

Où (II-36) donne le rapport de conversion *M (D)* d'un convertisseur Boost l'idéal :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{D'} = \frac{1}{1-D} \tag{II.37}$$

La figure (II.12) illustre cette relation pour le convertisseur Boost.

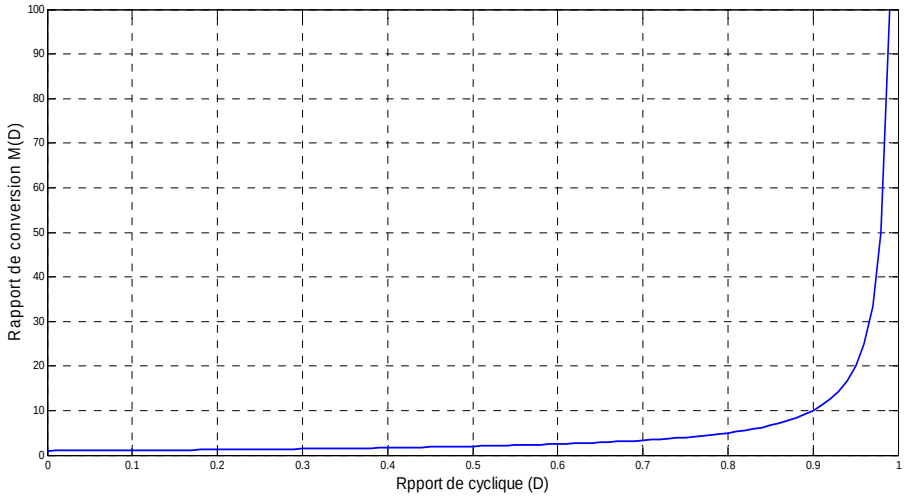


Figure II.12. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Boost.

II.3.3 Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II.13) [55] :

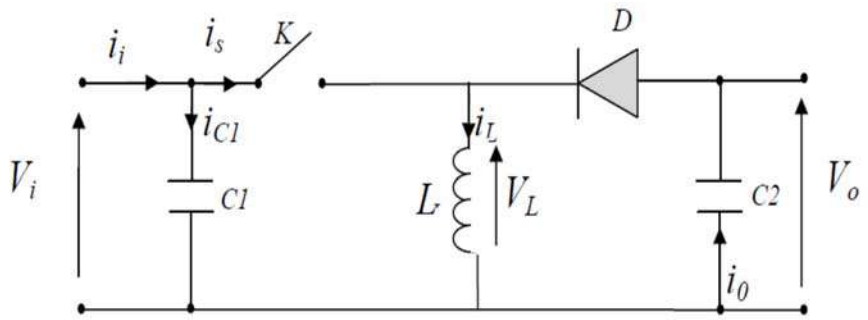
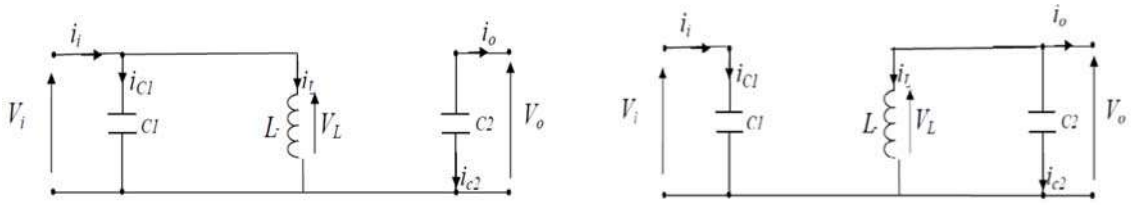


Figure II.13. Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure II.14.montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [56].



(a) (b)

Figure II.14. Schéma équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient:

Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (II.38)$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (II.39)$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.38) et (II.39), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [57] :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d}\left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}\right) \\ i_0 = -(1-d)i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_i = \frac{1}{d}\left(-(1-d)V_0 + L \frac{di_L}{dt}\right) \end{cases} \quad (II.40)$$

II.3.3.1 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D)

L'approximation de petites ondulations $x_{ond}(t) << X$ permet de remplacer les variables en fonction du temps (II-38) et (II-39) avec leurs valeurs moyennes $\langle x(t) \rangle = X \approx x(t)$. Ceci donne pour *DTs* :

$$i_{C1} = I - I_L \quad (II.41)$$

$$i_{C2} = -I_0 \quad (II.42)$$

$$v_L = V_i \quad (II.43)$$

Et pourD'Ts :

$$i_{C1} = I \quad (II.44)$$

$$i_{C2} = -I_L - I_0 \quad (II.45)$$

$$v_L = V_0 \quad (II.46)$$

Le modèle d'inductance volt-seconde balance et capacité avec (II-30) à :

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = D(I - I_L) + D'I = 0 \quad (II.47)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = D(-I_0) + D'(-I_L - I_0) = 0 \quad (II.48)$$

$$\langle v_t(t)\rangle = DV_i + D'V_0 = 0 \qquad \text{(II.49)}$$

Le modèle en moyenne de l'état d'équilibre pour un convertisseur Buck-Boost idéal peut maintenant être obtenu en multipliant les équations (II-47.48.49). Ceci donne avec *D'=1-D*.

$$I = DI_L \qquad \text{(II.50)}$$

$$I_0 = -D'I_L \qquad \text{(II.51)}$$

$$Dv_i = -D'V_0 \qquad \text{(II.52)}$$

Où (II-52) donne le rapport de conversion continu M(D) d'un convertisseur Buck-Boost idéal :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{D}{D'} = -\frac{D}{1-D} \qquad \text{(II.53)}$$

La figure (II.15) illustre le rapport de conversion d'un convertisseur Buck-Boost.

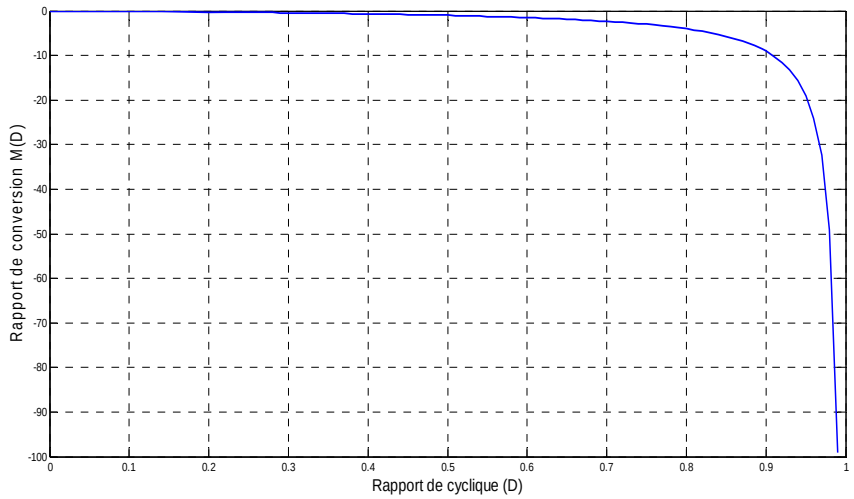


Figure II.15. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur Buck-Boost.

II.4 Modélisation d'une batterie

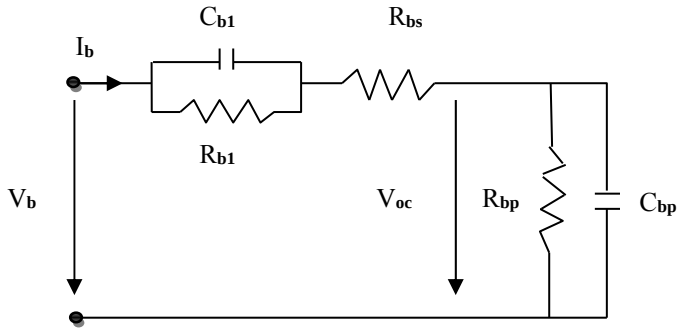


Figure II.16. Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide [58].

Ce nouveau modèle de batterie comprend des éléments équivalents pour toutes les grandes caractéristiques de fonctionnement d'une batterie plomb-acide : La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur dont la charge Cbp dont le résultat d'un flux d'électrons au cours du temps et est linéaire pour les conditions d'un courant constant dans une région de 10 à 90 pour cent du niveau de charge maximum. La valeur du Cbp est dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un condensateur:

$$E_C = \frac{1}{2}\, CV_C^2 \qquad \text{(II.54)}$$

Avec :

C étant la capacité du condensateur

Vc étant la tension. Contrairement à un condensateur, une tension de batterie ne sera pas égale à zéro à son état le plus bas de charge.

Ceci est équivalent à un condensateur dont le niveau minimum de charge égale à l'énergie Ec,min. La capacité de la batterie entièrement chargée est représentée par un niveau maximum de charge de l'énergie Ec,max.

Ceci est indiqué par l'équation suivante pour l'ensemble de l'énergie stockable dans une batterie.

$$E_b = E_{c.max} - E_{c.min} = \frac{1}{2}CV_{max}^2 - \frac{1}{2}CV_{min}^2 = \frac{1}{2}C_{bp}(V_{max}^2 - V_{min}^2) \qquad \text{(II.55)}$$

L'énergie Eb est soit donnée par le fabricant de la batterie directement en kilowattheures (kWh), soit il est spécifié en ampères-heures (Ah - qui doit être transformé dans les unités utilisées pour la production d'énergie (kWh) par multiplication de la tension spécifié de fonctionnement).

Les tensions Vmax et Vmin sont la charge maximale et la charge minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après l'équation (II-55) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad \text{(II.56)}$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances série Rbs et Rb1. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance Rbs, alors que la résistance Rb1 représente la diffusion de l'électrolyte.

Les modèles également Rb1 (avec le petit condensateur Cb1) l'effet de surtension ou de polarisation de la batterie. Ce que représente le phénomène de chutes de tension en circuit ouvert de la batterie dès que la charge est connectée.

De même, un saut brusque de tension peut être observé avec l'application d'un courant de charge. Utilisation de la notation indiquée sur la figure (II.16) la surtension peut être exprimé comme la différence entre la tension de la batterie en circuit ouvert Voc et la tension terminale de la batterie Vb. Rb1 et Cb1 forment un réseau RC parallèle avec une constante de temps $\tau = R\,C$ de sorte que :

$$V_b = V_{oc} + R_{b1}\left(1 - e^{-t/\tau}\right) i_b + R_{bs}.\, i_b \quad \text{(II.57)}$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est d'auto - décharge, représentée par la résistance Rbp en parallèle avec le condensateur principal Cbp. Elle est causée par l'électrolyse de l'eau à haute tension et par des fuites lentes à travers les bornes de la batterie à basses tensions. Le circuit de la figure (II.16) décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée.

L'impédance équivalente d'une d'entrée dune batterie plomb-acide est représentée par :

$$\begin{aligned} Z(s) &= R_{bs} + (R_{b1} \| C_{b1}) + \left(R_{bp} \| C_{bp}\right) \\ &= R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}.C_{b1} + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}.C_{bp}.s + 1} \end{aligned} \quad \text{(II.58)}$$

Pour l'utilisation dans le système du modèle mathématique, il est nécessaire de transformer (II-58) en un seul terme de la forme suivante:

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad \text{(II.59)}$$

Où les coefficients $a_i$et $b_j$sont employés pour représenter les différents composants [59,60]

$$\begin{cases} a_2 = R_{bs}R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ a_1 = R_{bs}R_{b1}C_{b1} + R_{bs}R_{bp}C_{bp} + R_{b1}R_{bp}C_{bp} + R_{bp}R_b \\ a_0 = R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \\ b_2 = R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ b_1 = R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp} \\ b_0 = 1 \end{cases} \quad \text{(II.60)}$$

II.5 Modélisation des supercondensateurs

L'utilisation de SC comme système de stockage d'énergie à bord du véhicule passe par la réalisation d'un pack en associant plusieurs éléments en série et en parallèle. Les modélisations d'un élément et d'un pack sont présentées ici, ainsi que la mise en œuvre d'un système d'équilibrage des tensions des éléments de SC dans le pack.

II.5.1 Etude théorique de la double couche électrique

Avant de commencer l'étude théorique il est important de définir la capacité. La capacité est le stockage des charges en réponse à une perturbation de potentiel, défini dans le livre de Bard et Faulkner (1980) [61] par:

$$C_d = \frac{\partial \sigma}{\partial E} \tag{II.61}$$

Les équations d'énergie d'un condensateur et SC sont :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{II.62}$$

Ou :

$$E = \frac{1}{2} QV \tag{II.63}$$

II.5.2 Couche de Helmholtz [62]

La couche de Helmholtz est très simple puisqu'elle est identique à un C. La densité de charge électrique est donnée par:

$$\sigma = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} V \tag{II.64}$$

La capacité surfacique est égale à :

$$C_H = \frac{\partial \sigma}{\partial V} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} \tag{II.65}$$

Pour obtenir la capacité en F, il est nécessaire de multiplier par la surface S qui est la surface d'interaction entre l'électrode et l'électrolyte.

$$C = S \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} \tag{II.66}$$

La capacité surfacique est constante en fonction de la tension en volt. Ce modèle est limité puisque les essais effectués en laboratoire nous démontrent que la capacité du

SC varie en fonction de la charge stockée. Ce modèle ne prend en compte que l'interface entre l'électrode et l'électrolyte.

II.5.3 Couche de Gouy et Chapman[63]

Le potentiel dans l'électrolyte n'est pas uniforme. Les charges sont concentrées prés de L'électrode et diffusées à mesure de l'éloignement de l'électrode. L'appellation utilisée est couche diffuse et diffuse layer dans la littérature Anglo-Saxonne.

La solution est décomposée en lame. Les statistiques de Maxwell-Boltzmann sont utilisées,n_B est la concentration ionique au point B,n_B^0 est le nombre de ions à l'équilibre thermodynamique :

$$n_B = n_B^0 \exp\left(\frac{-W_{A\to B}}{KT}\right) \quad \text{(II.67)}$$

$W_{A\to B}$ est le travail nécessaire pour déplacer un ion du point A au point B. Ce travail est égal à:

$$W_{A\to B} = \int_A^B F dx = eV = ez\emptyset \quad \text{(II.68)}$$

La statistique de Maxwell-Boltzmann est une loi de distribution des particules. Elle S'applique pour de la mécanique classique, elle ne prend pas en compte les effets quantiques. De plus elle est applicable pour un équilibre thermodynamique.

(L'équilibre thermodynamique est lorsqu'il y a équilibre thermique (température), mécanique (pression) et chimique (potentiel chimique).

$$V = z\emptyset \quad \text{(II.69)}$$

La solution de l'électrolyte est divisée en plusieurs lames de même distance, ces lames peuvent être représentées par, Figure (II.17):

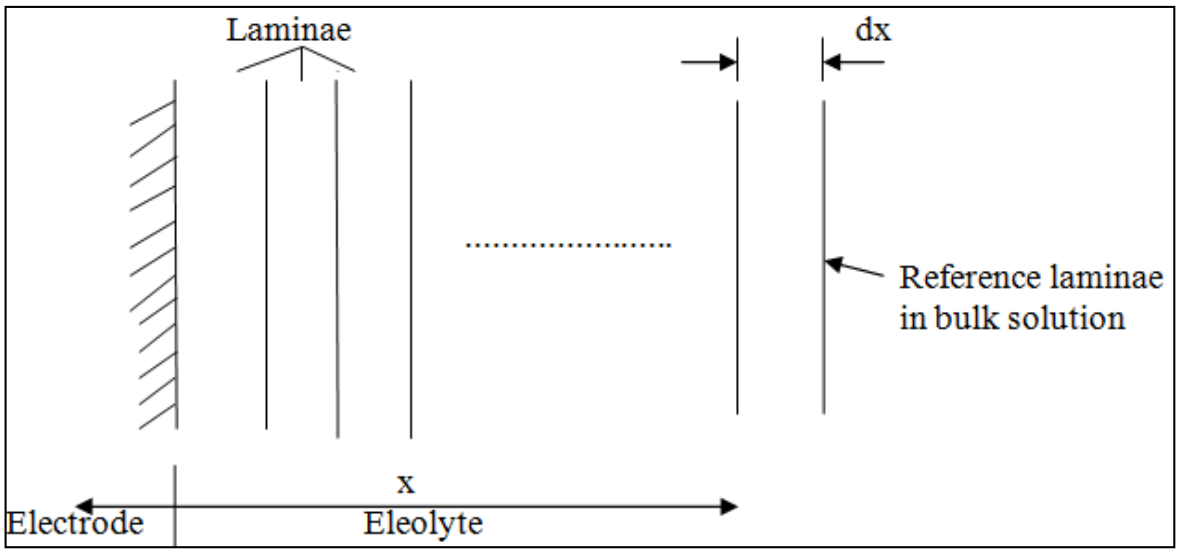


Figure II.17. Représentation de l'électrolyte en lames Tirée de Bard et Faulkner [61]

À chaque lame correspond une charge par unité de volume, la densité de charge totale est la somme de la charge à chaque lame:

$$\rho(x) = \sum_i n_i z_i e \tag{II.70}$$

L'équation (II.67) est mise dans l'équation (II.70), nous obtenons :

$$\rho(x) = \sum_i n_i^0 z_i e \exp\left(\frac{-z_i e \emptyset}{kT}\right) \tag{II.71}$$

La relation de Poisson est utilisée pour obtenir la relation entre la densité de charge et le potentiel de surface :

$$\frac{-\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{d^2\emptyset}{dx^2} + \frac{d^2\emptyset}{dy^2} + \frac{d^2\emptyset}{dz^2} \tag{II.72}$$

Seul l'axe des x est pris en compte et en utilisant l'équation (II.71), nous obtenons :

$$\frac{d^2\emptyset}{dx^2} = \frac{-e}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 z_i \exp\left(\frac{-z_i e \emptyset}{kT}\right) \tag{II.73}$$

En appliquant l'égalité suivante :

$$\frac{d^2\emptyset}{dx^2} = \frac{1}{2}\frac{d}{d\emptyset}\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 \tag{II.74}$$

Cette égalité est appliquée sur l'équation (II.73) :

$$d\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = -\frac{2e}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 z_i \exp\left(\frac{-z_i e \emptyset}{kT}\right) d\emptyset \tag{II.75}$$

Ensuite une intégration est effectuée :

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 z_i \exp\left(\frac{-z_i e \emptyset}{kT}\right) + \text{constante} \tag{II.76}$$

La constante est obtenue avec la limite qui tend vers l'infini, dans ce cas

$\varphi \to 0$ et $\frac{d\varphi}{dx} = 0$:

$$\lim_{\emptyset \to 0} \text{constante} = \frac{-2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 \tag{II.77}$$

En mettant l'équation (II.77) dans (II.76), nous obtenons :

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 \left[\exp\left(\frac{-z_i e\emptyset}{kT}\right) - 1\right] \quad \text{(II.78)}$$

Une des simplifications utilisées pour le modèle de Gouy-Chapman [63] est un électrolyte

Symétrique. L'électrolyte symétrique signifie que le nombre de cations (ions chargés

Positivement) et d'anions (ions chargés négativement) sont identiques et qu'ils sont chargés avec la même magnitude z. L'équation (II.78) devient:

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\left\{\sum_i n_i^0 \left[\exp\left(\frac{-z_i e\emptyset}{kT}\right) - 1\right] + \sum_i n_i^0 \left[\exp\left(\frac{+z_i e\emptyset}{kT}\right) - 1\right]\right\} \quad \text{(II.79)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i n_i^0 \left[\exp\left(\frac{-z_i e\emptyset}{kT}\right) + \exp\left(\frac{+z_i e\emptyset}{kT}\right) - 2\right] \quad \text{(II.80)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i 2n_i^0 \left[\frac{1}{2}\exp\left(\frac{-z_i e\emptyset}{kT}\right) + \frac{1}{2}\exp\left(\frac{+z_i e\emptyset}{kT}\right) - 1\right] \quad \text{(II.81)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_i 2n_i^0 \left[\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{kT}\right) - 1\right] \quad \text{(II.82)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{4kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{kT}\right) - 1\right] \quad \text{(II.83)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{kT}\right)-1}{2} \quad \text{(II.84)}$$

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)^2 = \frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\sinh^2\left(\frac{ze\emptyset}{2kT}\right) \quad \text{(II.85)}$$

Finalement nous obtenons :

$$\frac{d\emptyset}{dx} = \pm\sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}}\,sinh\left(\frac{ze\emptyset}{2kT}\right) \quad \text{(II.86)}$$

Ensuite nous souhaitons obtenir le potentiel, une intégration est nécessaire, l'équation (II.86) est prise négative, car la tension baisse dans l'électrolyte à mesure de l'éloignement de l'électrode.

$$\int_{\emptyset_0}^{\emptyset} \frac{d\emptyset}{\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{2kT}\right)} \frac{8KTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0} = -\left(\frac{8KTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^x dx \tag{II.87}$$

$$\frac{1}{2}\int_{\emptyset_0}^{\emptyset} \frac{d\emptyset}{\frac{1}{2}\left(\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}+\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)+\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}-\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)\right)} = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.88}$$

$$\frac{1}{2}\int_{\emptyset_0}^{\emptyset} \left(\frac{d\emptyset}{\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}\right) = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.89}$$

$$\frac{1}{2}\int_{\emptyset_0}^{\emptyset} \left(\frac{\frac{1}{\left(\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)\right)^2}}{\frac{\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}}\right) d\emptyset = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.90}$$

$$\frac{1}{2}\int_{\emptyset_0}^{\emptyset} \left(\frac{\frac{4kT}{ze}\left[\cosh^2\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)-\sinh^2\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)\right]}{\frac{\cosh^2\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\frac{\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}}}\right) d\emptyset = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.91}$$

$$\frac{2kT}{ze}\ln\left(\left[\frac{\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\cosh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}\right]_{\emptyset_0}^{\emptyset}\right) = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.92}$$

$$\ln\left(\frac{\tanh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\tanh\left(\frac{ze\emptyset_0}{4kT}\right)}\right) = \sqrt{\frac{8kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^x dx} \tag{II.93}$$

$\emptyset_0$ Représente le potentiel quand la distance x est égale à 0, ce qui est équivalent au potentiel au niveau de l'électrode. Nous souhaitons obtenir le potentiel $\emptyset$, l'équation est obtenue comme suit:

$$\frac{\tanh\left(\frac{ze\emptyset}{4kT}\right)}{\tanh\left(\frac{ze\emptyset_0}{4kT}\right)} = \exp\left(-\sqrt{\frac{2n^0z^2e^2}{\varepsilon\varepsilon_0 kT}}x\right) \quad \text{(II.94)}$$

$\emptyset$ Est égale à :

$$\emptyset = \frac{2kT}{ze}\ln\left(\frac{1+\tanh\left(\frac{ze\emptyset_0}{4kT}\right)\exp\left(-\sqrt{\frac{2n^0z^2e^2}{\varepsilon\varepsilon_0 kT}}x\right)}{1-\tanh\left(\frac{ze\emptyset_0}{4kT}\right)\exp\left(-\sqrt{\frac{2n^0z^2e^2}{\varepsilon\varepsilon_0 kT}}x\right)}\right) \quad \text{(II.95)}$$

Un programme Matlab a été utilisé pour calculer le potentiel en fonction de la distance de l'électrode, La tension de l'électrode est prise égale à 2.5V. A l'aide d'une boucle d'incrémentation, la distance x est augmentée, puis le potentiel est calculé. Le résultat obtenu est observable à la Figure (II.18). Le potentiel de surface obtenu grâce au programme est, Figure (II.18)

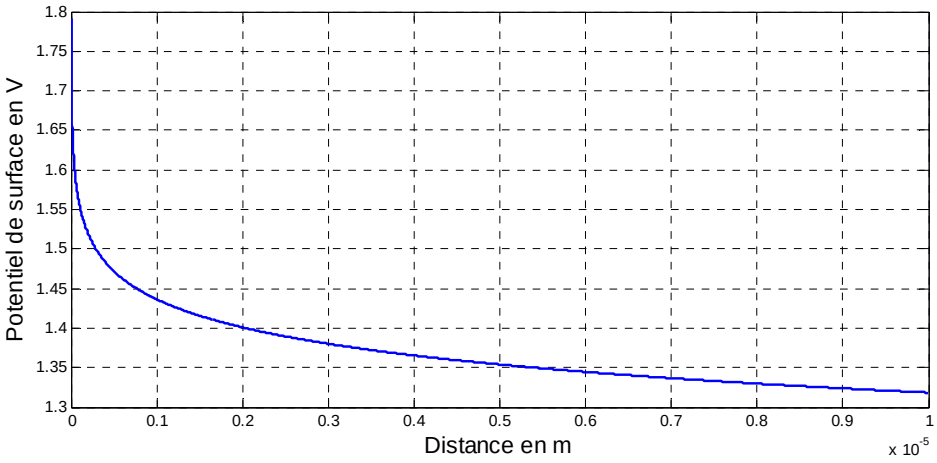


Figure II.18. Potentiel de surface suivant le modèle de Gouy-Chapman [63]

La chute de tension à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte est importante, puis la chute de tension suit une exponentielle décroissante. Afin d'observer la tension de l'électrode il est nécessaire de diminuer la distance x.

Le programme est modifié avec une tension d'électrode de 1.5V, Figure (II.19)

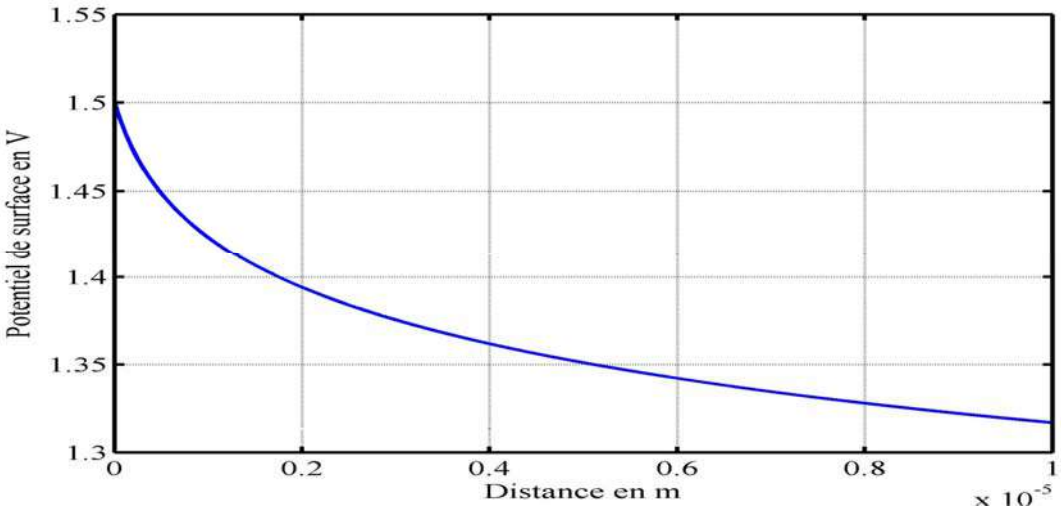


Figure II.19. Potentiel de surface suivant le modèle de Gouy-Chapman [63] et un potentiel d'électrode de 1.5V

En modifiant la distance, la chute de tension de l'interface entre l'électrode et l'électrolyte n'est plus présente. Belhachemi [64] calcul le potentiel sur une distance de 0 jusqu'à 15 nanomètre et un potentiel d'électrode de 25mV. Les résultats obtenus par l'auteur sont différents de ceux obtenus sur les Figure(II.18) et Figure (II.19). Ces différences proviennent du potentiel de l'électrode et des paramètres de l'équation qui ne sont pas identiques.

Dans notre étude sur le SC, le potentiel suivant la distance de l'électrode n'est pas utile. Ce que l'on souhaite c'est la charge ainsi que la capacité. Pour cela nous utilisons le théorème de Gauss qui nous donne la charge stockée par unité de surface :

$$q = +\varepsilon\varepsilon_0 \oint Eds \tag{II.96}$$

E est le champ électrique, celui-ci est donné par l'équation (II.86), la densité de charge est:

$$\frac{q}{S} = \sigma^M = -\sigma^S = \sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 n^0}\,\sinh\left(\frac{ze\emptyset}{2kT}\right) \tag{II.97}$$

La capacité surfacique est obtenue en dérivant l'équation (II.97), nous obtenons

$$C_{GC} = \frac{d\sigma^M}{d\emptyset_0} = \sqrt{\frac{2z^2e^2\varepsilon\varepsilon_0 n^0}{kT}}\cosh\left(\frac{ze\emptyset_0}{2kT}\right) \tag{II.98}$$

Un programme MATLAB a été créé pour calculer la capacité surfacique en fonction du potentiel de l'électrode.

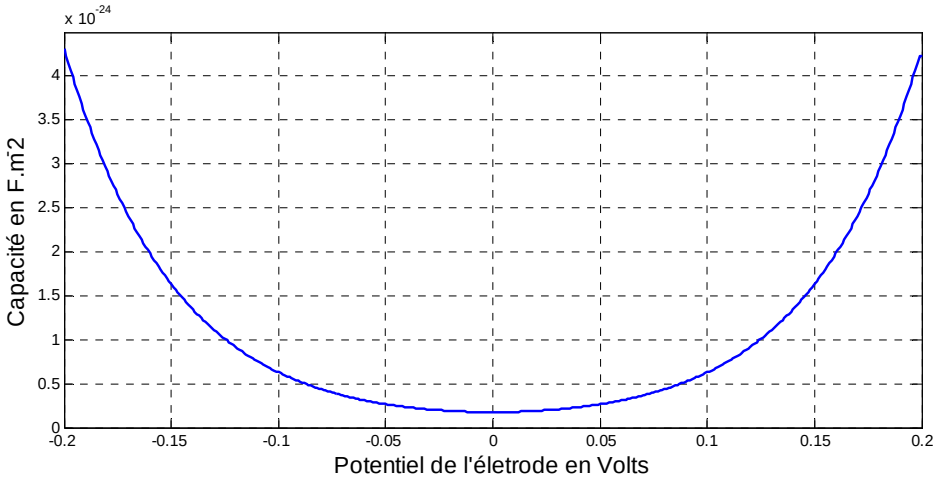


Figure II.20. Capacité surfacique suivant le modèle de Gouy-Chapman [63]

La principale limitation du modèle de Gouy-Chapman [63] est une baisse importante du potentiel de surface au voisinage de l'électrode, voir Figure (II.18). Cette baisse importante est le résultat que le modèle ne prend pas en compte la taille des ions. En effet ils ne peuvent pas approcher de l'électrode plus près que leur taille. La seconde limitation concerne la capacité. Celle-ci est infinie pour le potentiel de l'électrode élevé. Il ressort du modèle de Gouy-Chapman [63] des limitations, la partie suivante présente la modification apportée par Stern sur ce modèle.

II.5.4 Modification de Otto Stern-Hamburg[65]

Stern améliora le modèle de double couche en considérant que les ions ne sont présents qu'à partir d'une certaine distance correspondant au rayon moléculaire. De ce fait il divisa la couche en deux, la première appelée couche compacte de Helmholtz et la seconde couche diffuse de Gouy-Chapman [63]. Chaque couche reprenant la théorie de leurs auteurs.

En prenant l'équation (II.86), à x2, x2 est la distance de l'électrode qui correspond au début de la couche de Gouy-Chapman [63] , nous obtenons:

$$\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)_{x=x_2} = -\sqrt{\frac{2kTn^0}{\varepsilon\varepsilon_0}}\sinh\left(\frac{ze\emptyset_2}{2kT}\right) \qquad \text{(II.99)}$$

En utilisant le théorème de Gauss, nous obtenons la densité de charge :

$$\sigma^M = -\sigma^S = -\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{d\emptyset}{dx}\right)_{x=x_2} = \sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 n^0}\sinh\left(\frac{ze\emptyset_2}{2kT}\right) \qquad \text{(II.100)}$$

La même densité de charge est appliquée par l'électrode sur toute la couche de Helmholtz [62] . Elle est obtenue avec l'équation (II.64) avec une chute de tension constante due à la couche de Helmholtz [62] :

$$\emptyset_2 = \emptyset_0 - \frac{\sigma^M x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} \tag{II.101}$$

Ensuite nous pouvons mettre $\emptyset_2$ dans l'équation (II.100). La densité de charge devient :

$$\sigma^M = \sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 n^0}\sinh\left(\frac{ze}{2kT}\left(\emptyset_0 - \frac{\sigma^M x_2}{\varepsilon\varepsilon_0}\right)\right) \tag{II.102}$$

La capacité est définie par l'équation (II.61) en arrangeant l'équation (II.102), nous obtenons la capacité de la double couche avec le modèle de Stern :

$$\emptyset_0 = \frac{\sigma^M x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2kT}{ze}\operatorname{arsinh}\left(\frac{\sigma^M}{\sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 n^0}}\right) \tag{II.103}$$

Puis,

$$\frac{1}{C_d} = \frac{\emptyset_0}{\sigma^M} = \frac{x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2kT}{ze\sigma^M}\operatorname{arsinh}\left(\frac{\sigma^M}{\sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right) \tag{II.104}$$

En remplaçant k, z et e par la constante de Faraday $F = N_A \times e$, la constante des gaz parfaits $R = K \times N_A$ puis la concentration par la concentration molaire $c = \frac{n^0}{N_A}$, nous obtenons

$$\frac{1}{C_d} = \frac{\emptyset_0}{\sigma^M} = \frac{x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2RT}{F\sigma^M}\operatorname{arsinh}\left(\frac{\sigma^M}{\sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right) \tag{II.105}$$

Ce résultat est aussi obtenu par Oldham (2008)[66] pour un électrolyte liquide et une électrode en métal. Cependant celui-ci utilise une méthode différente pour obtenir ce résultat.

La capacité totale de la double couche avec les couches de Helmholtz et de Gouy-Chapman [63] est équivalente à la mise en parallèle de deux C :

$$\frac{1}{C_d} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \tag{II.106}$$

Un calcul de la capacité surfacique en fonction de la densité de charge est fait avec un programme Matlab, La Figure(II.21) présente le résultat du calcul de la capacité de la double couche avec le modèle de Stern, avec la capacité des couches de Helmholtz [62] (tracé bleu) et Gouy-Chapman [63] (tracé noir).

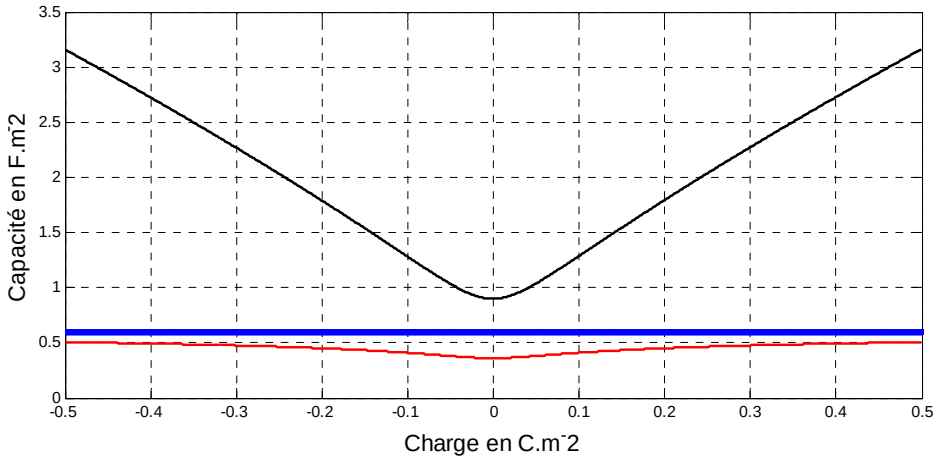


Figure II.21. Capacité surfacique de la double couche avec le modèle de Stern et les couches de Helmholtz et Gouy-Chapman

Ensuite, seule la capacité du modèle de Stern est tracée, Figure (II.22)

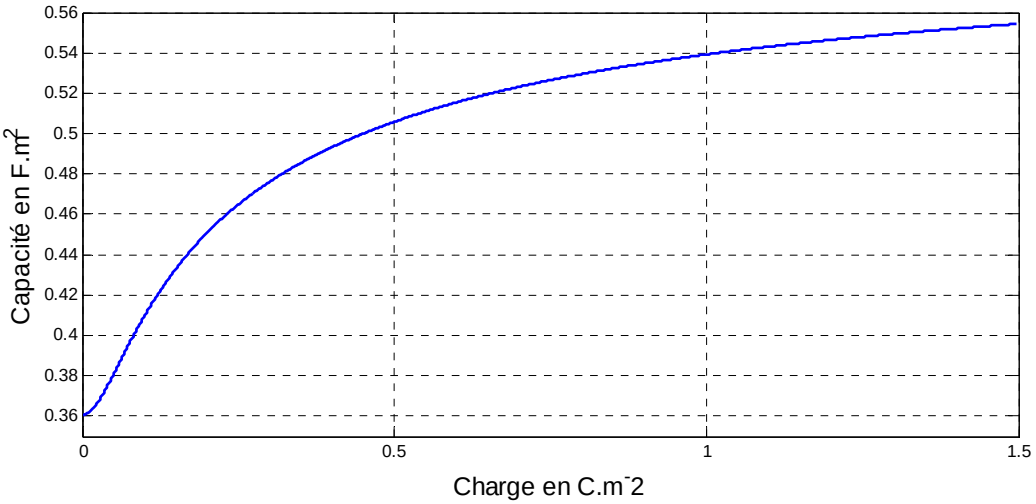


Figure II.22. Capacité surfacique de la double couche avec le modèle de Stern [65].

En utilisant la relation suivante :

$$Q = \mathrm{C}.\mathrm{V} \qquad \text{(II.107)}$$

Cette relation lit la charge stockée, la capacité et la tension aux bornes du SC.

Un nouveau tracé est effectué avec la capacité en fonction de la tension et en ne prenant que la charge positive, Figure (II.23):

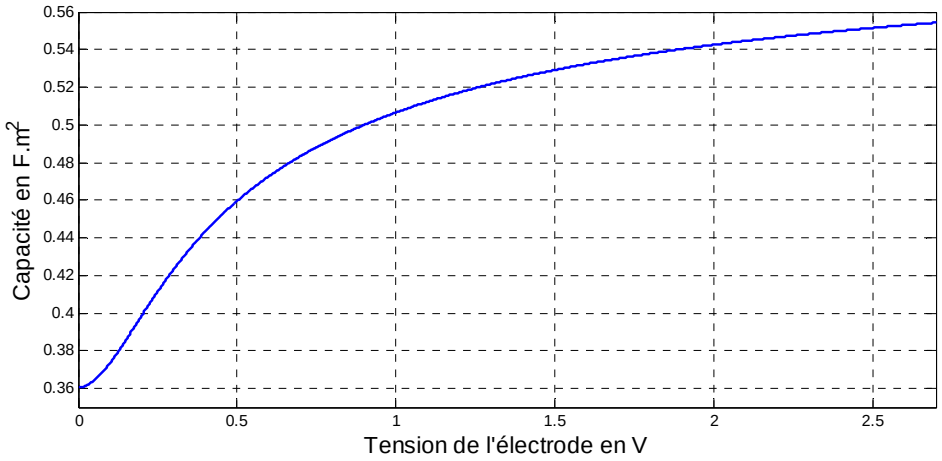


Figure II.23. Capacité surfacique en fonction de la tension du modèle de Stern.

Selon la Figure (II.23), la capacité surfacique est de 0.36 F· m^{-2} pour une tension de 0V. Ensuite la capacité est maximale lorsque la tension est de 2.7 V. Le modèle de la double couche électrique avec la modification de Stern nous donne une capacité qui varie selon un logarithme. Cependant pour notre étude nous devons obtenir la relation entre la capacité surfacique et la capacité totale du SC.

La relation associant la capacité avec notre équation (II.105) est la surface en m^2, ainsi l'équation (II.105) devient:

$$C = S\left[\frac{x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2RT}{F\frac{Q}{S}}\operatorname{arsinh}\left(\frac{\frac{Q}{S}}{\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right)\right]^{-1} \quad \text{(II.108)}$$

Ou bien

$$C = \left[\frac{x_2}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2RT}{FQ}\operatorname{arsinh}\left(\frac{Q}{S\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right)\right]^{-1} \quad \text{(II.109)}$$

La surface S est obtenue par la relation suivante :

$$S = \frac{\text{Capacité du supercondensateur à 2.7V}}{\text{Capacité surfacique du modèle de Stern à 2.7V}} \quad \text{(II.110)}$$

Une valeur de la surface S est calculée pour obtenir 3000F à 2.7V, Figure (2.8):

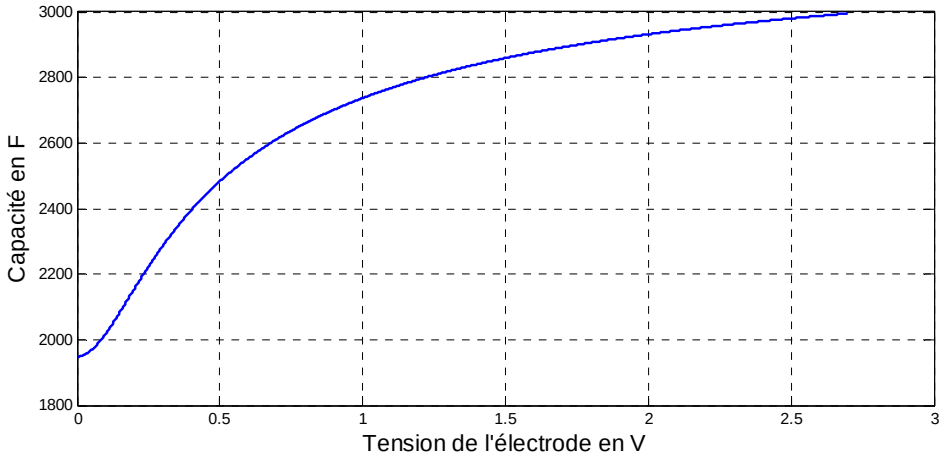


Figure II.24. Capacité en fonction de la tension avec le modèle de Stern.

L'équation (II.109) est modifiée pour obtenir la tension aux bornes de l'électrode :

$$V = \frac{Qx_2}{\varepsilon\varepsilon_0 S} + \frac{2RT}{F}\operatorname{arsinh}\left(\frac{Q}{S\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right) \quad \text{(II.111)}$$

Nous avons vu dans la revue de littérature que plusieurs électrodes sont mises en parallèle dans les SC, l'équation (II.111) est modifiée

$$V = N\left(\frac{Qx_2}{N^2\varepsilon\varepsilon_0 S} + \frac{2RT}{F}\operatorname{arsinh}\left(\frac{Q}{N^2 S\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right)\right) \quad \text{(II.112)}$$

Les SC sont mis en parallèle et en série pour augmenter l'énergie stockée et la tension. L'équation (II.112) devient :

$$V = \frac{NN_S Qx_2}{N_P N^2\varepsilon\varepsilon_0 S} + \frac{NN_S 2RT}{F}\operatorname{arsinh}\left(\frac{Q}{N_p N^2 S\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right) \quad \text{(II.113)}$$

Avec N_S le nombre de SC en série, N_P le nombre de SC en parallèle et N le nombre d'électrodes en parallèle. Cette formule sera par la suite utilisée pour modéliser la réponse du SC dans SPS.

II.5.5 Redistribution des charges

Lorsque le SC est chargé une perte de tension à ses bornes est observable. Peu de travaux ont été effectués sur ce sujet.

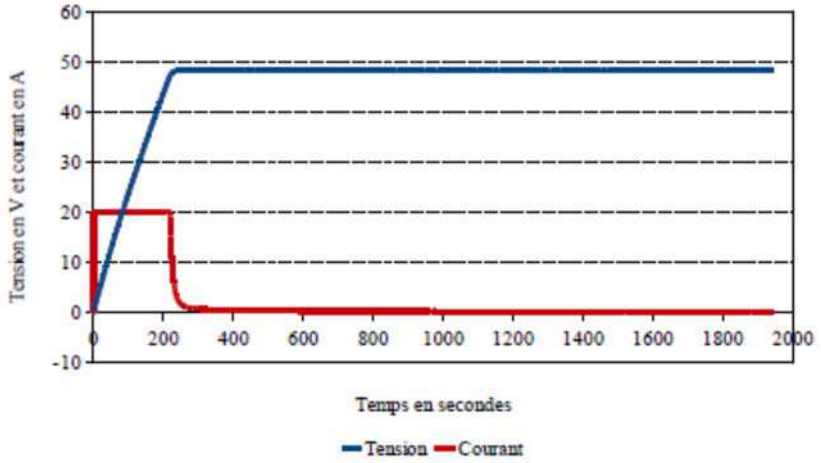


Figure II.25. Régulation à 48V d'un module de SC.

La source de courant envoie un courant de 20A, puis quand la tension du module atteint 48V, le courant diminue. Ce courant à la forme d'une exponentielle négative. Un second essai a été effectué sur un SC de 650F, mais lors de cet essai lorsque la tension du SC atteint 2.7V, la source de courant arrête de fournir de l'énergie au SC. Pendant ce temps, la tension est mesurée aux bornes du SC, Figure (II.26).

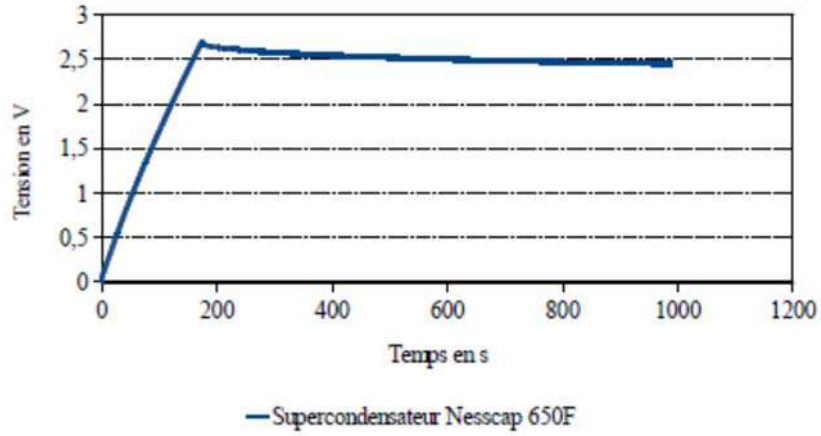


Figure II.26 Mesure de la tension du SC lors de la redistribution des charges.

À une surtension, le SC revient à son potentiel d'équilibre suivant une exponentiel. L'équation de Tafel est utilisée pour définir ce sur-potentiel :

$$i(\eta) = i_0 \exp\left(\frac{\alpha \eta F}{RT}\right) \qquad \text{(II.114)}$$

Pour le SC cette équation devient :

$$-i_c(t) = S i_0 \exp\left(\frac{\alpha \eta(t) F}{RT}\right) \qquad \text{(II.115)}$$

Un programme Matlab est créé pour calculer le courant de Tafel, la perte de charge et la réponse du SC lorsque ses bornes sont déconnectées, Le résultat du calcul est obtenu à la Figure (II.27).

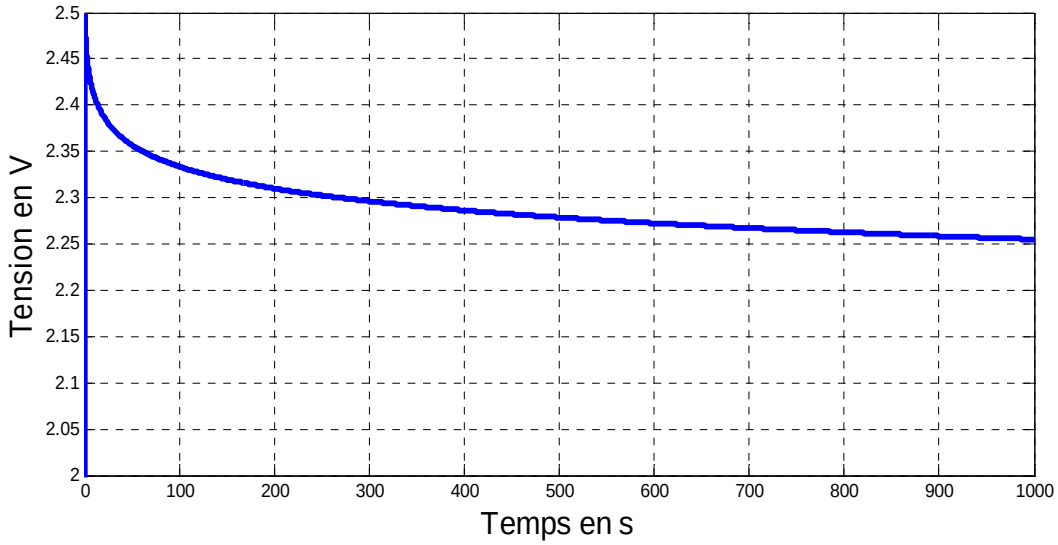


Figure II.27. Tension du SC lors de la redistribution des charges avec l'équation de Tafel.

La tension initiale est de 2.5V, la baisse de tension est plus importante pendant les 100 premières secondes. La tension suit une exponentielle négative, ce qui est identique à ce qui avait été mesuré. Il est à noter que la baisse de tension est moins importante lors de l'essai effectué avec le SC. Dans le chapitre suivant, les paramètres de l'équation de Tafel seront modifiés pour convenir à la réponse du SC.

Le second graphique correspond au courant calculé avec l'équation de Tafel Figure(II.28) :

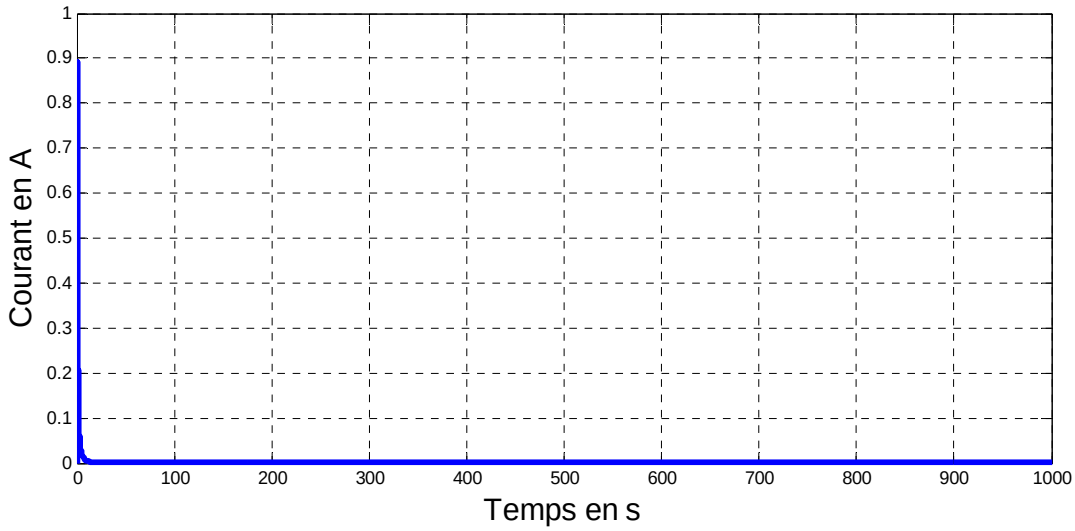


Figure II.28. Courant calculé avec l'équation de Tafel.

Le courant de Tafel est plus important pendant les 20 premières secondes. Ce courant

Correspond à la plus forte baisse de la tension pendant les premières secondes.

Cette équation de Tafel sera programmée dans SPS pour simuler la baisse de la tension aux bornes des SC lors de la redistribution des charges et quand le SC est au repos.

II.5.6 Etude de l'effet de signaux alternatifs sur le SC

II.5.6.1 Effet sur le diélectrique

En prenant l'équation de Stern[65] (II.105) en enlevant les constantes fondamentales, l'élément qui est modifié en fonction de la fréquence est le diélectrique de l'électrolyte. Le livre théorique de Raju (2003)[67] expose l'effet de la fréquence sur le diélectrique. Lorsqu'un signal de fréquence est appliqué, la permittivité diélectrique de l'électrolyte change. La Figure(II.29) montre le diélectrique en fonction de la fréquence.

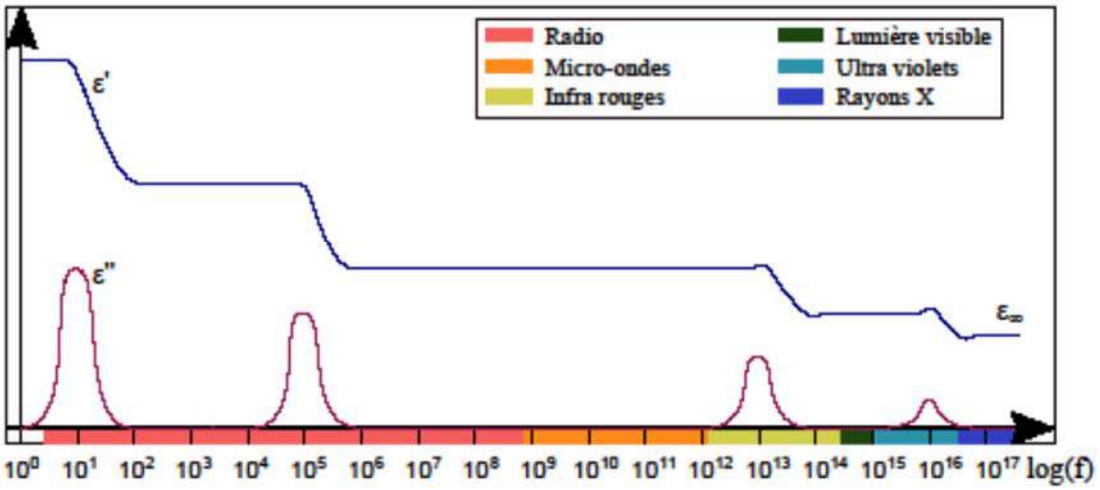


Figure II.29. Diélectrique en fonction de la fréquence.

Le diélectrique est la capacité d'un élément à faire passer un courant électrique. Plus celui-ci est faible plus le matériau devient un isolant.

Le diélectrique est composé d'une partie réelle et une partie imaginaire :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \qquad \text{(II.116)}$$

Trois équations régissent le diélectrique en fonction de la fréquence. La première est la relaxation de Debye:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1+j\omega\tau} \qquad \text{(II.117)}$$

La seconde est appelée l'équation de Cole-Cole:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1+(j\omega\tau)^a} \qquad \text{(II.118)}$$

La troisième est l'équation de Havriliak–Negami:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty}}{(1+(j\omega\tau)^a)^{\beta}} \quad \text{(II.119)}$$

Dans notre cas nous utilisons l'équation de Debye, puisque les deux équations suivantes sont utilisées pour le diélectrique des polymères, α =1et β =1. Ensuite suivant les études de Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68] et Buller et al. (2002) [69], la capacité est nulle au de là de quelques dizaines de Hz, un calcul de limite avec l'équation de Stern (II.105) est fait. La première limite est le diélectrique:

$$\lim_{\omega\to\infty} \varepsilon_{\infty}(\omega) = 0 \quad \text{(II.200)}$$

Il vient :

$$\lim_{\omega\to\infty} \varepsilon_{\infty}(\omega) = 0 \quad \text{(II.201)}$$

Ensuite la limite de l'équation de Stern :

$$\lim_{\omega\to\infty} \left[\frac{1}{C} = \frac{x_2}{\varepsilon(\omega)\varepsilon_0} + \frac{2RT}{F\sigma^M}\operatorname{arsinh}\left(\frac{\sigma^M}{\sqrt{8RT\varepsilon(\omega)\varepsilon_0 c}}\right)\right] \quad \text{(II.202)}$$

Puis,

$$\lim_{\omega\to\infty} \operatorname{arsinh}(X) = 0 \quad \text{(II.203)}$$

La limite de l'équation de Stern devient :

$$\lim_{\omega\to\infty} C = \frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon_0}{x_2} = 0 \quad \text{(II.204)}$$

Ceci est concordant avec la capacité en fonction de la fréquence donnée par Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68]. La capacité et la résistance mesurées par les auteurs sont exposées à la Figure (II.30).

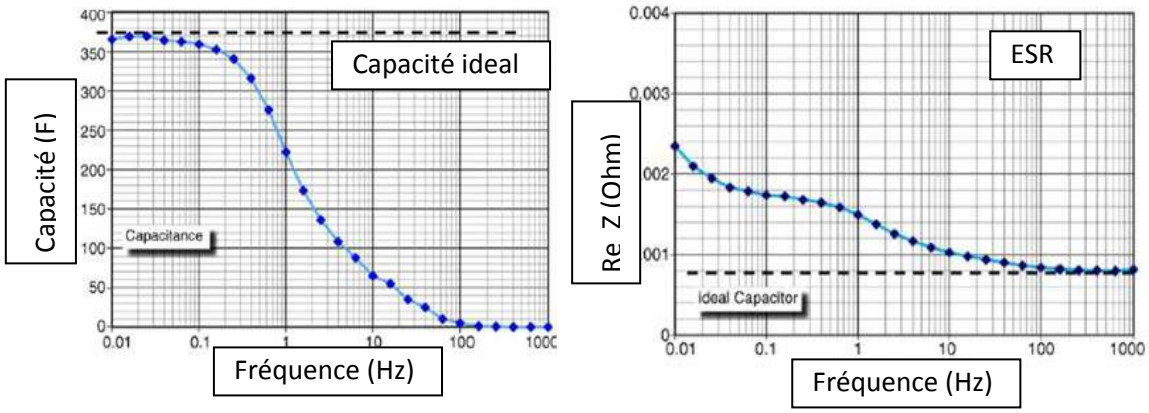


Figure II.30. Capacité et résistance en fonction de la fréquence Tirée de Kotz, Hahn, et Gallay [68]

Pour utiliser l'équation (II.117) afin d'obtenir la capacité en fonction de la fréquence avec l'équation (II.105), il est nécessaire de connaitre la valeur du diélectrique entre les fréquences 0Hz et 10Hz ainsi que τ la constante de relaxation. L'équation de Debye a été programmée avec Matlab. Puis le paramètre τ sera par la suite modifié pour que la réponse soit identique à la publication de Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68]. Le programme fait avec Matlab , Le résultat du calcul est obtenu à la Figure (II.31).

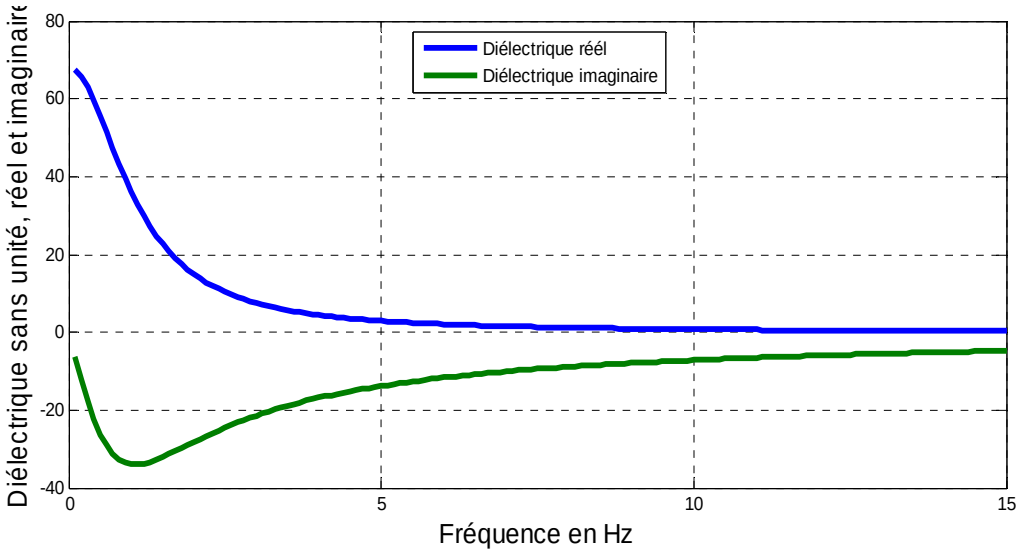


Figure II.31. Diélectrique en fonction de la fréquence.

La courbe bleu est la partie réelle et la courbe verte est la partie imaginaire suivant l'équation (II.116). La permittivité diélectrique commence à 68 lorsque la fréquence est faible, puis la partie réelle tend vers zéro lorsque la fréquence augmente. La partie imaginaire peut être exprimée comme une perte.

La partie suivante a pour but de mettre l'équation de la relaxation de Debye avec l'équation de Stern [65].

II.5.6.2 Effet sur la capacité

Les équations (II.117) et (II.105) ont été programmées avec un programme Matlab, Les paramètres de l'équation (II.119) utilisés sont les suivants,

α =0.01, β =1et τ =0.15. Les résultats obtenus sont à la Figure (II.32).

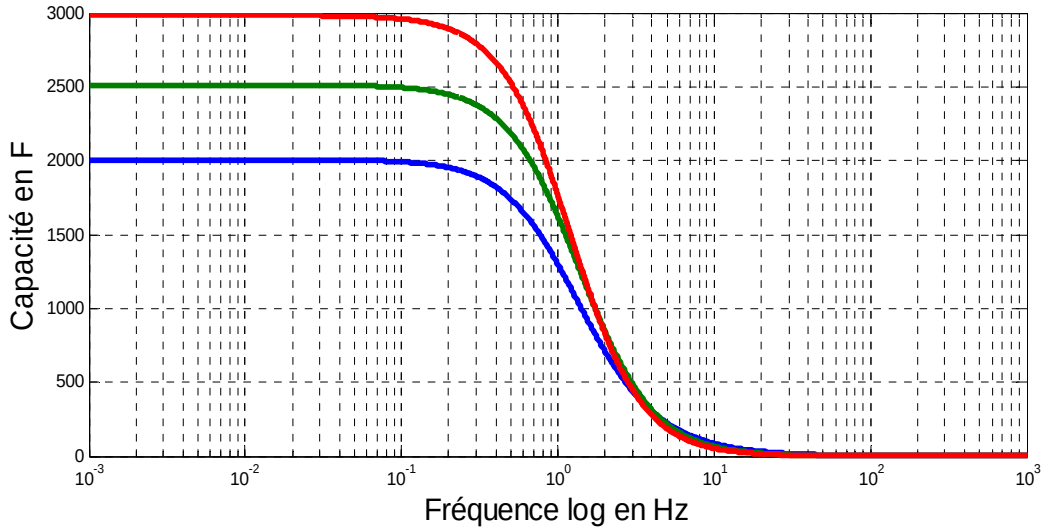


Figure II.32. Capacité calculée en fonction de la fréquence.

Les capacités mesurées par Rafik et al. (2007) [70] sont à la Figure (II.33).

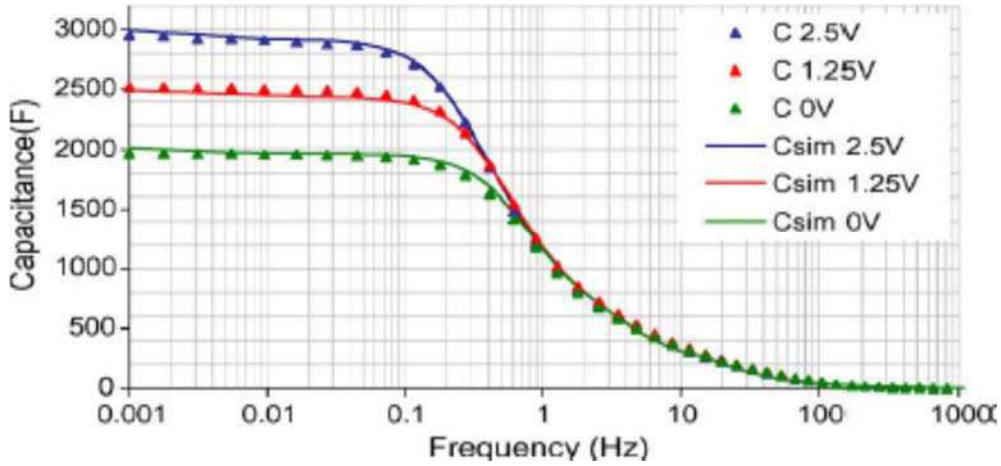


Figure II.33. Capacité en fonction de la fréquence Tirée de Rafik et al. (2007) [70].

Les capacités calculées avec l'équation de Stern et la relaxation de Debye se rapprochent des mesures effectuées par Rafik et al. (2007) [70]. Les différences peuvent provenir des paramètres de l'équation de la relaxation de Debye, en les modifiant il est possible de mieux corréler les mesures, des essais expérimentaux doivent être entrepris pour obtenir les valeurs exacts de la capacité pour chaque fréquence.

Ces courbes nous renseignent que la capacité baisse très fortement lorsque la fréquence augmente. Dès 1 hertz la capacité est divisée par trois. Selon l'équation (II.61), La capacité est définie par le stockage des charges en réponse à une perturbation de potentiel. En augmentant la fréquence du signal d'entrée du SC celui-ci perd de sa faculté à stocker la charge, de ce fait il perd aussi sa faculté à stocker de l'énergie, équation (II.62).

II.5.6.3 Effet sur la résistance

La résistance est obtenue en calculant la conductance du SC. Je n'ai pas trouvé de formule donnant la conductance du SC, mais seulement une relation en fonction de la fréquence donnant la conductivité. Cette relation est obtenue de la publication de Fannin et al. (2002) [71] , elle est égale à :

$$\sigma_{ac}^{*} = \sigma' + j\sigma'' \quad \text{(II.205)}$$

$$\sigma_{ac}^{*} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon^{*} \quad \text{(II.206)}$$

$$\sigma_{ac}^{*} = j\omega\varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad \text{(II.207)}$$

$$\sigma_{ac}^{*} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon'' + j\omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad \text{(II.208)}$$

La conductivité possède une partie réelle et une partie imaginaire. La conductance totale du SC est égale à :

$$\sigma_{totale} = \sigma_{électrode} + X\sigma' \quad \text{(II.209)}$$

$\boldsymbol{\sigma'}$doit être multiplié par la surface, pour obtenir des siemens (S). Cette surface est obtenue en prenant la résistance donnée par la documentation technique du constructeur sur les SC. Dans notre cas nous utilisons la publication de Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68] et la Figure (II.30). Ainsi pour un courant de 0.1Hz, la résistance est de 1.8e $^{-3}$ Ω, soit une conductance de 555.55S. Pour une fréquence de 100Hz, la résistance est de 0.8e $^{-3}$ Ω , soit 1250S. Ce qui nous donne la relation suivante:

$$\sigma_{100hz} = \sigma_{électrode} + X\varepsilon_0\varepsilon''\omega_{100hz} \quad \text{(II.210)}$$

$$1250 = 555.55 + X\varepsilon_0\varepsilon''\omega_{100hz} \quad \text{(II.211)}$$

$$X = \frac{1250-555.55}{\varepsilon_0\varepsilon''\omega_{100hz}} \quad \text{(II.212)}$$

$\boldsymbol{\varepsilon''}$est la partie imaginaire de l'équation de relaxation de Debye pour 100Hz. Dans notre cas, nous obtenons une valeur de X =1.157416666e^{11}m. Cette surface est purement théorique pour que la relation puisse être utilisée. Un programme Matlab est utilisé pour obtenir les

valeurs de la conductance en fonction de la fréquence, La conductance obtenue est présentée à la Figure (II.34).

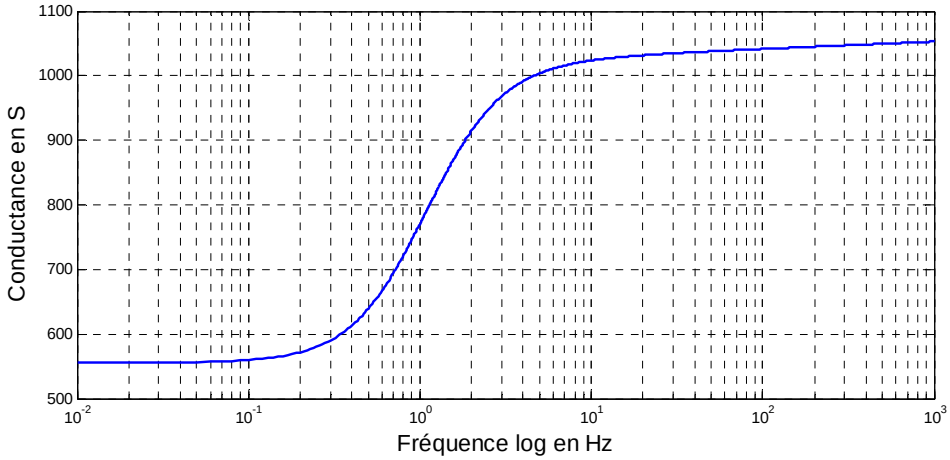


Figure II.34. Conductance en fonction de la fréquence.

La résistance est obtenue en calculant l'inverse de la conductance, voir Figure (II.37).

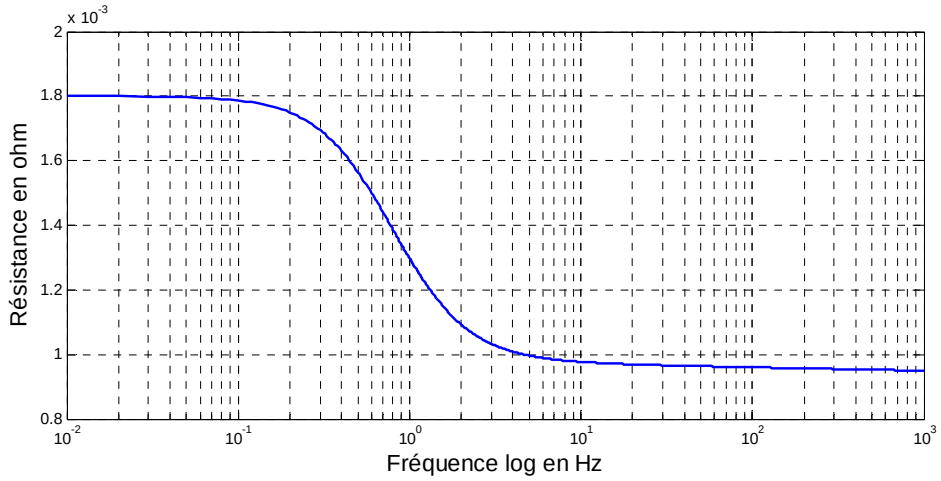


Figure II.35. Résistance en fonction de la fréquence

En comparant avec la mesure effectuée par Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68] , la résistance calculée possède quelques différences. Pour obtenir une corrélation plus importante il est nécessaire de recalculer les paramètres des équations (II.119) et (II.209). Les principales différences sont:

- premièrement, il y a un changement de résistance rapide de la résistance entre 0.9 Hz et 0.01Hz, qui n'est pas modélisé avec l'équation;
- deuxièmement, à la fréquence de 1kHz, la résistance calculée n'est pas identique à la résistance mesurée par Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68] , 0.95mΩ au lieu de 0.8mΩ.

II.5.6.4 Effet sur l'impédance

Pour tracer le plan de Nyquist il est nécessaire d'obtenir la partie réelle et imaginaire de l'impédance du SC. La partie réelle est prise avec l'équation (II.210), la partie imaginaire est égale à :

$$z = \frac{1}{jC\omega} \tag{II.213}$$

Nous avons vu précédemment que le diélectrique possède une composante réelle et Imaginaire. Il en découle une partie réelle et imaginaire pour la capacité. L'impédance du C avec la partie réelle et imaginaire est :

$$Z = \frac{1}{j\omega(C'' + jC'')} \tag{II.214}$$

Ensuite,

$$Z = \frac{1}{jC'\omega - C''\omega} \tag{II.215}$$

$$Z = \frac{jC' + C''\omega}{(jC'\omega - C''\omega)(jC'\omega - C''\omega)} \tag{II.216}$$

Soit :

$$z = \frac{C''\omega}{-C'^2\omega^2 - C''^2\omega^2} + j\frac{C''\omega}{-C'^2\omega^2 - C''^2\omega^2} \tag{II.217}$$

Seule la partie imaginaire est prise, la partie réelle n'est pas considérée. Un programme MATLAB est créé pour calculer le plan de Nyquist , les données de la publication de Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68] sont prises comme référence, La capacité en fonction de la fréquence obtenue est à la Figure (II.36).

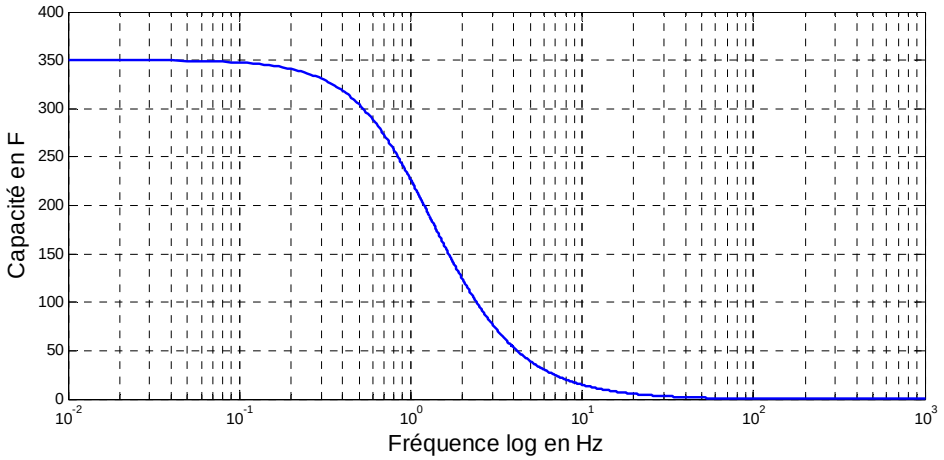


Figure II.36. Capacité en fonction de la fréquence.

La résistance calculée est la Figure (II.35).

L'impédance calculée est à la Figure (II.37).

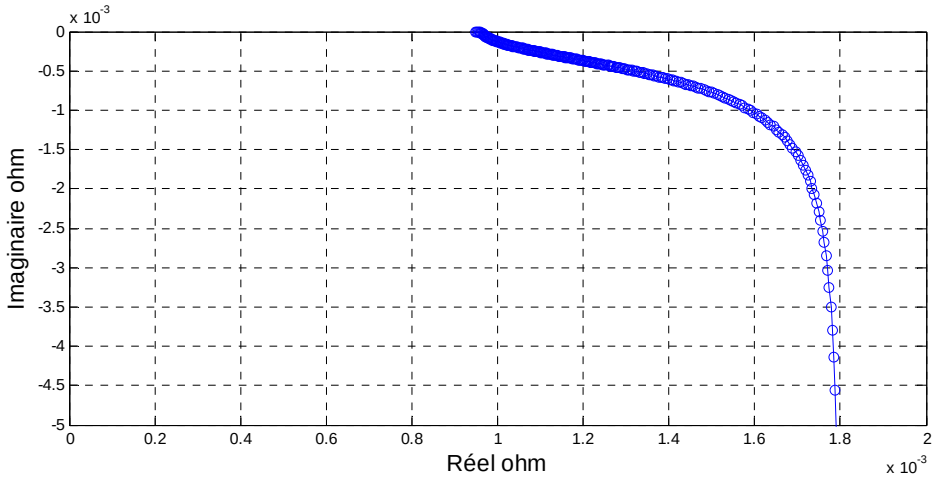


Figure II.37. Tracé de Nyquist du SC

Le tracé obtenu par la mesure de Kotz, Hahn, et Gallay (2006) [68]. Le tracé calculé modélise bien le comportement du SC lors des bases fréquences et la pente de 45°. L'erreur sur les hautes fréquences est due au calcul de la résistance, la résistance minimale calculée est de 0.95mΩ au lieu de 0.8mΩ, ce qui a pour effet une partie imaginaire nulle alors que la partie réelle est égale à 0.95mΩ.

II.6 Conclusion

Ce chapitre donne une bonne idée du comportement du SC lorsque des signaux alternatifs sont appliqués à ses bornes. Le résultat est une baisse de la charge stockée. Cependant ce travail peut être continué, des essais pratiques plus nombreux doivent être effectués pour valider cette théorie.

CHAPITRE III

Chapitre III Système photovoltaïque commande par P & O

III.1 Introduction.....53

III.2. Simulation du GPV sans MPPT.....53

III.2.1 Simulation PV avec variation de la température 55

III.2.2 Simulation du PV avec variation de l'irradiation 56

III.3 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT).....57

III.3.1 Simulation de la méthode MPPT 59

III. 3.1.1 Principe des commandes p&o 59

III.4 Simulation du GPV avec MPPT 62

III.5 Conclusion.....63

III.1 Introduction

L'adaptation d'impédance entre un GPV et une charge est un problème technologie qui signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du GPV a la charge. La littérature propose une grande quantité de solution sur l'algorithme de contrôle effectuant une recherche de point de puissance maximale PPM lorsque le GPV et la charge sont connectes à travers un convertisseur statique DC-DC [72]. Dans ce chapitre nous élaborons une technique à savoir l'algorithme de contrôle de PPM Perturbation et Observation (P&O).

La phase terminale de notre travail a été basé sur la simulation de MPPT, pour cela nous avons réussi à adapter le logiciel de calcul et simulation MATLAB/Simulink.

III.2. Simulation du GPV sans MPPT

Les résultats de simulation sont constatés dans les conditions standards (T=25 °C et E =1000 W /m^2) du système photovoltaïque adapté sans la commande MPPT «P&O » représentent par Les figures (1, 2,3 et 4,5) représentent I-V, P-V,I-t,V-t, P-t le courant, la tension, la puissance respectivement du panneau PV.

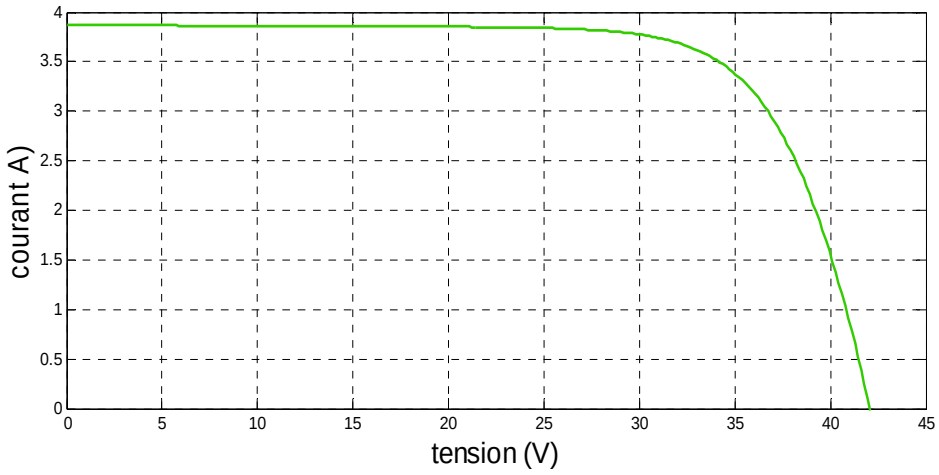


Figure III.1. Caractéristique I -V d'un module PV.

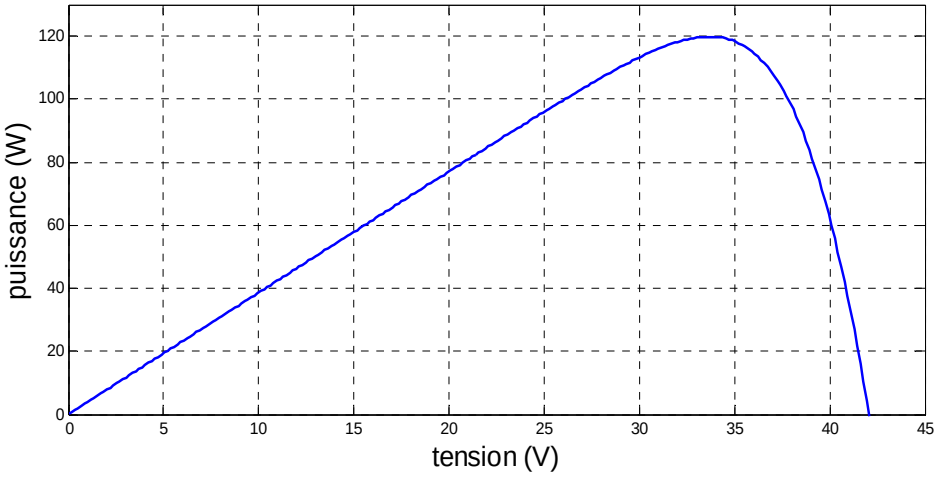


Figure III.2. Caractéristique P -V d'un module PV**.**

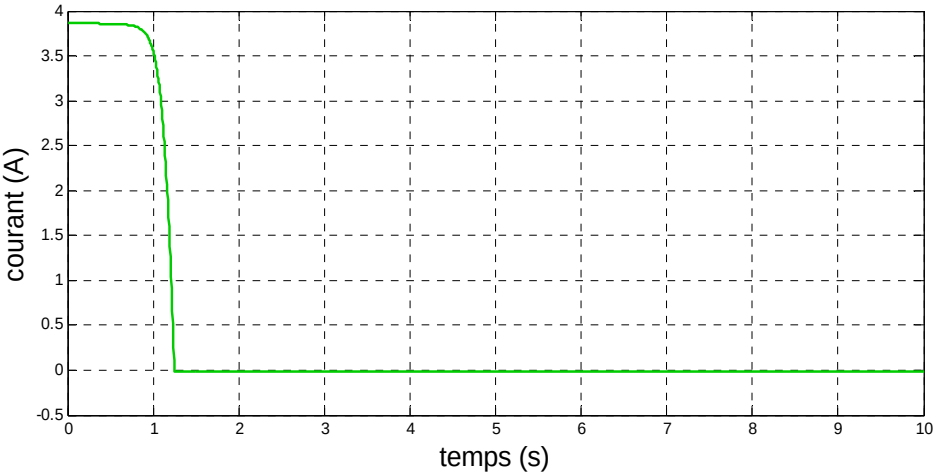


Figure III.3. Caractéristique I-t d'un module PV**.**

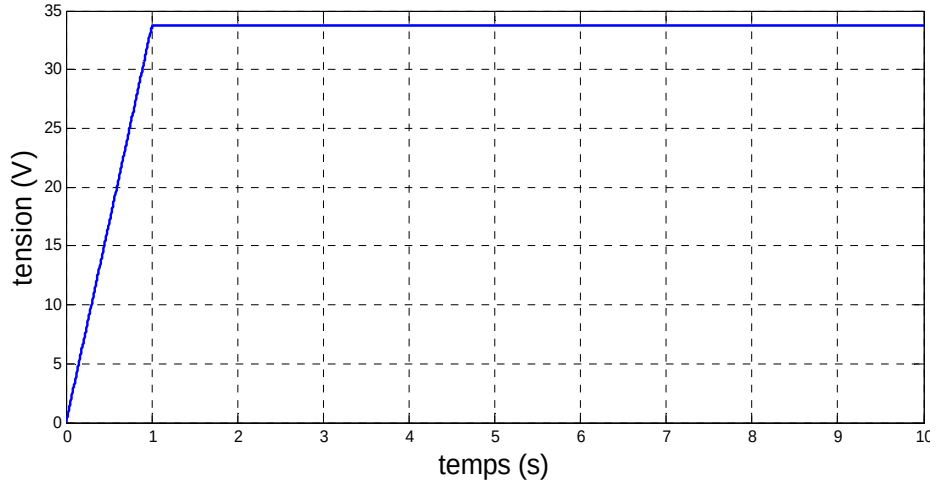


Figure III.4. Caractéristique V- t d'un module PV.

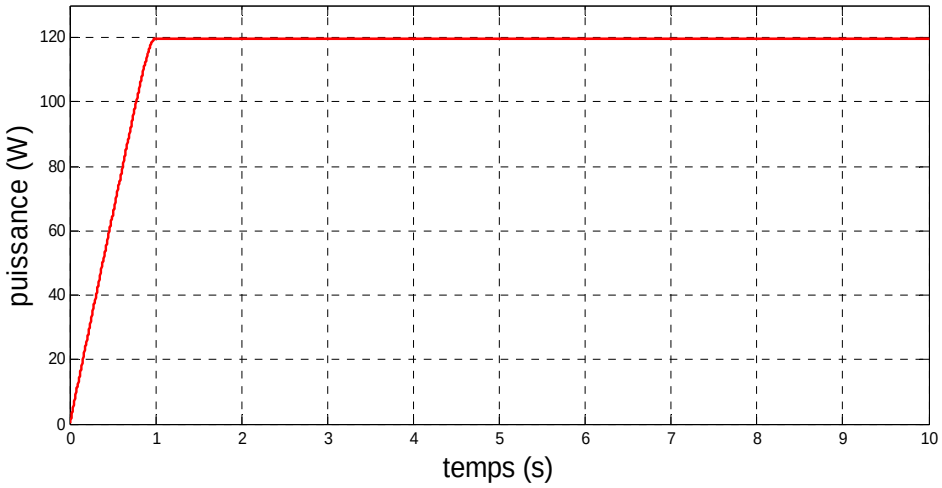


Figure III.5. Caractéristique P-t d'un module PV.

III.2.1 Simulation PV avec variation de la température

Sur les figures (III.6) et (III.7), la température varie de 0 ºC à 55 ºC. La variation de la T a un impact à la V de sortie sur PV. La variation de la T affecte moins le tension de sortie.

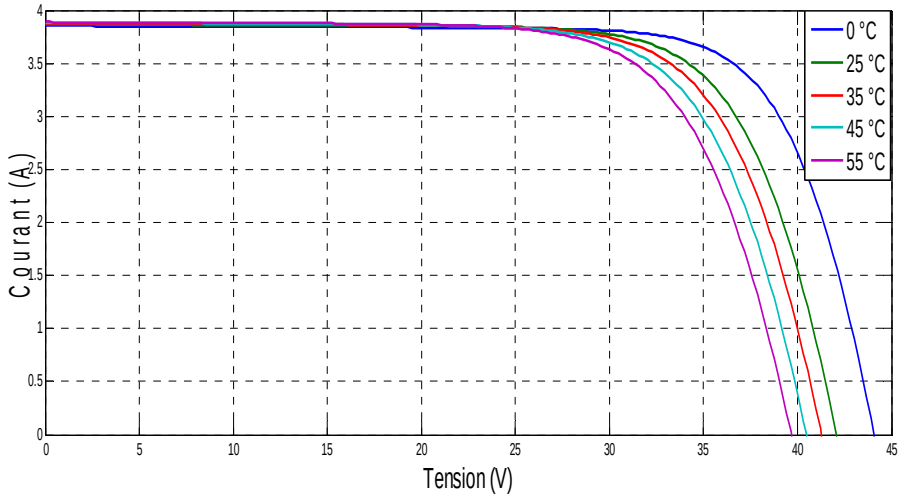


Figure III.6. Caractéristiques I-V d'un module PV pour différente T et E =1000W/m².

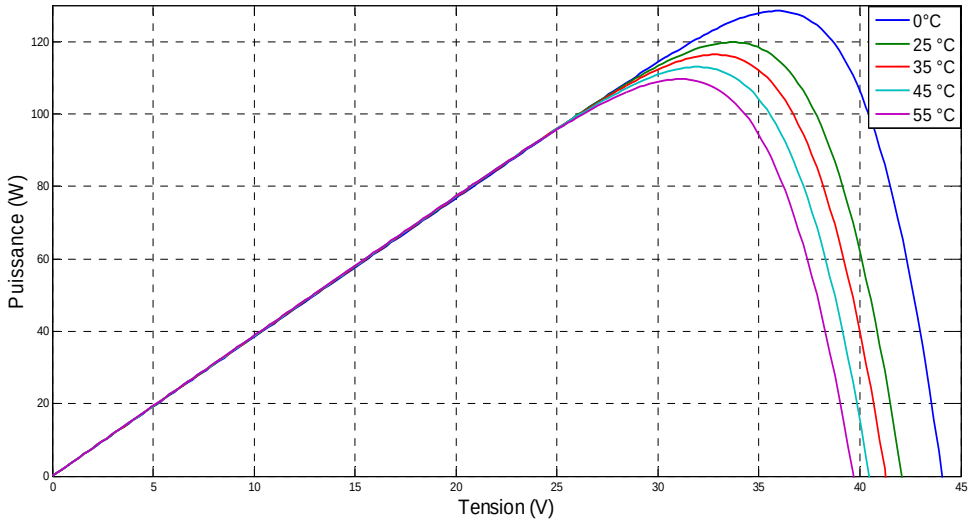


Figure III.7. Caractéristiques P -V d'un module PV Pour différente T et E= 1000W/m².

III.2.2 Simulation du PV avec variation de l'irradiation

Dans ce cas-ci, l'irradiation varie de200, 400, 600, 800 et 1000 W/m² et la T est constante 25C°. Le résultat sur le Figure (III.8) est courbe de I-V qui prouve que la Pmax de PV diminue lorsque la diminution d'E. La figure (III.9) est la courbe P- V, qui prouve que le I diminue de manière significative quand l'E diminue

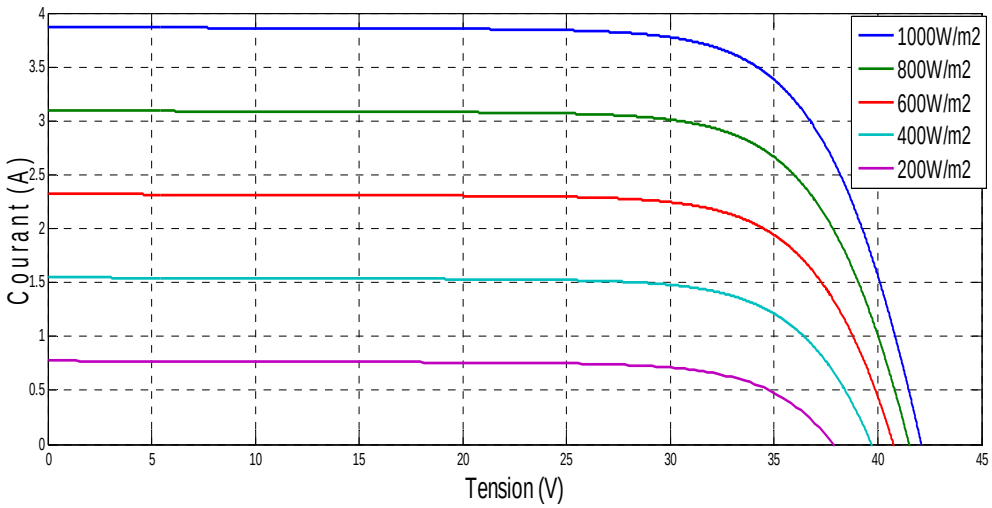


Figure III.8. Caractéristique I-V d'un module PV Pour déférente E et une T=25C°.

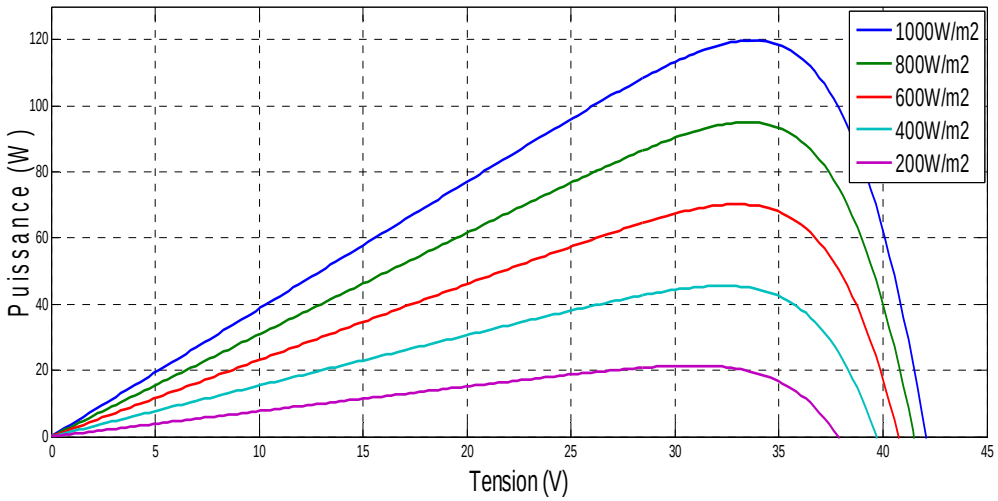


Figure III.9. Caractéristiques P-V d'un module PV pour différents E et T=25C°.

III.3 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

Comme on a vu dans la partie précédente précédent les caractéristiques I-V et P-V d'un panneau solaire montre bien que la puissance maximale générée dépende fortement de l'intensité des radiations solaire ainsi que de la température ambiante. En plus de ces dépendances, le panneau solaire ne peut générer sa Pmax que pour certaine V et I de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépend à son tour de l'E et de la T ainsi que de la charge. Pour que le panneau fourni sa Pmax disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le GPV.

Cette adaptation doit être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite MPPT pour extraire le Pmax générée par le panneau solaire, à ne pas confondre la poursuite de puissance avec la notion poursuite de du panneau qui s'occupe de la poursuite du soleil.

La figure (III.10) montre le schéma synoptique d'un système PV, avec un module MPPT qui à pour entrées la V et le I de sortie du panneau. Dans la plupart des littérateurs on fait une maximisation de la puissance fournie par le panneau solaire et non la puissance fournie à la charge. Car dans le cas d'un moteur comme charge la maximisation de la puissance de charge conduite à la maximisation de la puissance perdue dans les bobines et non seulement la puissance mécanique générée par le moteur, ainsi pour que le mécanisme de l'MPPT soi indépendant de la charge, il est préférable de maximisée la puissance de sortie du panneau. [73].

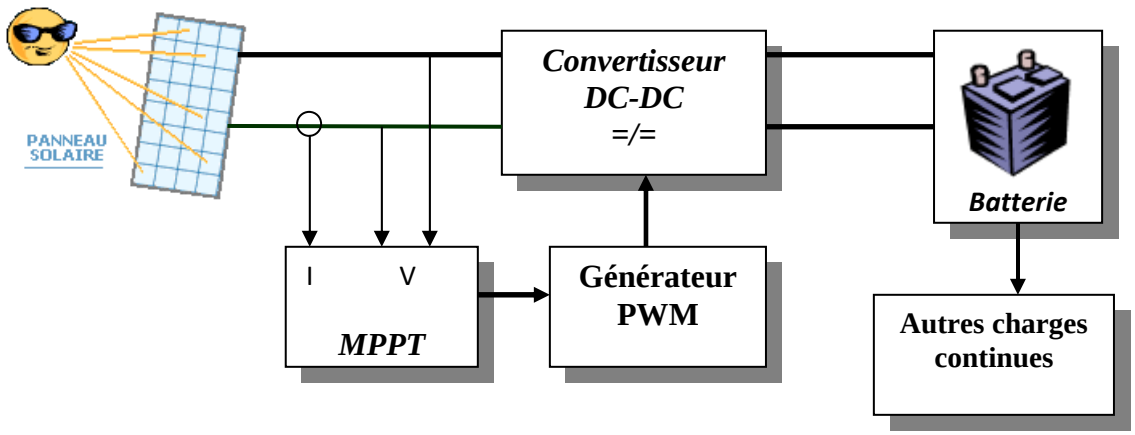


Figure III.10. Schéma synoptique d'un système PV avec MPPT.

La figure (III.11) donne un exemple de comparaison entre un système sans MPPT et avec MPPT pour des variations d'ensoleillement, on aperçoit une amélioration apparente de la puissance de sortie entre les deux cas.

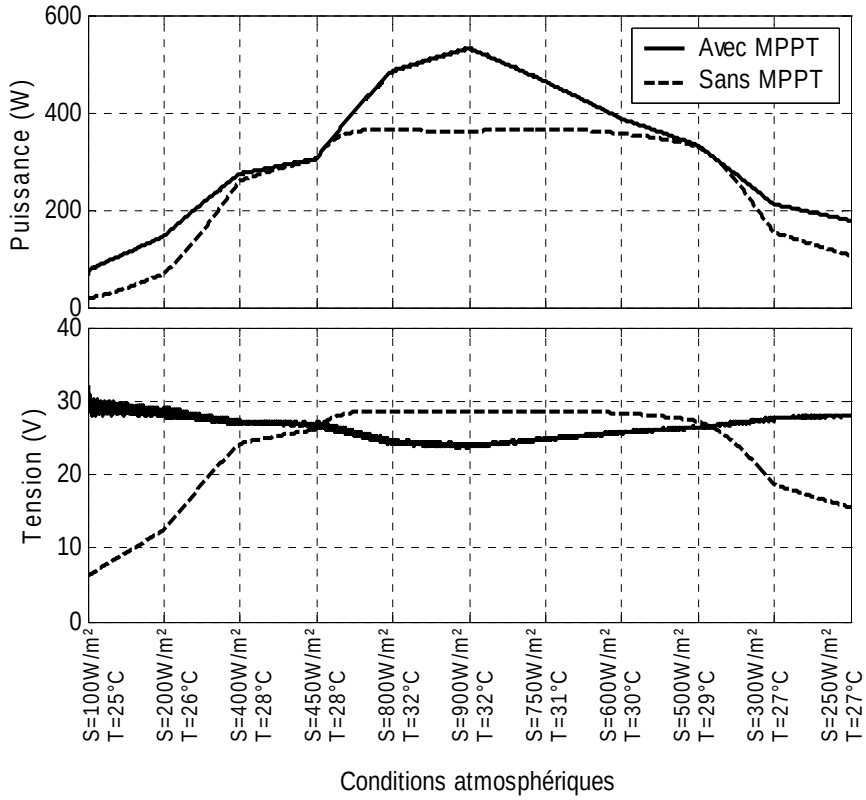


Figure III.11. Puissance et la tension V de sortie avec et sans MPPT (rapport cyclique fixé à 0.85), pour des G et T variables.

III.3.1 Simulation de la méthode MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement, P&O et l'incrément de conductance (IncCond). Dans notre travail on s'intéresse par la méthode P&O, nous rappelons brièvement le principe de cette méthode.

III. 3.1.1 Principe des commandes P&O

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte Ainsi, comme l'illustre la figure (III.13), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{PV} -V_{PV}, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le P_{max} à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

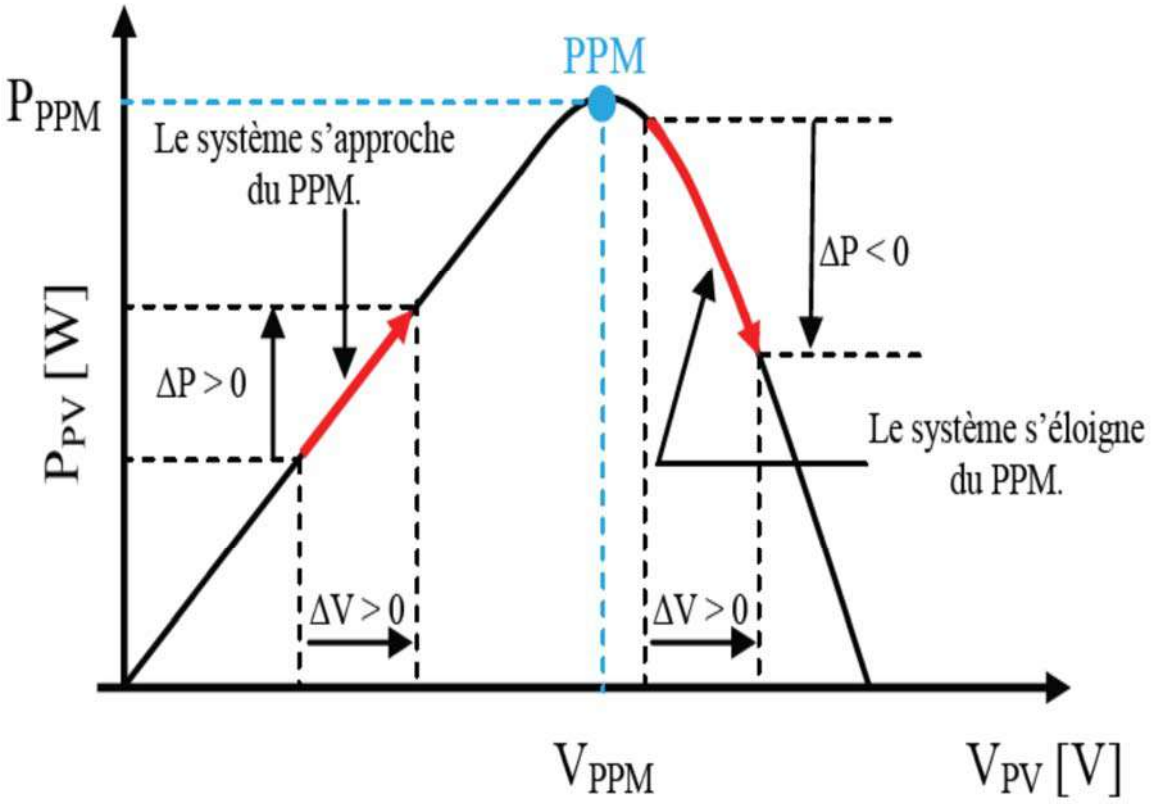


Figure III.12. Caractéristique P_{PV} -V_{PV} d'un panneau solaire.

La figure III.13 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Pour ce type de commande, deux capteurs I_{pv} et V_{pv} du GP sont nécessaires pour déterminer la P_{pv} à chaque instant.

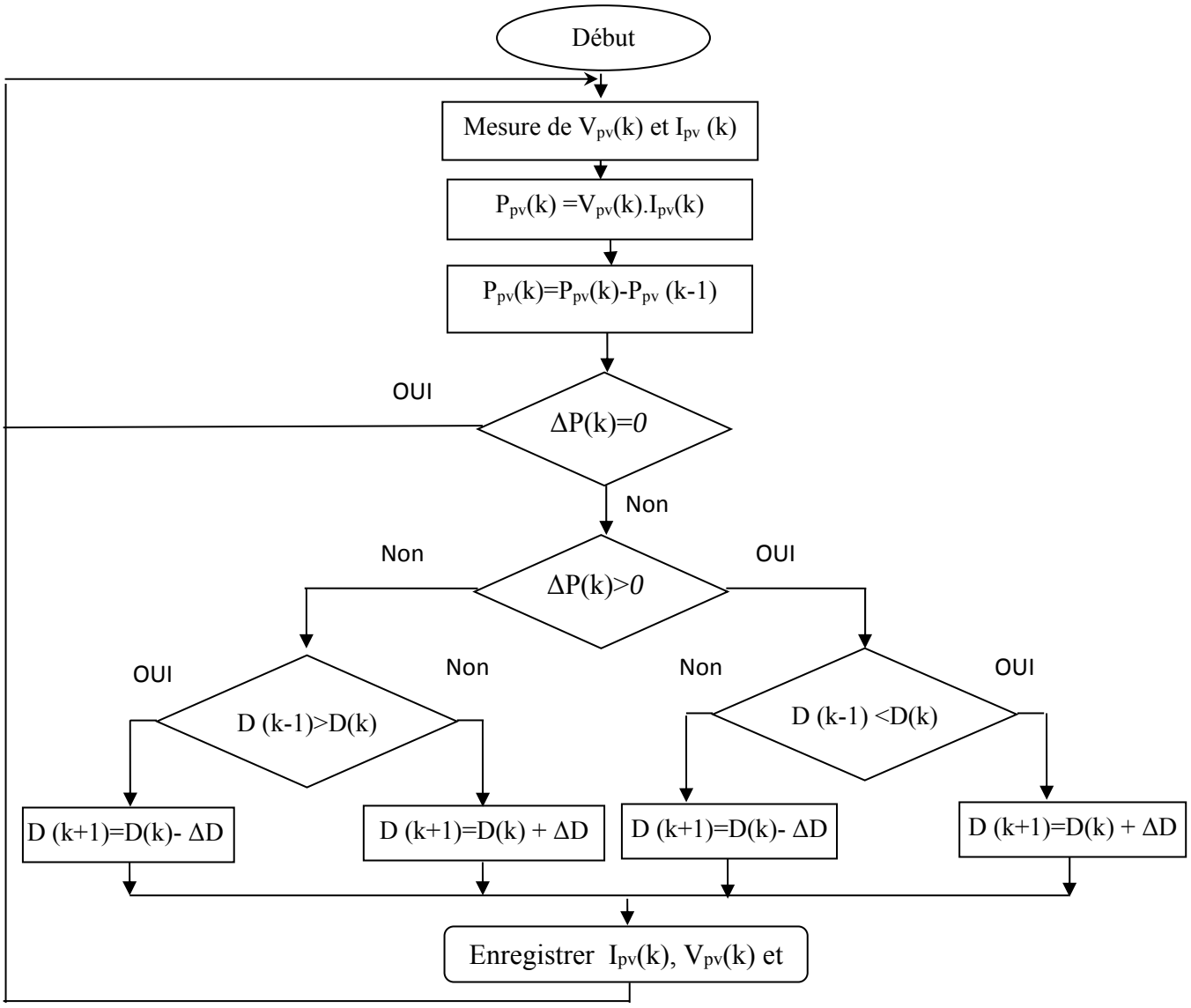


Figure III.13. Algorithme type de la méthode P&O [74].

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

III.4 Simulation du GPV avec MPPT

Les résultats de simulation sont constatés dans les conditions standards (T=25 °C et E =1000 W /m^2) du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «P&O » représentent par les figures (15, 16,17 et 18) le courant, la tension, la puissance et le rapport cyclique d'un hacheur Boost respectivement du panneau PV.

Nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produit par le système PV, causés par une augmentation et stabilisation de la tension et du courant électrique et attend sa valeur maximale 120 W. Ainsi que rapport cyclique D stabilise à sa valeur calculée en Annexe A (D=0.3759).

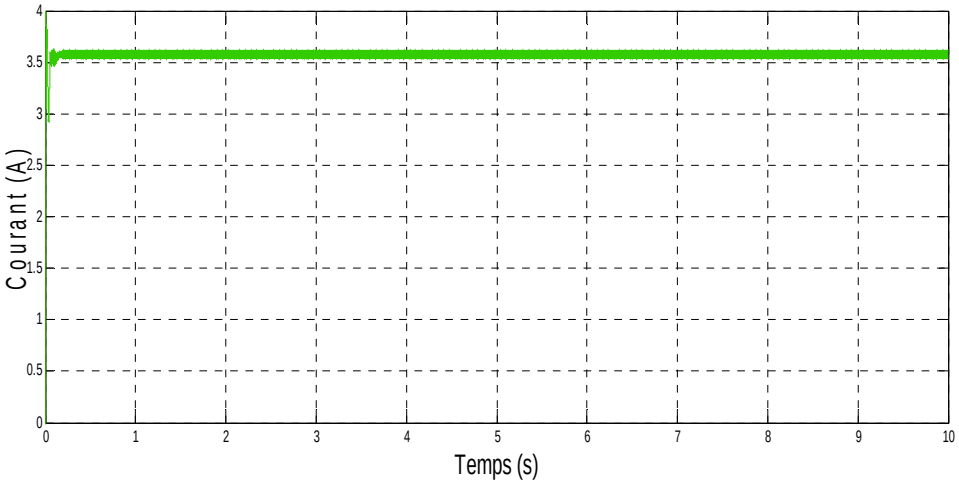


Figure III.15. Caractéristiques I-t d'un module PV.

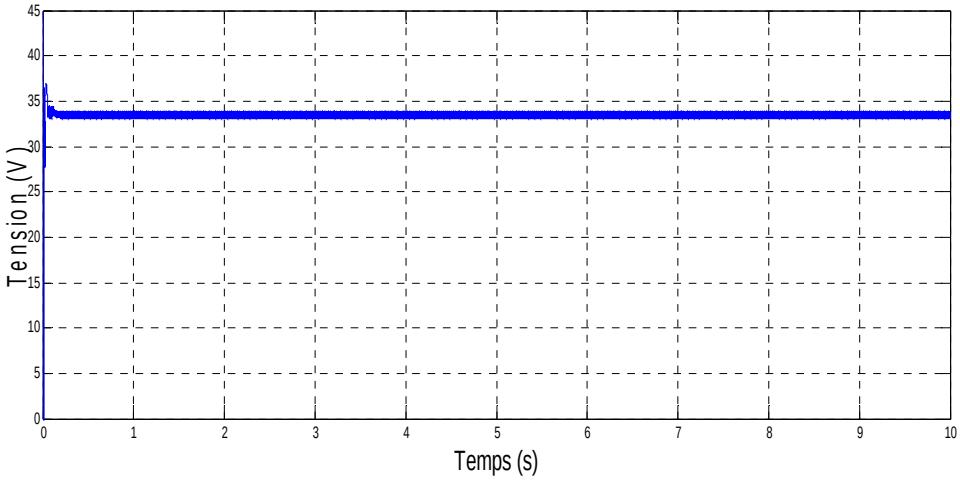


Figure III.16. Caractéristiques V-t d'un module PV.

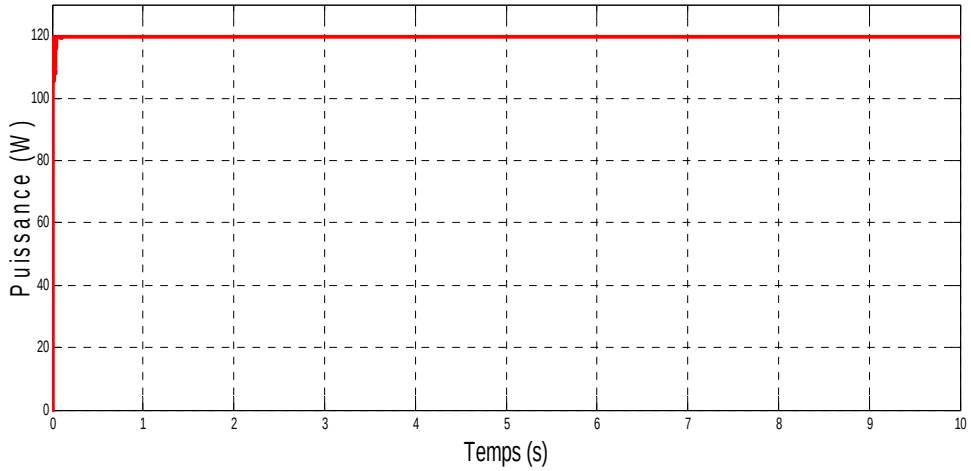


Figure III.17. Caractéristiques P-t d'un module PV.

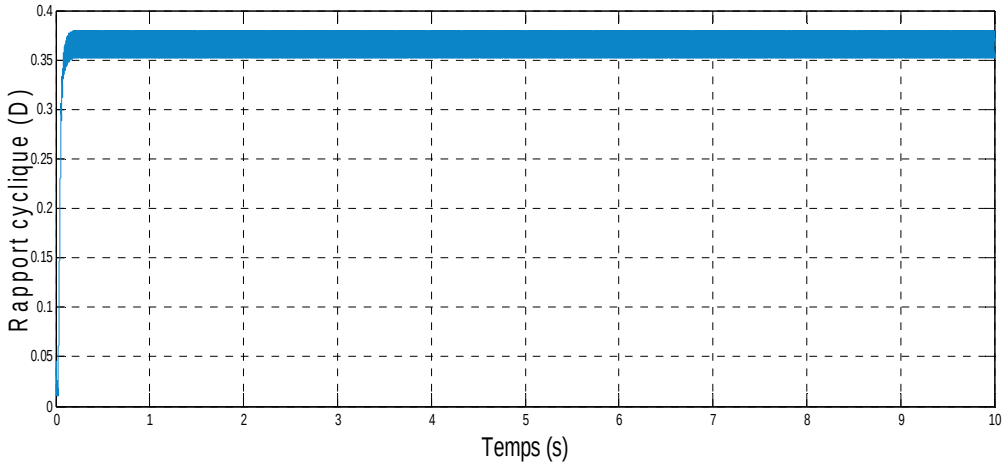


Figure III.18. Caractéristiques D-t d'un module PV.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Elle est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv}et I_{pv} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

CHAPITRE IV

Chapitre IV : Hybridation supercondensateur batterie

VI.1 Introduction 64

IV.2 Domaines d'applications 64
IV.3 Conception du stockage hybride 66
IV.3.1 Régulation de courant du convertisseur boost.....66
IV.3.2 Régulation de courant du convertisseur buck/boost.....67
IV.3.3 Résultats de simulation du système hybride.....68
IV.4 Batterie.....68
IV.5 Supercondensateur.....71

IV.6 Conclusion.....74

VI.1 Introduction

L'histoire de ce composant débute à la moitié du 19ème siècle, avec la découverte en 1853, par le physicien Hermann von Helmholtz, du phénomène capacitif nommé couche double électrique [75].

La modélisation dudit phénomène s'étend jusqu'à la moitié du 20ème siècle, avec notamment les études de Helmholtz, Gouy et Chapman, Stern, et Grahame. Le premier brevet, déposé par la société General Electric pour un composant à électrolyte aqueux et électrodes carbonées poreuses, date de 1957 [76]. En 1969, un second brevet, de la société américaine Sohio Corporation, décrit des dispositifs supercapacitifs à tenue en tension plus élevée, par usage d'électrolytes non-aqueux. Ce brevet sera cédé à NEC en 1971[77], société qui commercialisera avec succès les premières supercapacités à couche double électrique sous la dénomination "supercapacitor". Il s'agit de dispositifs de petite dimension (capacités de quelques farads, énergie spécifique modeste, de l'ordre de 0,5 Wh.kg-1), destinés à des applications de faible puissance, telle que la sauvegarde mémoire [78].

A la fin des années 70 et au cours des années 80, plusieurs entreprises se lancent dans la production de SC. Matsushita Electric Industrial Company, plus connue sous le nom de Panasonic, développe en 1978 la série "Gold Capacitor", également dédiée à la Sauvegarde mémoire. En 1987, la société Elna sort une série baptisée "Dynacap", pour applications de faible puissance [79].

Les SC de puissance apparaissent dans les années 90. Un programme de développement fut lancé en 1989 par le Département of Energy (DOE) américain avec, pour objectif à court terme, des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 5 Wh.kg-1 et de puissance spécifique supérieure à 0,5 kW.kg-1, et pour objectif à long terme (après 2003), des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 15 Wh.kg-1 et de puissance spécifique supérieure à 2 kW.kg-1 [80].

IV.2 Domaines d’applications

L'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie électrique est nécessaire dans de nombreuses applications : télécommunication, sauvegarde mémoire, véhicules électriques et hybrides. Plusieurs critères permettent de différencier les SC: les matériaux d’électrodes, l'électrolyte, la membrane.

On aura intérêt alors à réaliser une source hybride, soit donc à séparer les fonctions puissance et énergie en associant plusieurs technologies de stockage, les unes (batteries

d'énergie, pile à combustible) étant dimensionnées en terme d'autonomie, les autres (batteries de puissance, condensateurs) en terme de puissance instantanée requise sur une durée plus ou moins longue. Pour des durées supérieures à la seconde, la technologie "SC" comme organe de puissance se révèle relativement adéquate.

Dans le plan de Ragone, les SC se situent donc entre les condensateurs traditionnels et les batteries, comme indiqué figure (IV.1), En outre, les SC à couche double électrique présentent une durée de vie élevée, conséquence d'un mode de fonctionnement électrostatique.

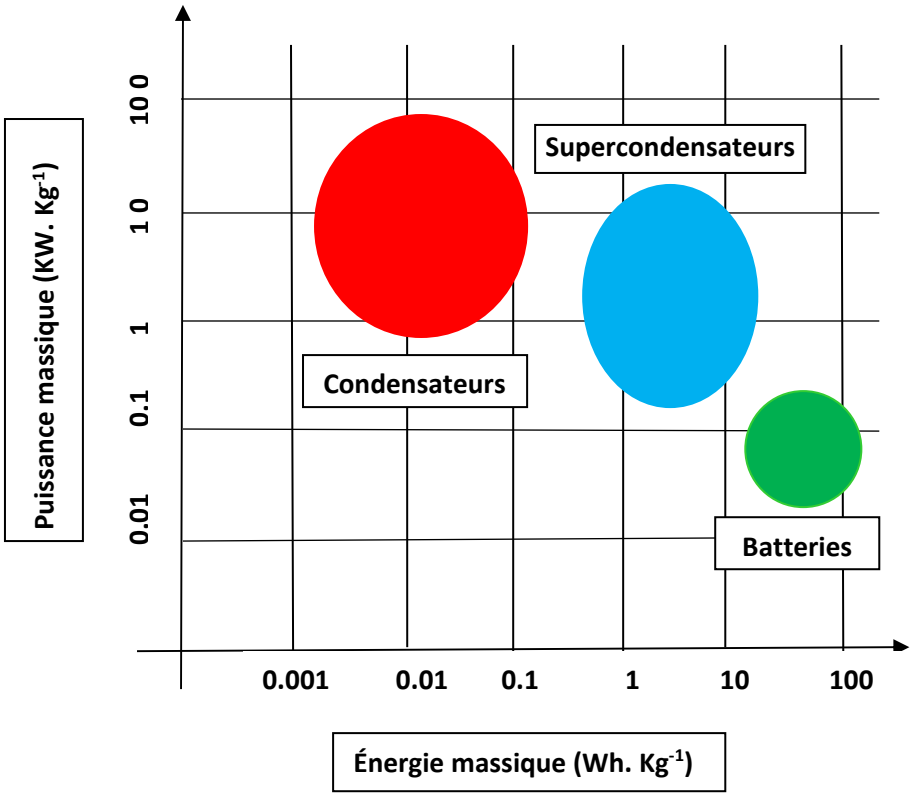


Figure IV.1. Schéma comparatif [76]

L'objectif final de notre travail est la conception et la simulation d'une régulation de tension d'un bus continu alimenté par une batterie, comme source principale et un pack des SC, comme source axillaire.

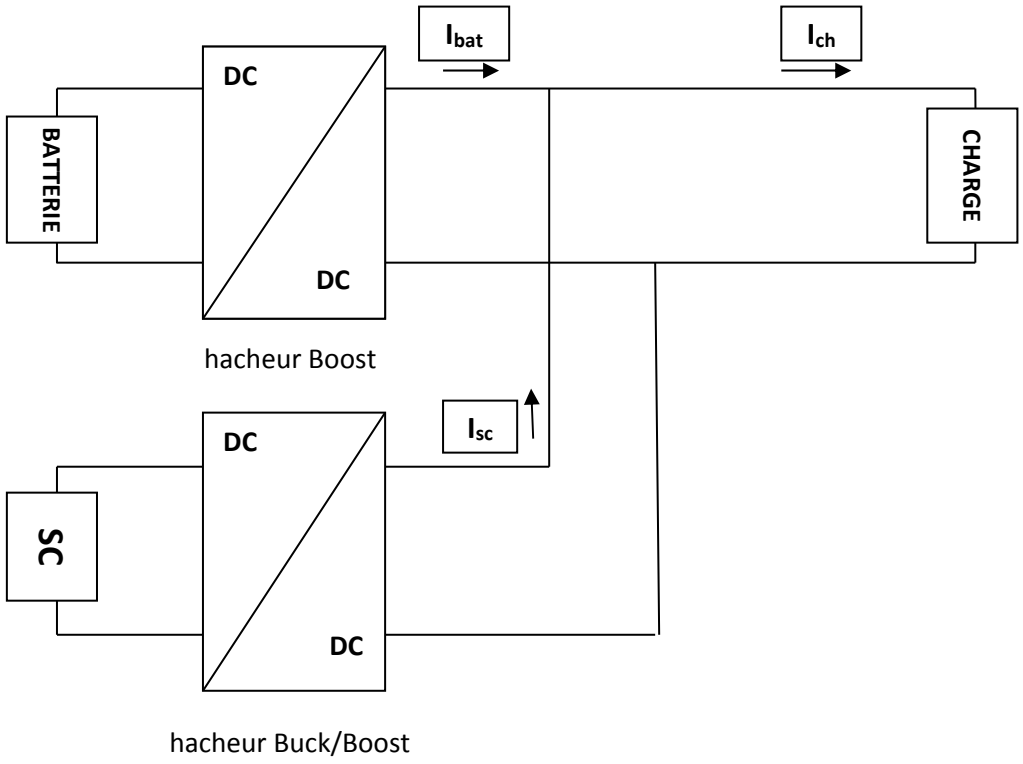


Figure IV.2. Synoptique de la source hybride.

IV.3 Conception du stockage hybride

IV.3.1 Régulation de courant du convertisseur boost

La régulation du courant circulant le hacheur survolteur raccordé à la batterie est faite de façon classique grâce à une boucle interne de courant électrique.

Cette boucle permet de réguler le courant dans la batterie et de fixer le point de polarisation. Le correcteur utilisé est de type PI (Proportionnel Intégral). Le signal de commande du transistor est généré par un circuit MLI.

Le quotient entre la puissance de commande et la tension aux bornes de la batterie génère une consigne de courant pour la boucle de courant. Le correcteur est de type PI.

Les paramètres du correcteur PI de la boucle de courant on été déterminés en calculant la fonction de transfert du système en boucle ouverte et en appliquant la méthode de compensation de pôle (Figure IV. 3).

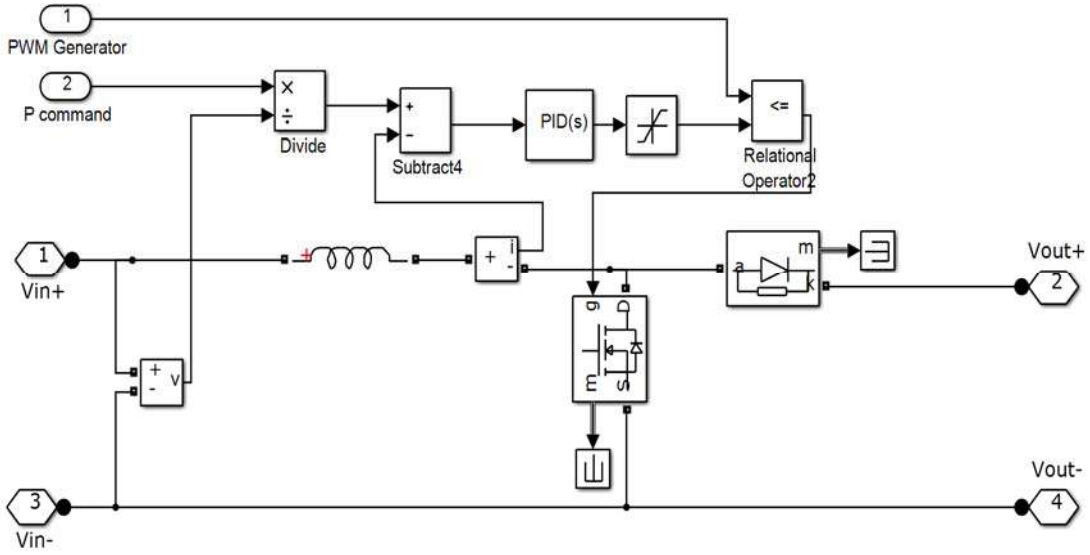


Figure IV.3. Schéma du convertisseur Boost contrôlé par PI.

IV.3.2 Régulation de courant du convertisseur buck/boost

Cette commande est composée en deux boucles internes de courant électrique. L'une est homologue que la précédente (convertisseur boost) et l'autre concerne la régulation de la boucle interne du courant du convertisseur buck comme le montre la figure (IV.4).

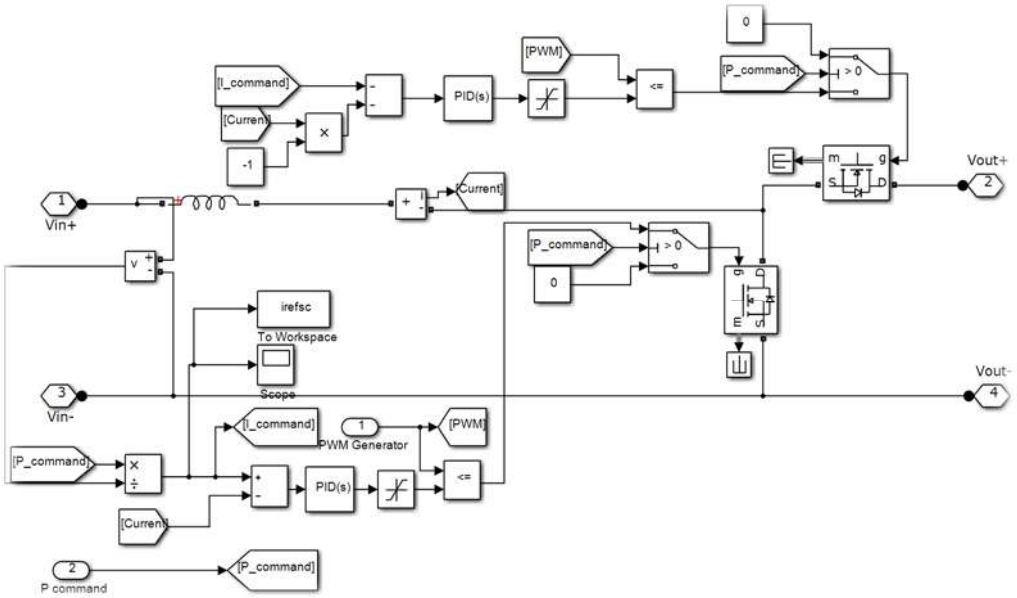


Figure IV.4. Schéma du convertisseur Buck/Boost contrôlé par PI.

IV.3.3 Résultats de simulation du système hybride

La figure (IV.4) correspond au schéma Simulink du modèle utilisé pour visualiser la réponse du système.

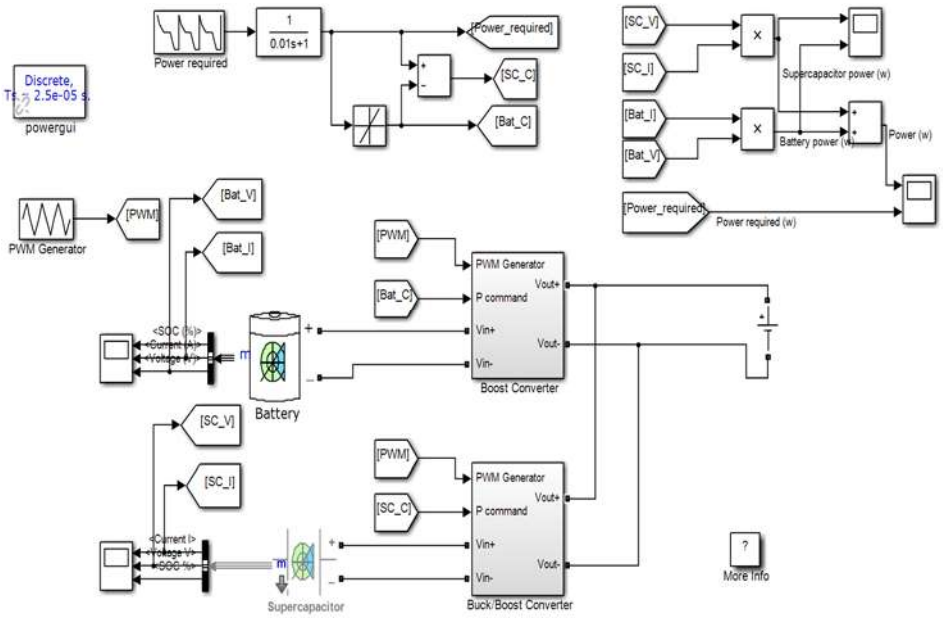


Figure IV.5. Schéma Simulink du modèle de l'ensemble batterie– SC.

IV.4 Batterie

Les figures (6, 7,8 et 9) représentent le courant, la tension, la puissance et l'état de charge (SOC) respectivement de la batterie. Nous remarquons aisément que le courant mesuré suit le courant de référence (consigne) durant toute la trajectoire.

Nous voyons qu'il y a quatre parties durant le temps de simulation [t=10s]. La première partie, où la batterie initialement chargée avec une valeur de 30,7293 V.

- Dans l'intervalle t∈ [0s, 3,33s], quand le courant augmente de 0 A à 34,5 A (état de fonctionnement), la tension diminue (ou décharge) de 30,7293 V à 29,04 V et la puissance augmente de 0 A à 1000 W.
- Dans l'intervalle t∈ [3,33s, 6s], quand le courant augmente légèrement de 34,5 A à 35,2A, la tension continue toujours la diminution mais légèrement de 29,04 V à 28,45 V et la puissance reste constante sur la valeur de 1000 W.
- Dans l'intervalle t∈ [6s, 9,32s], quand le courant diminue de 35,2A à 0 A, la tension augmente (ou charge) de 28,45 V à 29,61 V et la puissance diminue de 1000 W à 0W.

- ♣ Et enfin, dans l'intervalle t∈ [9,32s, 10s], quand le courant garde la valeur 0 A (Hors fonctionnement), la tension augmente très légèrement (presque constante) de 29,61 V à 29,63 V et la puissance garde toujours la valeur 0W.
- ♣ Le SOC Diminue dans toute l'intervalle de simulation, de 100 % jusqu'atteint la valeur 99,126 %.

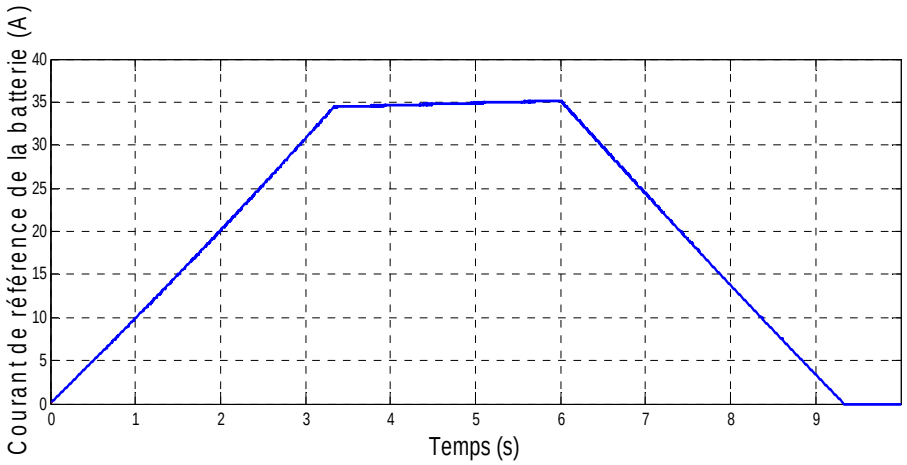


Figure IV.6. Courant de référence de la batterie.

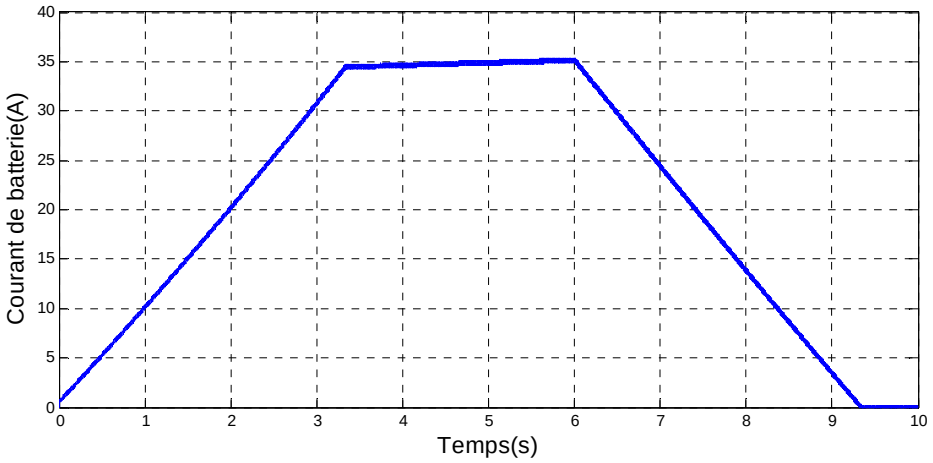


Figure IV.7. Courant de la batterie.

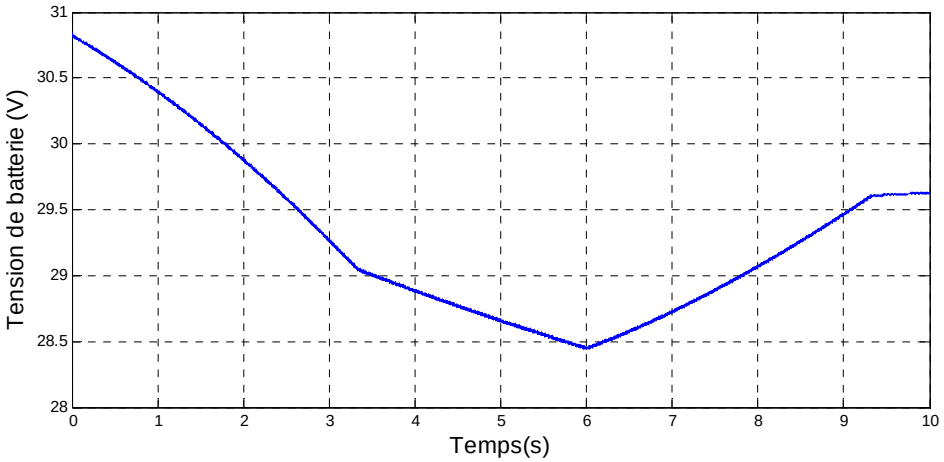


Figure IV.8. Tension de la batterie.

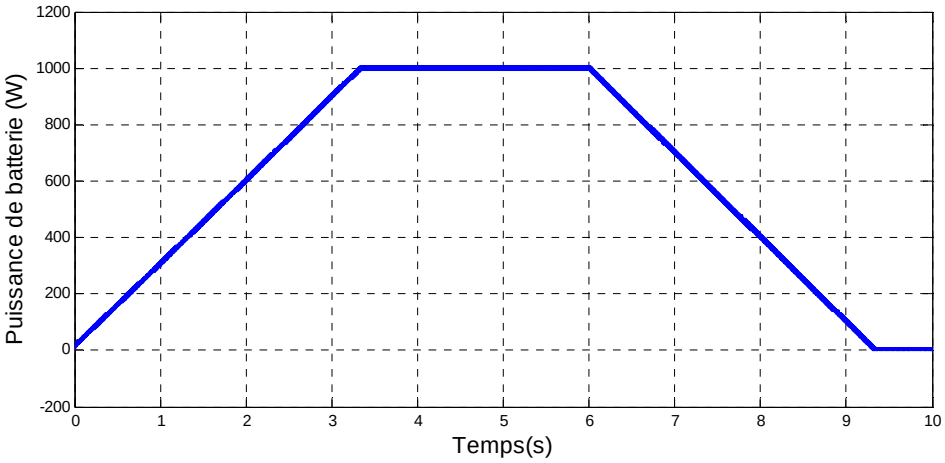


Figure IV.9. Puissance de la batterie.

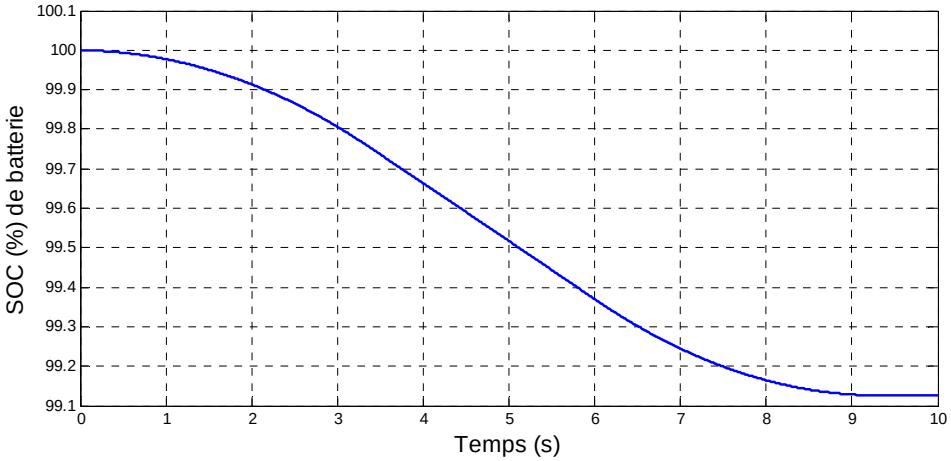


Figure IV.10. État de charge de batterie.

IV.5 Supercondensateur

Les figures (11, 12,13 et 14) représentent le courant, la tension, la puissance et l'état de charge (SOC) respectivement du SC. Nous voyons qu'il y a sept parties durant le temps de simulation [t=10s].

- ♣ Dans l'intervalle t∈ [0s, 0,05s], quand le courant augmente brutalement de 0 A à 123,4 A (état de fonctionnement), la tension diminue (ou décharge) de 16 V à 15,737 V de la même manière et la puissance augmente de 0 A à 1940 W.
- ♣ Dans l'intervalle t∈ [0,05s, 1s], quand le courant diminue progressivement de 123,4 A à 75A, la tension continue toujours la diminution mais légèrement de 15,737 V à 15,668 V et la puissance continue la diminution de la valeur 1000 W à la valeur 98,75 W.
- ♣ Dans l'intervalle t∈ [1s, 3,33s], quand le courant diminue de 75 A à 0 A, la tension diminue de 15,668 V à 15,64 V à l'instant 1,8s où reste constante à cette valeur puis elle s'augmente à l'instant 2,12s de 15,64 V à 15,685 V à l'instant 3,25s et la puissance continue la diminution de 98,75 W à 97,693W.
- ♣ Dans l'intervalle t∈ [3,33s, 6,08s], quand le courant stabilise 0 A, la tension reste constante à 15,685 V jusqu'à l'instant 6,08s et la puissance reste toujours nulle.
- ♣ Dans l'intervalle t∈ [6,08s, 8s], quand le courant change le signe et atteint à la valeur -25 A à l'instant 8s, la tension se charge de nouveau jusqu'à la valeur 15,78 V et la puissance change aussi le signe et atteint à la valeur -400 W à l'instant 8s.
- ♣ Dans l'intervalle t∈ [8s, 9,32s], quand le courant augmente durant cette intervalle, la tension se décharge légèrement jusqu'à la valeur 15,755 V et la puissance augmente jusqu'à la valeur 0 W.
- ♣ Et enfin, dans l'intervalle t∈ [9,32s, 10s], quand le courant garde la valeur 0 A (Hors fonctionnement), la tension reste fixe à la valeur 15,755 V et la puissance s'annule.
- ♣ Le SOC Diminue au début de 100 % jusqu'atteint la valeur 97,70 % à l'instant 3,33s, il reste constant jusqu'à 6,08s puis il s'augmente quand la puissance change son signe (négatif) jusqu'à l'instant 9,32s et stabilise à 98,218%.

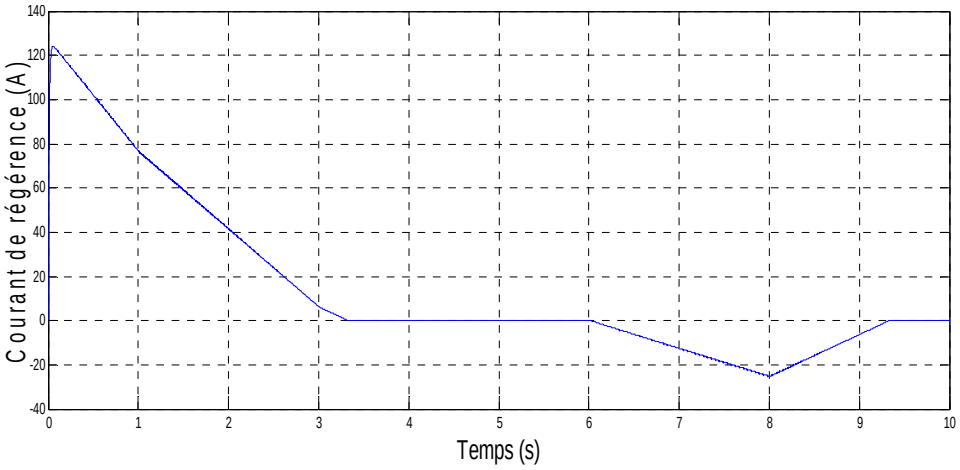


Figure IV.11. Courant de référence du supercondensateur

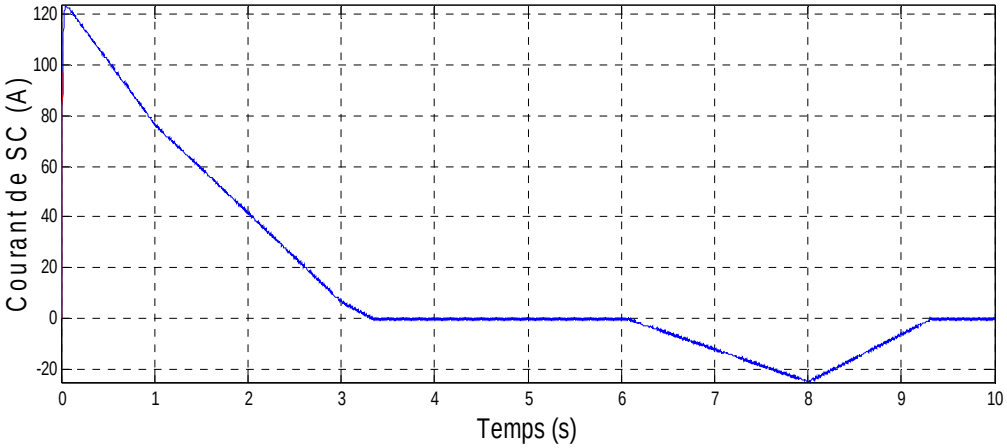


Figure IV.12. Courant de SC.

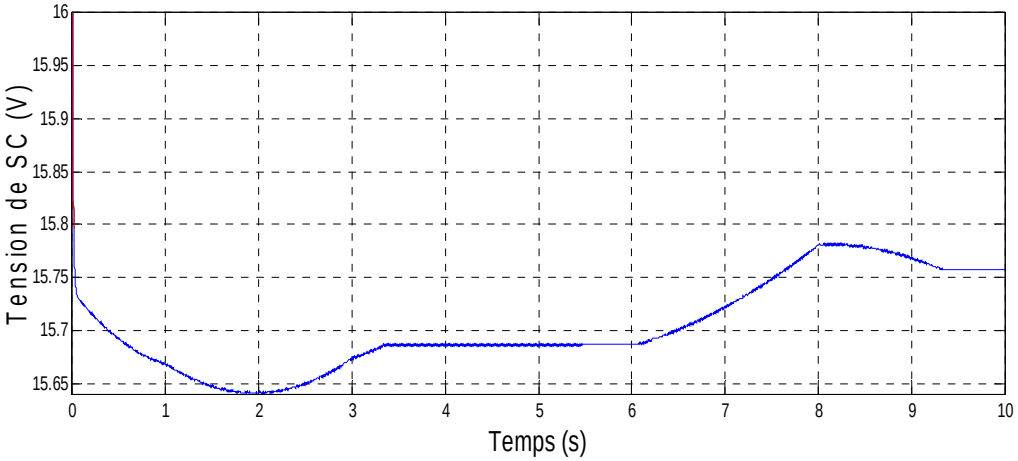


Figure IV.13. Tension de SC.

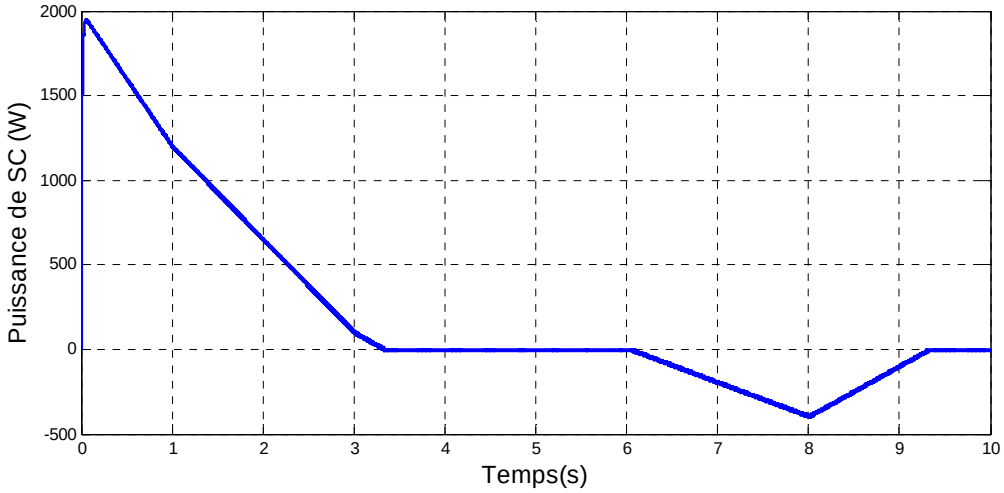


Figure IV.14. Puissance de SC.

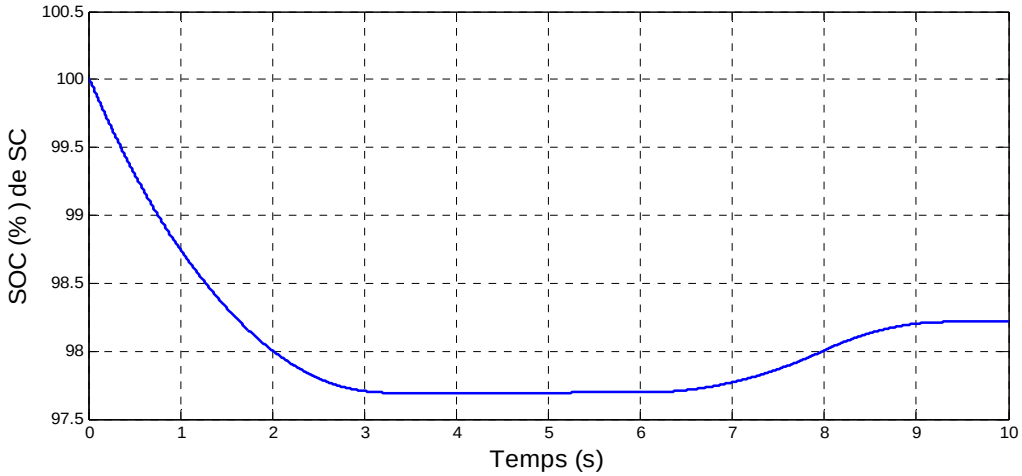


Figure IV.15. État de charge de SC.

Discussion

D'après les résultats de simulation précédents, nous remarquons que le supercondensateur a varié un peu de la tension (0.10 V) avec une gamme de courant électrique important (142 A), tandis que la batterie varie plus de tension (2.3 V) dans une gamme de courant moins important (35 A), ce qui nous a permis de dire que le stockage via les supercondensateurs est plus performent et plus précis que celle les batteries. Alors ces résultats nous a prouvé ce qu'on a déjà dis au résumé.

IV.6 Conclusion

Par le principe de contrôle présenté dans cette partie, nous avons réussi à piloter notre source hybride selon le cahier des charges suivant :

- fournir ou absorber les pointes de puissance par l'organe de stockage, ce qui est somme toute le minimum requis pour une source hybride,
- réguler la source hybride en tension,
- faire encaisser les transitoires de puissance à l'organe de stockage, de façon à n'imposer à la batterie que des régimes lentement variables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

En deuxième temps, on a étudié la modélisation du système photovoltaïque avec stockage. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV (MSX120) par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV, quelques types convertisseurs DC-DC, et le comportement électrique et énergétique des supercondensateurs. Cette étude doit être un outil de compréhension du comportement des supercondensateurs afin de les exploiter dans les applications « courant fort » telles que le transport, les énergies renouvelables.

Ainsi, on a décrié le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation.

En ce travail, nous avons fait les points suivants :

Dans la première partie, une généralité sur le système solaire photovoltaïque (panneau solaire, système de conversion d'énergie électrique dc-dc et systèmes de stockage (batterie et supercondensateur).

Le second chapitre, a présenté la modélisation du système photovoltaïque.

Au troisième chapitre, on a présenté la commande par la technique de la perturbation et observation "P&O" du system photovoltaïque.

Enfin, le quatrième chapitre été présenté sur l'hybridation supercondensateur et batterie.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que le système de stockage d'énergie électrique basé sur le supercondensateur est très utile et dure plus que les batteries d'une part, et travaille en une source auxiliaire en hybridation avec la batterie de tel façon qu'l absorbe la puissance perdue par la batterie et réutilisé dans les besoins. notre système de stockage (supercondensateur -batterie) peut être utiliser

sur le système embarqué dans les véhicules électriques (bus , tramway , ...etc.). La stratégie de régulation de la source hybride était basé sur le contrôle du courant de la batterie (limité à 35.2 A) et du supercondensateur (limité à 123.4 A).

Perspectives et travaux futures

On peut dire que notre travail donne une vue sur le système de stockage d'énergie électrique, en sont basant sur les batteries (plus usuelles) et les supercondensateurs (nouvelle technique). Pour cela, nous proposons comme perspectives à autres recherches les points suivants :

- ✓ Ajoutant une machine à courant continu qui marche avec des énergies renouvelables durant le jour, et avec le stockage hybride SC/Batterie durant l'obscurité.

ANNEX

Annexe A

L'annexeA : paramètres du convertisseur boost :

Les paramètres du convertisseur boost est :

- Vpv : 33.7 V
- V cha : 54 V
- Puissance maximale PV : 120 W
- Fs : 10 kHz

  Maximum inductor current ripple: 10 %

L'équation de Calcul de l inducteur L

$$L \geq \frac{V_{cha}.D_m.(1-D_m)}{f_s|\Delta I_{Lripple}|}$$

L'équation de Calcul de raport de cyclique

$$\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{cha}}$$

$$D = 0.3759$$

L'équation de calcul de le courant de sortie de l'hacheur

$$I_{cha} = \frac{P_{cha}}{Vcha}$$

Le courant de sortie de l'hacheur

$$I_{cha} = \frac{120}{54} = 2.22 \text{ A}$$

La résistance charge est

$$R_{cha} = \frac{54}{2.22} = 24.3 \text{ ohm}$$

L'inducteur L est

$$L \geq \frac{54 \times 0.3759 \times (1-0.3759)}{10000 \times 2 \times 3.56 \times 0.1}$$

$$L \geq 444 \ \mu H$$

La capacities d'entrée C_{in} utilisée la relation

$$C_{in} \geq \frac{I_{om}.D_{m^2}}{0.02(1-D_m)f_s V_{mp}}$$

$$C_{in} \geq \frac{2.22\times 0.3759^2}{0.02\times(1-0.3759)\times 10000\times 33.7}$$

$$C_{in} \geq 78.6\ \mu F$$

La capacitie de sortie C_{out} utilisée la relation

$$C_{out} \geq \frac{V_{cha}.D}{f_s \Delta V_{cha} R_{cha}}$$

$$C_{out} \geq \frac{540\times 0.3759}{10000\times 0.54\times 24.3}$$

$$C_{out} \geq 154.69\ \mu F$$

Annexe B

B: Datasheet BP MSX120

bp solar

BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. Providing 120 watts of nominal maximum power, the MSX 120 is used primarily in large battery-equipped PV systems or—through an inverter—to provide AC power directly to a load. Typical applications include grid-supplemental residential and commercial systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based navigation aids. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

This product is available as a framed module or an unframed laminate, in 12V or 24V nominal configurations, with either:

- Dual high-volume junction boxes which allow on-site 12V/24V selection by rewiring (MSX 120);
- Installation-speeding DC-rated polarized connectors (MSX 120MC).

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells configured as one series string or two 36-cell series strings (bypass diodes are included);
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Weatherproof Connectors

MSX 120MC output is via heavy-duty (4mm²/AWG #12) output cables with polarized weatherproof DC-rated connectors which provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation. Asymmetrical cables enable side-by-side or end-to-end module placement in arrays.

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction boxes of the MSX 120 are raintight (IP54 rated) and accept PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Their volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal



Bronze Anodized Universal Frame

connection blocks enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the boxes. Options include:

- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Products with junction boxes may be rewired to provide 12V or 24V output.

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



BP MSX 120

MSX 120 laminates also qualify for the above listings and certifications; MSX 120MC laminates are UL-recognized. MSX 120 modules and laminates with junction boxes are also certified by PowerMark Corporation and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

©2002 BP Solar Global Marketing

01-4003-2 2/02

Quality and Safety

MSX 120 and MSX 120MC modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and comply with the requirements of IEC 61215 including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

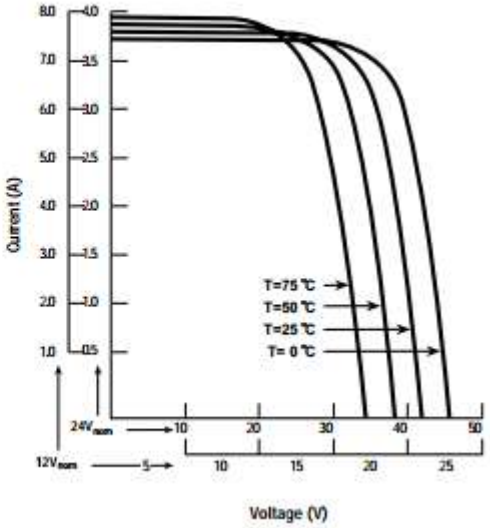
Electrical Characteristics[1]

	MSX 120	MSX 110[4]
Maximum power (P_{max})[2]	120W	110W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	33.7V	33.6V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.3A
Minimum P_{max}	114W	105W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.1V	41.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

Notes

1. These data represent the performance of typical MSX 110 and MSX 120 products in 24V configuration. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - cell temperature of 25°C.
2. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max}.
3. The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.
4. The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 110 is assembled using cells of slightly lower power than the MSX 120.

MSX 120 I-V Curves



B. Blocs diagrammes des modèles de simulation

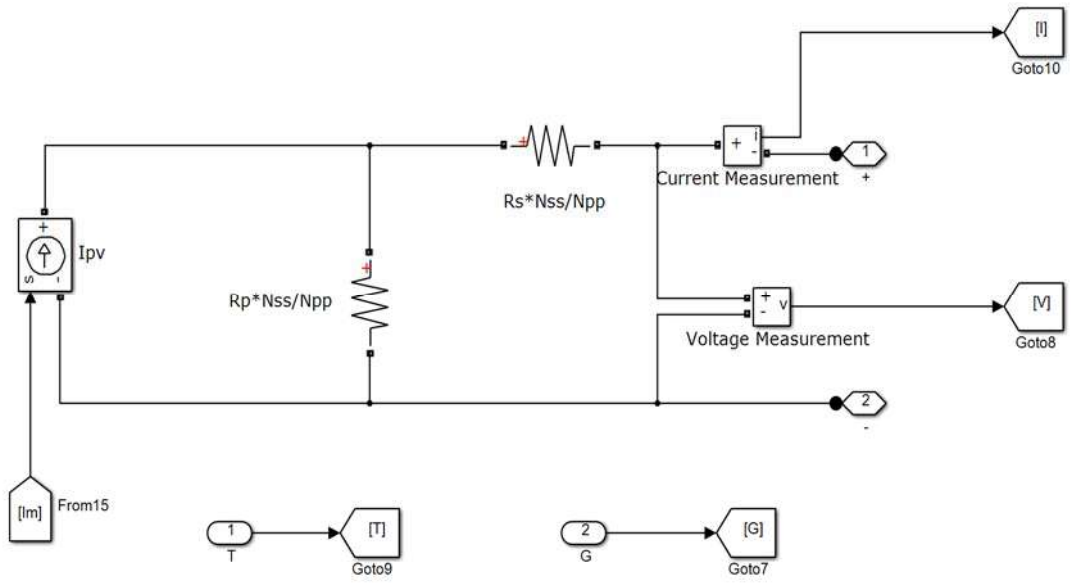


Figure B.1 Simulation du module de PV [5]

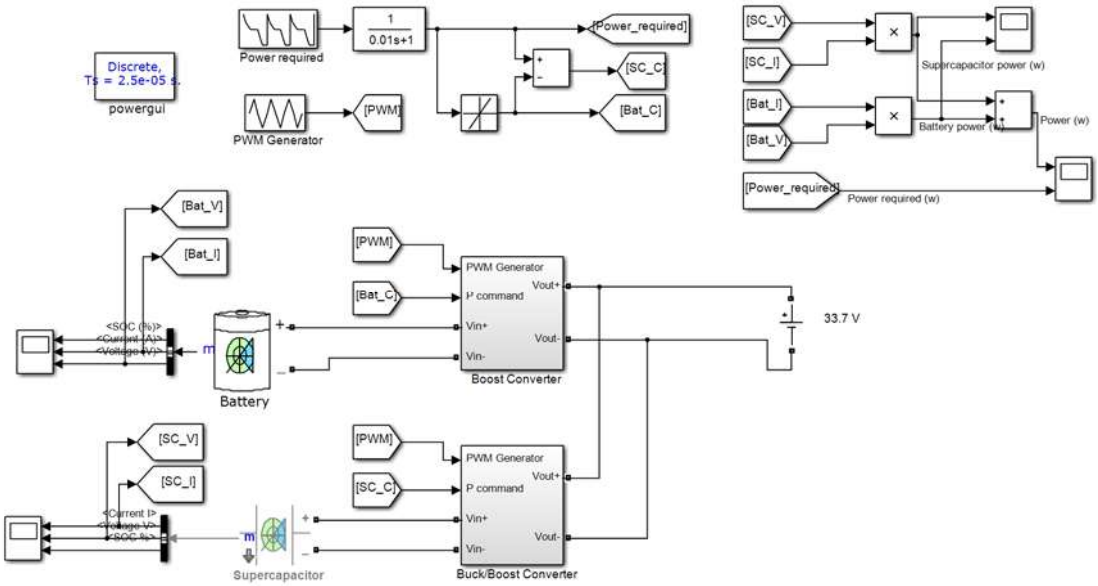


Figure B.2 Schema simulink un modéle de l'ensemble Batterie-Supercondensateur

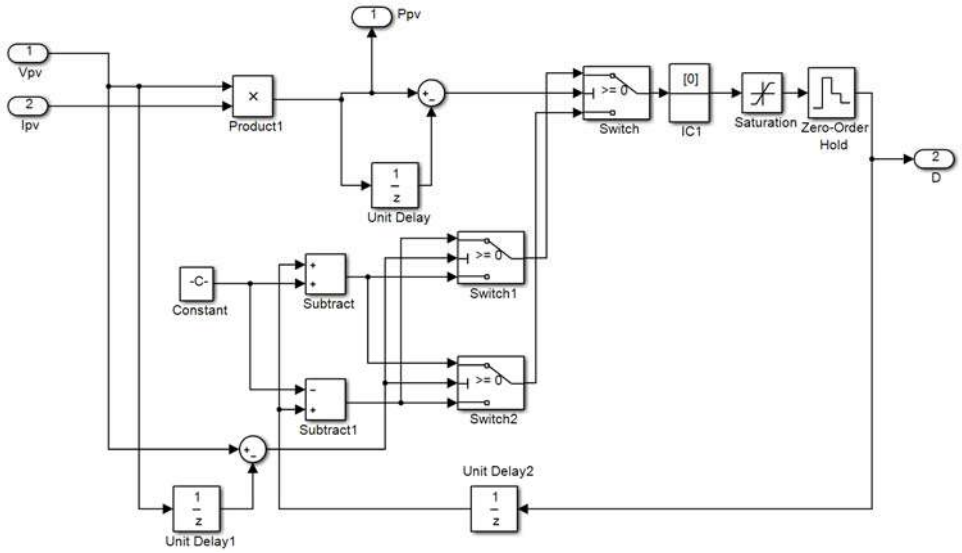


Figure B .3 Simulation de commande p&o

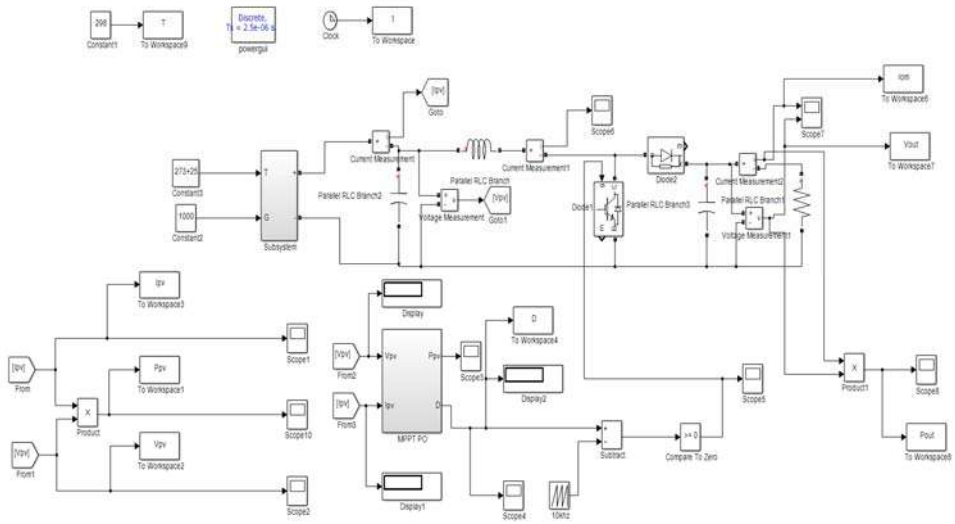


Figure B.4. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

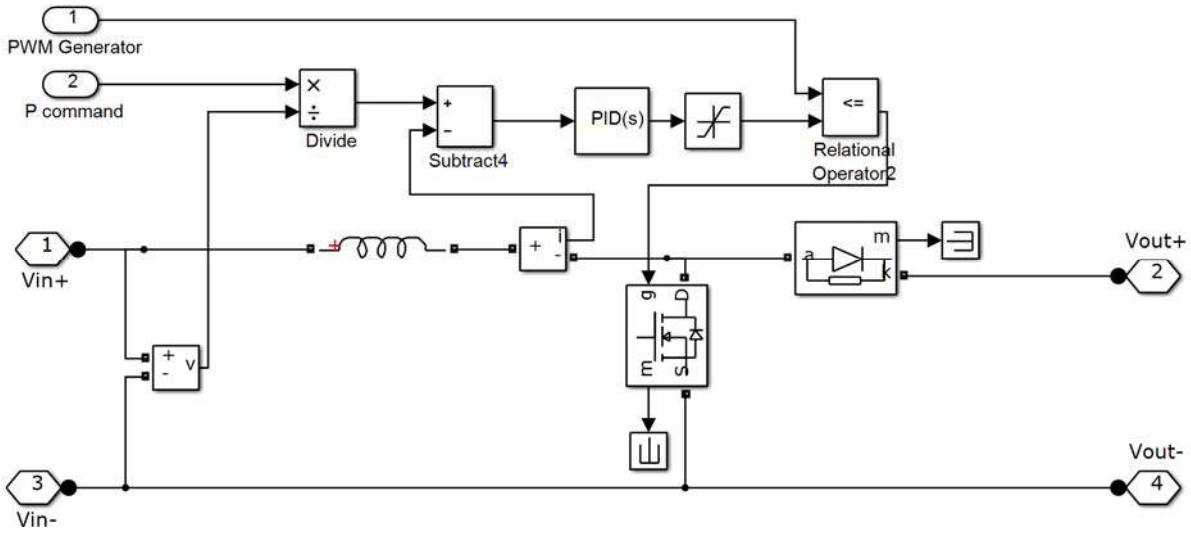


Figure B.5 Simulation de convertisseur boost

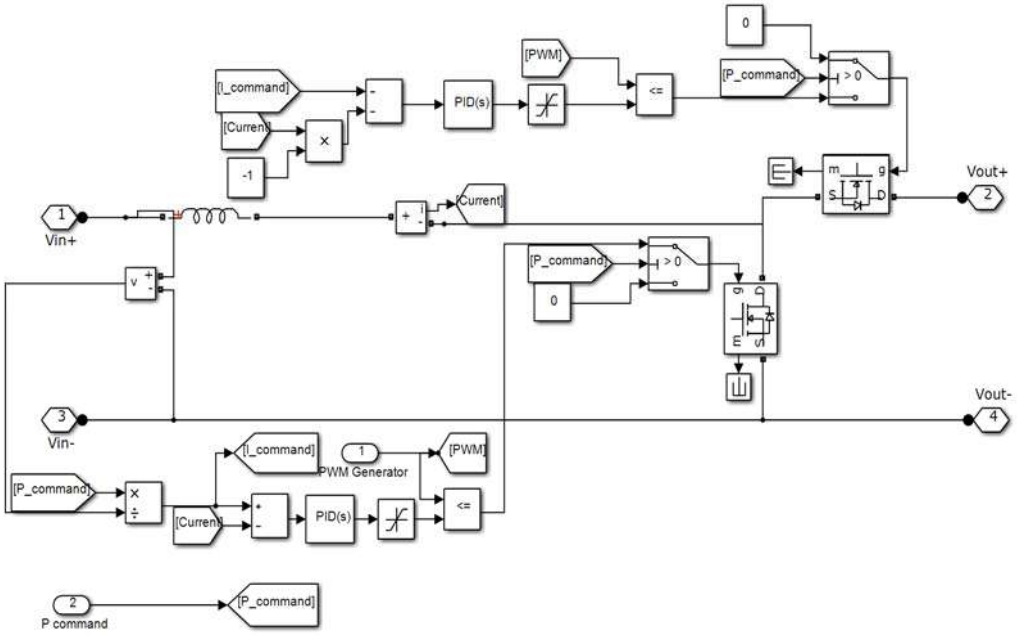


Figure B.6 Simulation de convertisseur buck/ boost

Paramètre de la batterie	
Tension nominale	26.4 V
Resistance interne	0.04 Ω
La charge totale	30.7239 V
Capacité de la batterie	5.9687 Ah
Capacité	6.6 Ah

Paramètre de supercondensateur	
Rated capacitance	500 F
Resistance équivalent série	2.1 e-3 Ω
Tension	17 V
Tension initiale	16 V
Courant	5.2 e-3 A
Numéro de condensateur en série	6
Numéro de condensateur en parallèle	1
Température de fonctionnement	25 C°

Paramètre de Boost	
L'inductance	L=444µH
Rch	24.3Ω
Cin	78.6µF
Cout	154.69µF

Paramètre de PID	
Proportional (p)	1.5
Integral (I)	1
Derivative (D)	0
Filter coefficient (N)	100

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Mohamed ANSOUMANE CAMARA « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs » Docteur de l'Université Paris Est Créteil 2011.

[2] Foudil ZOUACHE « Etude de la concentration solaire sur les performances des systemes Photovoltaïque ». Magistère en Electronique. Université de Mentouri Constantine 2009.

[3] (2010) http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw.

[4] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT pour des application photovoltaique : étude compartive.," Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Departement d'éléctronique TS4/6338, 2007.

[5][7] Djarallah, Mohamed, "contribution a l'etude des systemes photovoltaiques residentiels couples au reseau electrique," universite de batna thèse de doctorat en science, 2008.

[6] S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotéchnique 2010.

[8] Omar BOUKLI-HACEN Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique ». Magister en automatique. Université de Tlemcen 2011.

[9][10] [14] F.boujema, « commande par mode Glissant, applications aux convertisseurs Electriques», Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.

[11][15] A. Ricaud. Photopiles solaires. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes. 1997.

[12][13] Abdelhalim BORNI -étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire-. Magister en électrotehnique. Universitè de Constantine 2009.

[16] [17] « Le stockage de l'électricité : les batteries », Héléne ROUAULT, Didier BLOCH, Clefs CEA n°44, 2000.

[18] http://pl.legoff.free.fr/

[19][20] « The role and utilization of pseudocapacitance for enrgy storage by

[21] D.Vandenberge, "Les supercapacités,"http://perso.club-internet.fr/phlegoff/supcap. htm, 1999.

[22] P. Azaïs, "Recherche des causes du vieillissement de supercondensateurs a electrolyte organique a base de carbones actives," thèse doctorat, Université d'Orléans, novembre 2003.

[23] S.J. Shanley, G. Dorval-Douville, J. Rozière, D.J.Jones, J.L. Pascal and F. Favier, "Manganese oxide nanocomposites as supercapacitor electrode materials: Preparation and electrochemical performances," ESSCAP'2OO4, Belfort, France.

[24] V. Herman, A. Schneuwly, R. Gallay,Montena components (Suisse), "High performance double-layer capacitor for power electronic applications," 2nd Boostcap meeting, mars 2001, Fribourg.

[25] Y. K. Zhou, G. Dorval-Douville, and F. Favier, "Fabrication of Birnessite-type Layered Manganese Oxide Films for Supercapacitors," ESSCAP'2OO4, Belfort, France.

[26] P.Guillemet, Y.Scudeller, T.Brousse, "Electro-thermal analysis of hybrid electrochemical Supercapacitors," ESSCAP'2OO4, Belfort, France.

[27] F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, "A physical based model of power electric doublelayer supercapacitors," IEEE-IAS'2000, Rome, Italie.

[28] Maxwell technology, "Representative Test Procedure for Customer Evaluations (APPLICATION NOTE)," www.Maxwell.com, Mars 2002.

[29]Maxwell technology, “Boostcap Ultracapacitor Module Operating Manual,” www.Maxwell.com, Janvier 2003.

[30] S. Buller, E. Karden, D. Kok, R.W. De Doncker, “Simulation of supercapacitors in highly dynamic applications,” ESV, 2001, Berlin, Germany.

[31][33][34][35] Andrew S. Golder. Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies. Thesis Master of Science in Electrical Engineering. October 2006.

[32] S. Issaadi, « Commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[36] Rachid Maouedj, Souad Bousalem et Boumediene Benyoucef. Etude des performances d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. Union des Professeurs de Physique et de Chimie. Université de Tlemcen – Faculté des Sciences. Département de Physique – Tlemcen 13000 – Algérie.

[37-57] N. Abouchabana, « Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[51][58][59] Hannes Knopf. Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master of Science in Electrical and Computer Engineering. Portland State University 1999.

[60] R. Gottschalg, M. Rommel, D.G. Ineld, and H. Ryssel, Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation, In 14th European Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Barcelona, Spain, 1997.

[61] Bard, A.J., et L.R. Faulkner. 1980. electrochemical methods: fundamentals and applications. John Wiley and Sons.

[62] Helmholtz, H. 1879. « Studien über electrische Grenzschichten ». Annalen der Physik 243 (7): 337–382.

[63] Gouy, M. 1910. « Sur la constitution de la charge electrique a la surface d'un electrolyte ». Chapman, D.L. 1913. « LI. A contribution to the theory of electrocapillarity ». The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 25 (148): 475–481.

[64]Belhachemi, Farid. 2001. « Modélisation et caractérisation des super-condensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance ». Lorraine: Institut National Polytechnique de Lorraine.

[65]Stern-Hamburg, H.O. 1924. « Zur Theorie Der Elektrolytischen Doppelschicht ». S. f. Electrochemie.

[66]Oldham, K.B. 2008. « A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface ». Journal of Electroanalytical Chemistry 613 (2): 131–138.

[67]Raju, Gorur G. 2003. Dielectrics in Electric Fields. CRC Press.

[68]Kotz, R., M. Hahn, et R. Gallay. 2006. « Temperature behavior and impedance fundamentals of supercapacitors ». Journal of power sources 154 (2): 550–555.

[69] Buller, S., E. Karden, D. Kok, et RW De Doncker. 2002. « Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy ». Industry Applications, IEEE Transactions on 38 (6): 1622–1626.

[70]Rafik, F., H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, et A. Berthon. 2007. « Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling ». Journal of power sources 165 (2): 928–934.

[71] Fannin, PC, SW Charles, D. Vincent, et AT Giannitsis. 2002. « Measurement of the highfrequency complex permittivity and conductivity of magnetic fluids ». Journal of magnetism and magnetic materials 252: 80–82.

[72] A. NAIMI ; A. ZAOUI « Etude des techniques MPPT pour les sources photovoltaïques. Application à une cascade source photovoltaïque onduleur multiniveaux » Mémoire de Magistère Université YAHIA FARES De Médéa.2011.

[73] Alain Ricaud,‹‹ Gisement Solaire››, Livre , 2éme Edition, année 1980.

[74]Collection Technologies Alimentations à découpage Convertisseurs à résonance JP FERRIEUX et F FOREST MASSON.

[75] : B. E. Conway, Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.

[76] : R. Kötz et M. Carlen, “Principles and applications of electrochemical capacitors,” *Electrochimica Acta,* vol. 45, n° 15-16, 3 mai 2000, pp. 2483-2498.

[77] : M. Endo, T. Takeda, Y. J. Kim, K. Koshiba et K. Ishii, “High power electric double layer capacitor (EDLC's); from operating principle to pore size control in advanced activated carbons.,” Carbon Science, vol. 1, n° 3-4, 2001, pp. 117-128.

[78] : NEC TOKIN Corp., SuperCapacitor, http://www.nec-tokin.com/english/product/ supercapacitor/outline01.html.

[79] : ELNA, 2003, The company information of ELNA Co., http://www. elna- america. com/company.htm.

[80] : R. Kötz, S. Müller, M. Bärtschi, B. Schnyder, P. Dietrich, F. N. Büchi, A. Tsukada, G. G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia1, P. Barrade, V. Hermann et R. Gallay, “Supercapacitors for peak-power demand in fuel-cell-driven cars,” *ECS Proceedings,* vol. PV 2001-21, pp. 564, “The Electrochemical Society, Inc., Pennington”, NJ (2003).