

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Mémoire de fin de Cycle

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Filière : Energies renouvelables

Thème :

Gestion de stockage hybride (batterie/super condensateur) dans un système photovoltaïque

Réalisé par :

✚ M^{elle} AYAD Lydia

✚ M^{elle} AKROUNE Leticia

Encadré par :

Mme REKIOUA Djamilia

Co-encadré par :

Melle BELAID Saloua

Année Universitaire : 2021-2022

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Mémoire de fin de Cycle

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Filière : Energies renouvelables

Thème :

Gestion de stockage hybride (batterie/super condensateur) dans un système photovoltaïque

Réalisé par :

✚ M^{lle} AYAD Lydia

✚ M^{lle} AKROUNE Leticia

Encadré par :

Mme REKIOUA Djamilia

Co-encadré par :

Melle BELAID Saloua

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciements

Avant tout, on remercie Dieu le tout puissant de nous avoir aidé et donné la volonté et la force de pouvoir finaliser ce travail.

Nous tenant à remercier à notre encadreur professeur Rekioua Djamila, pour son encadrement et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos remerciements notre à notre Co-encadreur, Melle :la doctoranteBelaïd Saloua pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a voulu nous consacrer.

On tient également à remercier, tous les membres du jury.

Sans oublier nos parents leurs encouragements et leur soutien, sans eux nous nous n'arriverons pas là où nous sommes.

 *-Lydia & Líticia-*

Dédicaces

Je dédie ce Mémoire

A mon cher papa et ma chère maman,

*Qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de prier à mon
égard.*

*A ma chère et unique sœur Melissa, à mes chères
tantes et à toute ma famille*

 *-Lydia-*

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste d'abréviation et Symboles

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale..... 1

ChapitreI: Généralités sur les systèmes photovoltaïques..... 3

Introduction 4

I.1 Généralités sur l'énergie photovoltaïque..... 4

I.1.1. La cellule photovoltaïque 5

I.1.2. Groupement des cellules photovoltaïque..... 5

A. Association Série 5

B. Association parallèle 6

C. Association série et parallèle 7

I.2. Les différents systèmes photovoltaïques..... 7

I.2.1. Les trois types des systèmes PV 7

I.2.1.1. Systèmes photovoltaïques autonomes 7

I.2.1.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau 8

I.2.1.3. Système photovoltaïques hybrides 8

I.3. Définition de stockage d'énergie (le stockage hybride)..... 9

I.3.1. Éléments de stockage..... 9

I.3.1.1. Batterie 9

I.3.1.2. Les différents types de batteries 10

I.3.1.3. Les caractéristiques d'une batterie 11

A. Tension nominale 11

B. Capacité de stockage 11

C. Courant maximal 12

D. Profondeur de décharge (PDD) 12

E. Température..... 12

F. Durée de vie..... 12

G. Courant de court-circuit..... 13

Sommaire

H. Résistance interne.....	13
I.3.1.4. Montage de batterie	13
I.3.1.5. Précautions d'utilisations des batteries.....	14
I.4. Supercondensateur	14
I.4.1. Structure et principe de fonctionnement d'un supercondensateur.....	15
I.4.2. Les avantages et les inconvénients d'un supercondensateur	17
I.4.3. Comparaison entre la batterie et le supercondensateur.....	17
I.5. Convertisseurs statiques	18
I.5.1. Onduleur (convertisseur DC/AC).....	18
I.5.2. Hacheur (convertisseur DC/DC).....	18
I.5.2.1. Hacheur série (convertisseur Buck)	19
I.5.2.2. Hacheur parallèle (convertisseur Boost)	19
I.5.2.3. Convertisseur Buck-Boost.....	19
Conclusion.....	20
Chapitre II: Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie / supercondensateur).....	21
Introduction	22
II.1. Schéma du système étudié	22
II.2. Dimensionnement des panneaux et caractéristiques	23
II.2.1. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon le besoin journalier	25
II.2.2. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon la puissance	25
II.2.3. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon la surface :	26
II.3. Dimensionnement de stockage.....	27
II.4. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque.....	27
II.4.1. Modèle a une diode.....	28
II.4.2. Influence de l'éclairement et la température	30
II.4.3. Influence de l'éclairement	31
II.4.4. Validation des caractéristiques électriques des modules PV	32
II.4.5. Les effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires.....	33
II.4.5.1. Les différents types d'ombrages.....	34
II.4.5.1.1. Ombrage temporaire	34
II.4.5.1.2. Ombrage proche	34
II.4.5.1.3. Ombrage lointain	34
II.4.5.1.4. Auto-ombrage	34

Sommaire

II.4.5.1.5. Ombrage direct.....	34
II.5. Le dispositif de stockage.....	37
II.5.1. Le modèle électrique de la batterie	38
II.5.2. Modélisation du supercondensateur	39
II.5.3. Modèle constructeur RC	39
II.5.4. Modélisation du hacheurboost	40
II.5.5. Modélisation de l'onduleur.....	41
II.5.6. Organigramme de fonctionnement de la commande MMPT 'P&O'	41
Conclusion.....	44
Chapitre III: Etude d'un système photovoltaïque autonome avec stockage.....	45
Introduction	46
III.1. Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque avec stockage par batterie	46
III.2. Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque avec stockage par supercondensateur	47
III.3. Simulation et interprétation des résultats	49
Conclusion.....	54
Chapitre IV: Simulation du système étudié PV ave stockage.....	55
Introduction	56
IV.1. Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque avec stockage par batterie et supercondensateur	56
IV.2. Stratégies de commande des unités de stockage	59
IV.3. Stratégie de control de l'association batteries et supercondensateur	61
IV.3.1. Les différents modes possibles	62
IV.3.2. Résultats de simulation et interprétations d'un profil réel pour une journée d'été..	63
IV.3.3. Résultats de simulation avec un profil de variation d'ensoleillement et de température	67
Conclusion.....	69
Conclusion Générale	70

Liste bibliographie

Annexes

Liste d'abréviation et Symboles

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

AC : Courant alternatif

AC : Courant alternatif

B_j: Le besoin journalier.

Bus DC : Bus à courant continu

DC : Courant continu

DC et CC : Courant continu

DC/DC : Convertisseur tension continu/continu.

EDC et SOC : Etat de charge

EDC_{max} ,SOC_{max} : Etat de charge maximale [90%]

EDC_{min} ,SOC_{min} : Etat de charge minimale [30%]

E_j : L'énergie solaire journalière.

ENT : Nombre entier

ER : Energie renouvelable

E_{sréf}: La puissance de l'éclairement dans les conditions STC.

GPV : Le générateur photovoltaïque

I_{batt} : Courant de la batterie [**A**]

I_{od} : Courant de saturation de la diode (A).

I_s : Courant de sortie

I_{sc} : Courant de supercondensateur [**A**]

J_{aut} : Nombre de jour d'autonomie.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

Liste d'abréviation et Symboles

MPPT : Maximum power point tracking (Recherche du maximum de puissance)

n : Nombre de cellules

TNOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire.

Ns : Nombre total des cellules connectées en série et/ou en parallèle.

P&O : Perturbation et observation : Commande de perturbation et observation

Pc : La puissance crête d'un module

PDD : Profondeur de décharge

PI : Proportionnel intégral.

PV : Photovoltaïque.

Rp : Résistance parallèle

Rs : Résistance série

Sc : La surface de captage.

SC : Super Condensateur.

STC : Conditions standards de fonctionnement.

Stoit : Surface du toit.

Ta : Température ambiante

Tj : Température de jonction.

Uco : La tension à vide

Ueff : Tension efficace

Vdc : Tension recommandée du bus continu [V]

Vpv : Tension fournie par le générateur photovoltaïque [A].

Ipv: Courant fournie par le générateur photovoltaïque [A].

Voc : Tension en circuit ouvert [V].

Liste d'abréviation et Symboles

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale [V].

p_{ch} : Puissance de charge [W].

C_{batt} : Capacité de la batterie [Ah]

$C_{batt.u}$: Capacité de la batterie unitaire [Ah]

$ESTC$: L'ensoleillement dans les conditions standards [W/m²]

E_s : L'ensoleillement [W/m²].

I_{cc} : Courant de court-circuit [A]

I_{mpp} : Courant maximal [A]

N_{batt} : Nombre de batterie

N_{pv} : Nombre de panneaux PV

P_{batt} : Puissance de la batterie [W]

P_{pv} : Puissance Photovoltaïque [W]

S_{pv} : La surface du panneau photovoltaïque [m²]

S_{PV-uni} : Surface du panneau PV unitaire [m²]

T_{STC} : Température dans les conditions standards [°C]

U_{batt} : Tension de la batterie [V]

n : Nombre de cellules

η_{batt} : Rendement de la batterie [%]

Liste des tableaux

Tableau II.1: Besoin journalier d'une maison	24
Tableau II.2: Fiche technique du module photovoltaïque	24
Tableau II.3: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier	25
Tableau II.4: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la puissance	26
Tableau II.5: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la surface	26
Tableau II.6: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la surface	26

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Le déplacement des électrons dans une cellule photovoltaïque	5
Figure I.2 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques..	6
Figure I.3 : Connexion des modules photovoltaïques en parallèle.....	6
Figure I.4 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (np+ ns) cellules identiques.....	7
Figure I.5 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	8
Figure I.6 :Batterie plomb acide	10
Figure I.7 :Batterie lithium-ion.....	10
Figure I.8 :Batterie gel.....	11
Figure I.9 :Batterie AGM	11
Figure I.10 :Profondeur de décharge en fonction de la capacité et nombre de cycle	12
Figure I.11 : Montage en série et en parallèle	13
Figure I.12 : Montage parallèle-série	14
Figure I.13 :Supercondensateur	15
Figure I.14 : Schéma d'un supercondensateur Figure I.15 : Charbon actif	15
Figure I.16 : Structure d'un supercondensateur.....	16
Figure I.17 : Convertisseur DC/AC (Onduleur).....	18
Figure I.18 : Circuit électrique du hacheur Buck-Boost.....	19
Figure II.1 : Schéma du système étudié.....	23
Figure II.2 : Plaque signalétique de panneau photovoltaïque.....	25
Figure II.3 : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode	28
Figure II.4 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions STC.....	30
Figure II.5 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures	31
Figure II.6 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différents ensoleillements	32
Figure II.7 : Comparaison du résultat pratique et de simulation	33
Figure II.8 : Test avec du sable 75% ,50% et 20% d'ombrage	35
Figure II.9 : Effetde l'ombrage avec du sable sur le courant PV	35
Figure II.10 : Effetde l'ombrage avec du sable sur la puissance PV	36
Figure II.11 : Test d'ombrage avec des feuilles d'arbre	36
Figure II.12 : Effet de l'ombrage avec feuilles d'arbre sur le coutant et la puissance PV ...	37
Figure II.13 :Modèle R-C de la batterie	38
Figure II.14 : Courant de modèle constructeur RC	40

Liste des figures

Figure II.15 : Hacheur boost.....	41
Figure II.16 : Organigramme de l’algorithme P&O	43
Figure III.1 : Schéma d’une chaine de conversion avec stockage par batterie.....	46
Figure III.2 : Convertisseur connecté à une batterie.....	47
Figure III.3 :Chaine de régulation du bus continu.....	47
Figure III.4 : Schéma d’une chaine de conversion avec stockage par supercondensateur ..	48
Figure III.5 :Convertisseur connecté à un supercondensateur.....	48
Figure III.6 :Chaine de régulation du bus continu.....	49
Figure III.7 : Profil de l’ensoleillement avec variations d'ensoleillement et de température par paliers	49
Figure III.8 : Profil de température avec variations d'ensoleillement et de température par paliers	50
Figure III.9 : La tension de la batterie et supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers.....	50
Figure III.10 : Etat de charge de la batterie et supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers.....	51
Figure III.11 : Allure des différentes puissances avec stockage par batterie avec variations d'ensoleillement et de température par paliers.....	51
Figure III.12 : Allure des différentes puissances avec stockage par supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers.....	51
Figure III.13 : Profil d’irradiation solaire mesuré le 02/06/2022.....	51
Figure III.14 : Profil Température mesuré le 02/06/2022	52
Figure III.15 : La tension de la batterie et supercondensateur.....	53
Figure III.16 :Etat de charge de la batterie et supercondensateur	53
Figure III.17 : Allure des différentes puissances avec stockage par batterie	53
Figure III.18 : Allure des différentes puissances avec stockage par supercondensateur.....	54
Figure IV.1 : Schéma d’une chaine de conversion avec stockage par batterie et supercondensateur	57
Figure IV.2 : Schéma d’un système de puissance avec bus continu	58
Figure IV.3 : Contrôle du système de stockage hybride avec bus continu.....	59
Figure IV.4 : L’état de chaque composant constituant le système hybride.....	60
Figure IV.5 : Scénario de fonctionnement du système hybride	61
Figure IV.6 : Organigramme du système de stockage hybride (batterie/super-condensateur)	62

Liste des figures

Figure IV.7 : Différents Scénarios de fonctionnement du système hybride.....	63
Figure IV.8 : Profil de la température pendant une journée d'été	64
Figure IV.9 : Profil d'irradiation solaire mesuré le 02/06/2022.....	64
Figure IV.10 : La tension au niveau du Bus-continu.....	64
Figure IV.11 : La tension de la batterie et supercondensateur	65
Figure IV.12 : Allure des EDC	65
Figure IV.13 : Allure de courant I_{bat}	66
Figure IV.14 : Allure de courant I_{sc}	66
Figure IV.15 : Allure des puissances P_{pv} , P_{ch} , P_{sc} et P_{bat}	67
Figure IV.16 : Allure des EDC	68
Figure IV.17 : Tensions aux bornes du supercondensateur et des batteries	68
Figure IV.18 : Allure des puissances P_{pv} , P_{ch} , P_{sc} et P_{bat}	69

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive des stocks de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [21].

Cependant, nous assistons au développement et exploitation des énergies renouvelables qui sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées d'une manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le même lieu où elles sont produites). Ces dernières années sont comme une forte croissance en particulier l'énergie solaire qui est celle qui possède les énergies spécifiques les plus élevées et qui représente un potentiel considérable qui peut être exploité grâce à différentes technologies, la quantité d'énergie solaire qui arrive de la terre durant une journée est dix fois plus grande que celle consommée [22].

Par ailleurs, il reste encore quelque progrès à faire dans le domaine de la production de l'énergie photovoltaïque puisque l'électricité provenant de l'énergie photovoltaïque est intermittente et dépendante fortement des conditions météorologiques (ensoleillement, température). Le générateur photovoltaïque est généralement couplé à un système de stockage qui assure une disponibilité en continu d'énergie.

Notre travail consiste sur la gestion de stockage hybride (batterie et supercondensateur) dans un système photovoltaïque, nous allons exploiter l'énergie photovoltaïque pour alimenter une habitation. Pour cela nous intéressons dans ce travail à une gestion d'énergie pour le partage de puissance et contrôler le courant de batterie et le courant de supercondensateur dans le système de stockage d'énergie hybride.

Notre projet s'étale sur quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons rappeler des généralités sur l'énergie solaire et le système photovoltaïque et nous allons définir les différents composants de notre système.
- Pour le chapitre II, sera consacré sur le dimensionnement du champ photovoltaïque et le stockage par batteries, modéliser les différents composants de notre système étudié qui sont : le module photovoltaïque, la batterie et le supercondensateur de stockage, et les convertisseurs d'énergie, et simuler sous Matlab/Simulink la cellule photovoltaïque.

Introduction Générale

- Le troisième chapitre, sera consacré sur la présentation des résultats de simulation du système photovoltaïque avec stockage batterie et aussi avec le supercondensateur.
- Le dernier chapitre pour finir, nous présenterons l'algorithme de gestion et la simulation de notre système étudié avec stockage hybride composé de batteries et de supercondensateur, nous allons voir les résultats des interprétations d'un profil réel qui correspondent à une simulation de 24 h.

Enfin, on achèvera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

*Généralités sur les systèmes
photovoltaïques*

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable inépuisable, qui permet à partir du rayonnement solaire de produire de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques montées en série et/ou en parallèle [1] elle apparaît comme une source importante telle que la qualité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre durant une journée est dix fois plus grande que celle consommée.

L'utilisation de sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque) induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources (éclairage solaire variable...), dont le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie en un lieu donné sous une forme aisément utilisable pour permettre son utilisation ultérieure [2].

Dans ce chapitre, nous allons définir l'énergie photovoltaïque et le stockage hybride (batterie et supercondensateur).

I.1 Généralités sur l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou-bien artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque [3]. La cellule est composée de deux types de cristaux de silicium dits « dopés » une zone dopée « N » et l'autre dopée « P », le dopage permet de créer un déséquilibre entre les deux couches l'une sera en déficit l'autre en excédant.

Les électrons en excédant seront alors ramenés à circuler entre les deux couches pour trouver une place, lorsque les photons (l'énergie solaire) traversent la cellule, ils provoquent le déplacement d'électrons des deux couches N et P quittant alors leur zone respective. Cette agitation d'électrons est la définition même de l'électricité. L'addition des réactions de toutes les cellules du panneau solaire constituent donc l'électricité brute fournie par le panneau [4].

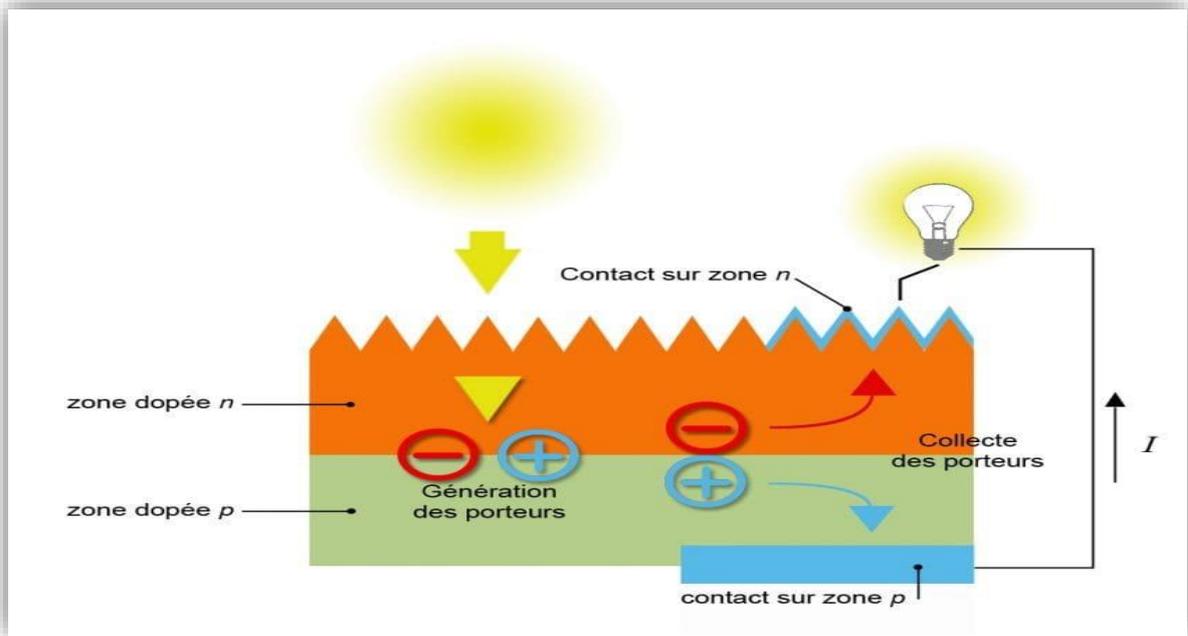


Figure I.1 : Le déplacement des électrons dans une cellule photovoltaïque

I.1.1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [5].

Les cellules photovoltaïques produisent un courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Son fonctionnement dépend des conditions d'ensoleillement et de la température. La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3Watts avec une tension de moins d'un volt [6].

I.1.2. Groupement des cellules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques peuvent être regroupées en série ou en parallèle, donc nous avons :

A. Association Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [7].

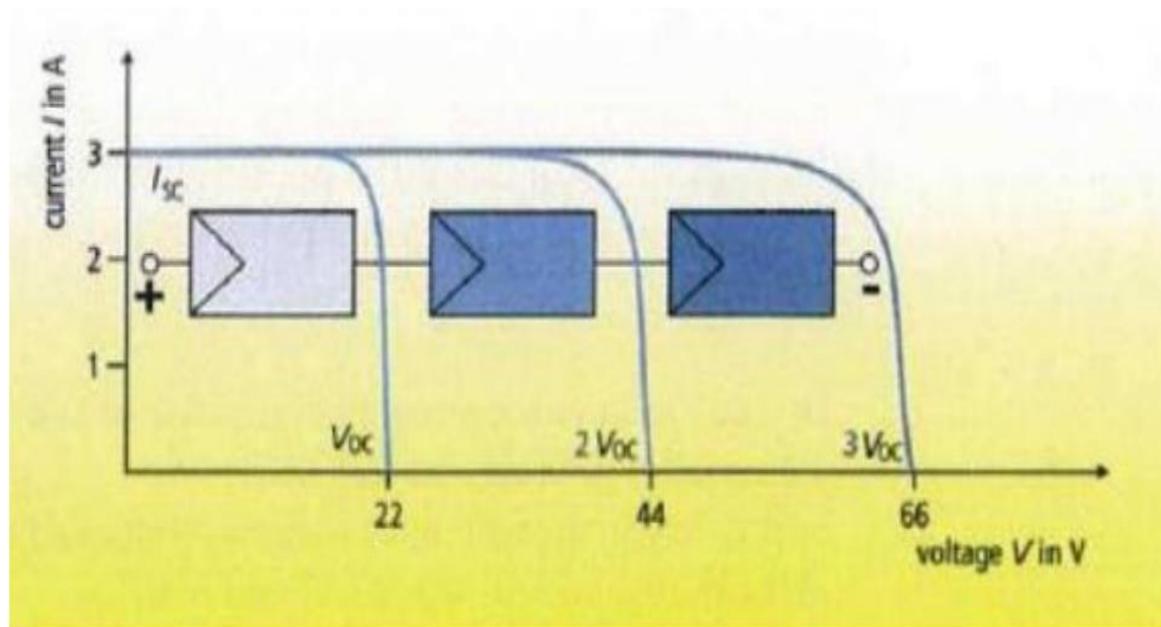


Figure I.2 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n s cellules identiques

B. Association parallèle

Le groupement en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellule montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale : $I_s = n \cdot I$,

Avec I : courant fourni par une cellule [8]

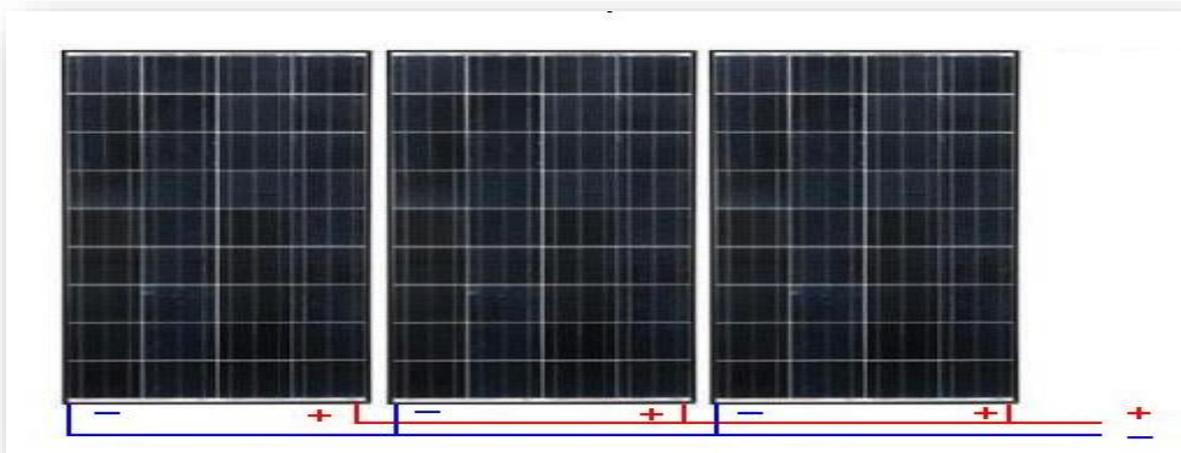


Figure I.3 : Connexion des modules photovoltaïques en parallèle

C. Association série et parallèle

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I.4). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [8].

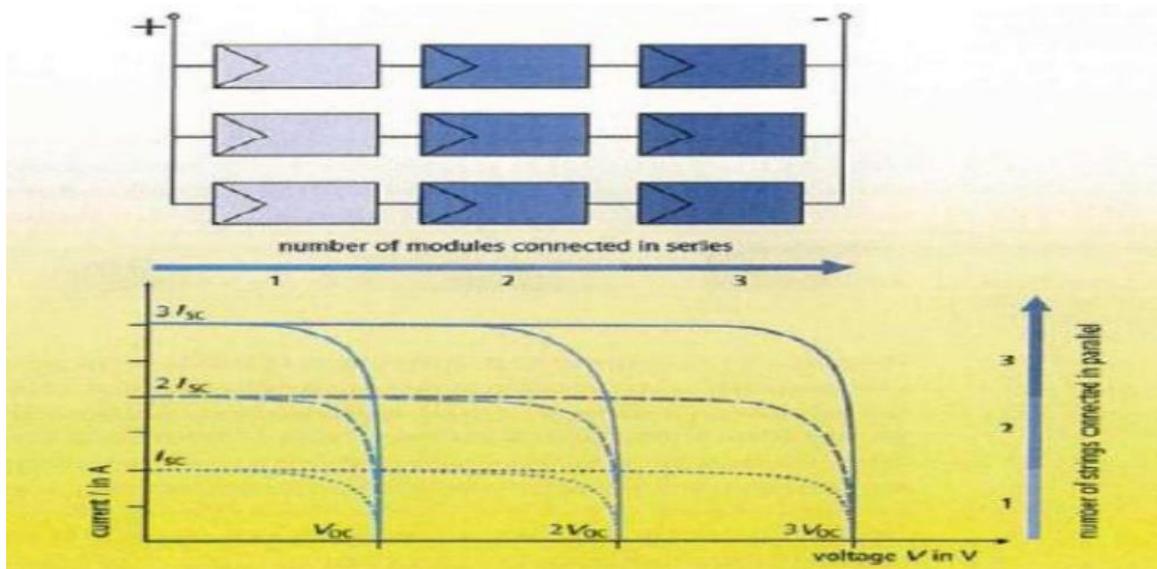


Figure I.4 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques.

I.2. Les différents systèmes photovoltaïques

I.2.1. Les trois types des systèmes PV

I.2.1.1. Systèmes photovoltaïques autonomes

Ce système est totalement indépendant d'autre source d'énergie et alimente l'utilisateur en électricité sans aucune interconnexion au réseau électrique. Généralement, un système autonome exigera des batteries de stockage d'énergie. Ce type de système sert habituellement à alimenter les consommateurs dans des sites isolés, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage d'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [9].

I.2.1.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu – courant alternatif (CC-AC). L'utilité des accumulateurs n'est pas nécessaire uniquement si on crée une forme autonome d'énergie en cas de panne ou indisponibilité d'énergie produite. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [9].

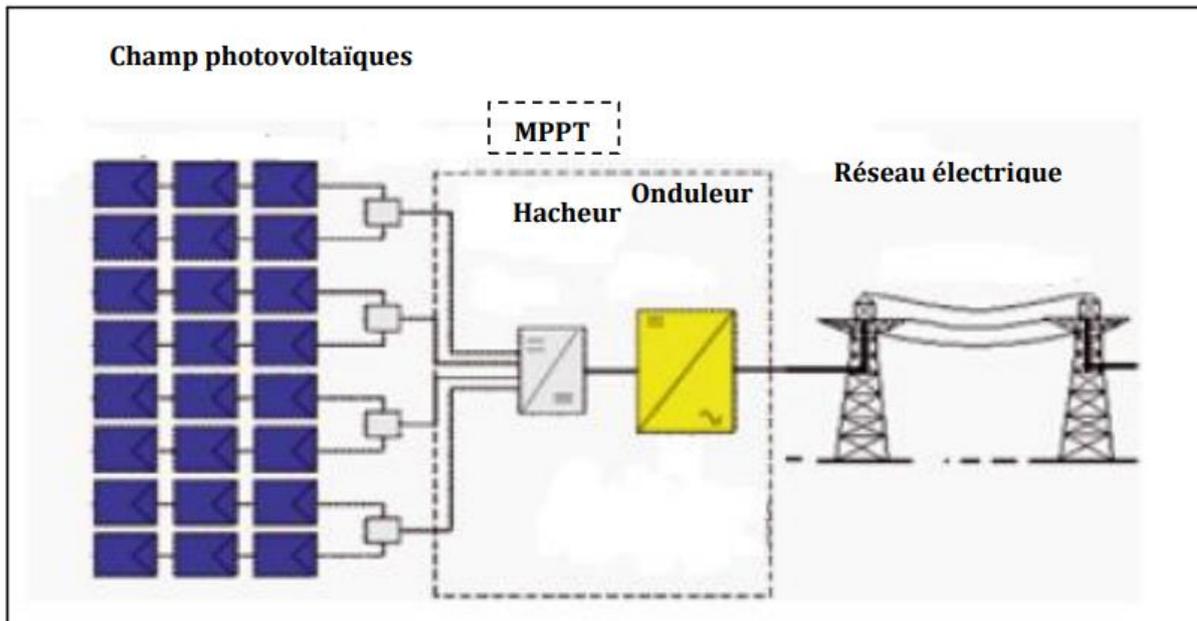


Figure I.5 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

I.2.1.3. Système photovoltaïques hybrides

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un autre générateur comme une éolienne, un groupe électrogène, ou un système hydroélectrique [10]. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des autres sources. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser.

Aujourd'hui des systèmes à grande échelle intègrent une gestion des systèmes photovoltaïques, on parle souvent de "smart-grid" c'est à dire des réseaux au sein desquels une régulation intelligente et coordonnée assure l'optimisation du flux d'énergie des différentes sources d'énergie [11].

I.3. Définition de stockage d'énergie (le stockage hybride)

On stocke facilement des ressources fossiles carbonisées (pétrole...), tandis que les énergies renouvelables (solaire, éolienne ...) leur stockage est un peu difficile et nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie (chimique, thermique, mécanique, etc...)

On stocke de l'énergie pour pouvoir l'utiliser plus tard, quand on aura besoin (assurer l'autonomie...), mais aussi quand on estimera qu'il est intéressant économiquement et écologiquement. Le stockage n'a pas de sens que dans la dualité réversible (stockage /déstockage) [12].

Ce stockage de l'énergie électrique est principalement réalisé par les accumulateurs électrochimiques (les batteries) qui permettent avec une assez bonne efficacité d'absorber et de restituer l'énergie accumulée. Cependant la durée de vie et la rapidité de recharge restant insuffisantes pour certaines applications, une association batterie/supercondensateur verra accroître les performances de l'unité de stockage et améliorer l'efficacité et la longévité de l'ensemble [13].

I.3.1. Éléments de stockage

Il existe différents types de stockage, le stockage hybride (batterie et supercondensateur), le stockage électrochimique, ...

Pour chaque élément de stockage, on rappellera brièvement le principe de fonctionnement avant de présenter ses caractéristiques remarquables.

I.3.1.1. Batterie

Une batterie ou un accumulateur électrochimique permet de stocker l'énergie électrique afin de la restituer par la suite (la nuit ou les journées nuageuses), en fonction des besoins. Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en désoxydation et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie [2].

I.3.1.2. Les différents types de batteries

Il existe différents types de batteries, on peut citer

- ✓ La batterie plomb acide : Est la plus utilisée et la plus vendue au monde, pour son faible coût et la maturité de cette technologie et aussi son aptitude à être recyclée à plus de 97% [14].



Figure I.6 : Batterie plomb acide

- ✓ La batterie lithium-ion : A une forte densité en énergie et elle est parfaite pour des applications cycliques. Elle permet des économies en volume et en poids allant jusqu'à 70% comparées à des batteries plomb acides traditionnelles, avec trois fois plus de cycles de charge (2000 cycles pleins) [15].



Figure I.7 : Batterie lithium-ion

- ✓ La batterie nickel cadmium : Elle est rarement utilisée du fait de leur toxicité et leur cout très élevé.
- ✓ La batterie gel : Dans la batterie gel, l'électrolyte est absorbé par un gel. Ce type de batterie ne nécessite aucun entretien et ne forme pas de gaz en utilisation normale. Elle

peut être installée n'importe où, et elle est idéale pour des batteries de service et pour des utilisations cycliques [15].



Figure I.8 : Batterie gel

✓ La batterie AGM : Ce type de batterie ne nécessite aucun entretien et ne dégage aucun gaz en utilisation normale. Etant donné qu'elle ne demande aucune ventilation, cette batterie peut être installée n'importe où. Leur conception permet une décharge rapide à de fortes intensités, la batterie AGM est donc idéale pour des systèmes nécessitant de fortes intensités (par exemple au démarrage d'un moteur) [15].



Figure I.9 : Batterie AGM

I.3.1.3. Les caractéristiques d'une batterie

A. Tension nominale

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée à la charge liée au nombre d'éléments n : $U = n \times 2,1$, si $n = 6 \Rightarrow U = 12,6$ V.

B. Capacité de stockage

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant qui s'exprime en Ah [20].

C. Courant maximal

I ou courant de crête (en A).

D. Profondeur de décharge (PDD)

C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie. En général, on choisit PDD = 25% pour 2 jours d'autonomie ou moins, PDD = 70% pour 4 jours d'autonomie, PDD = 80% pour plus de 8 jours d'autonomie [19].

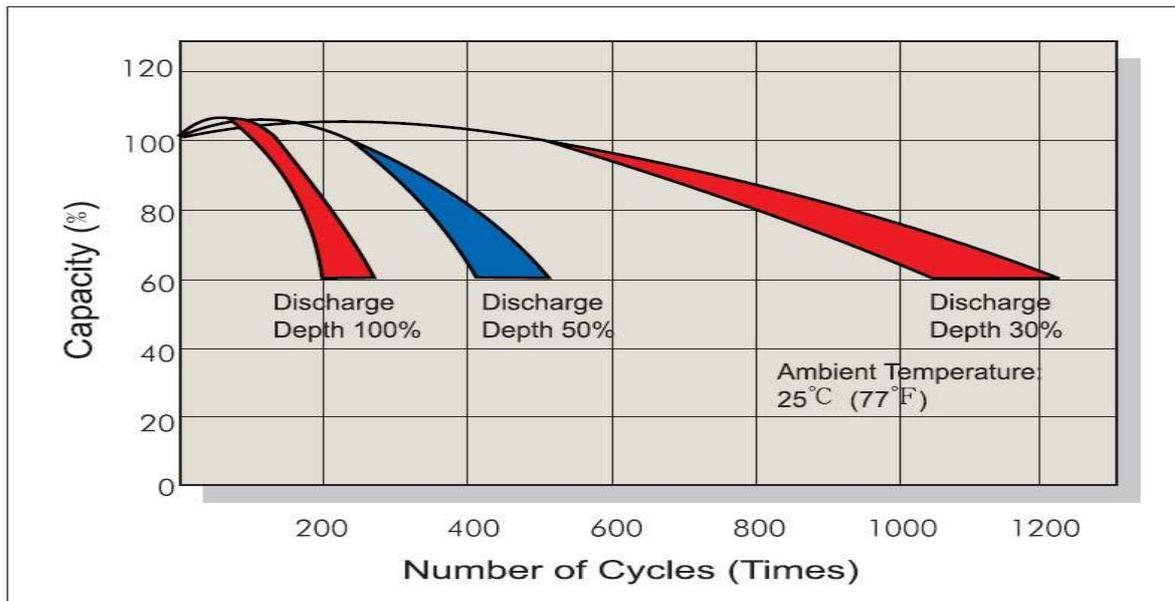


Figure I.10 : Profondeur de décharge en fonction de la capacité et nombre de cycle

E. Température

La batterie a un fonctionnement idéal à la température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie [19].

Température	0	10	15	20	25	Au-delà de 30°C
Capacité	80%	92%	95%	100%	103%	C% diminue

Tableau I.1 : La température d'une batterie

F. Durée de vie

La durée de vie des accumulateurs est directement liée à leurs conditions d'utilisation et essentiellement du nombre des cycles charge décharge.

La durée de vie des accumulateurs est estimée à 6 ou 7 ans, ceux-ci étant protégés contre la surcharge [19].

G. Courant de court-circuit

D'après la norme NF C 15-100, le courant de court-circuit d'une batterie est : $I_{cc} = 10 \times C_n$ ce qui donne pour une batterie 100Ah : $I_{cc} = 10 \times 100 = 1000 \text{ A}$ [19].

H. Résistance interne

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible.

Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible, l'intensité du courant débité est considérable, l'accumulateur mis ainsi en court-circuit est rapidement hors d'usage [19].

I.3.1.4. Montage de batterie

Lors de la mise en parallèle des batteries, il est recommandé de mettre un fusible en série avec chaque batterie, on peut ainsi facilement isoler et mesurer une batterie, le fusible est une protection de chaîne en cas de court-circuit [19].

- ✓ En série pour obtenir des tensions multiples de 12 Volts (24V, 48V).
- ✓ En parallèle pour augmenter la capacité.

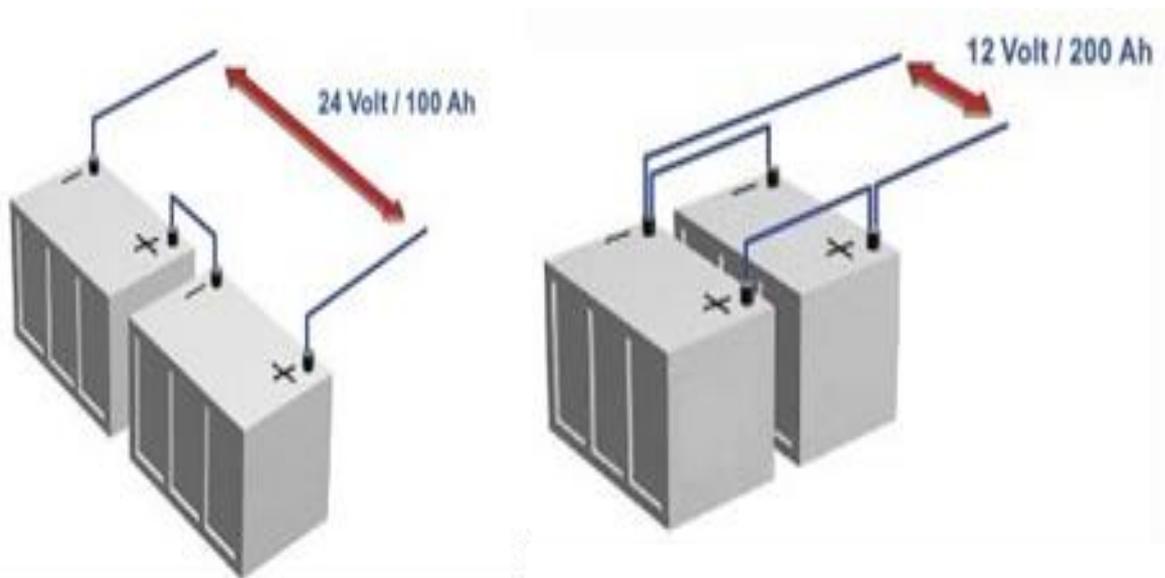


Figure I.11 : Montage en série et en parallèle

- ✓ Montage parallèle-série de quatre batteries pour obtenir 24V et 200Ah.

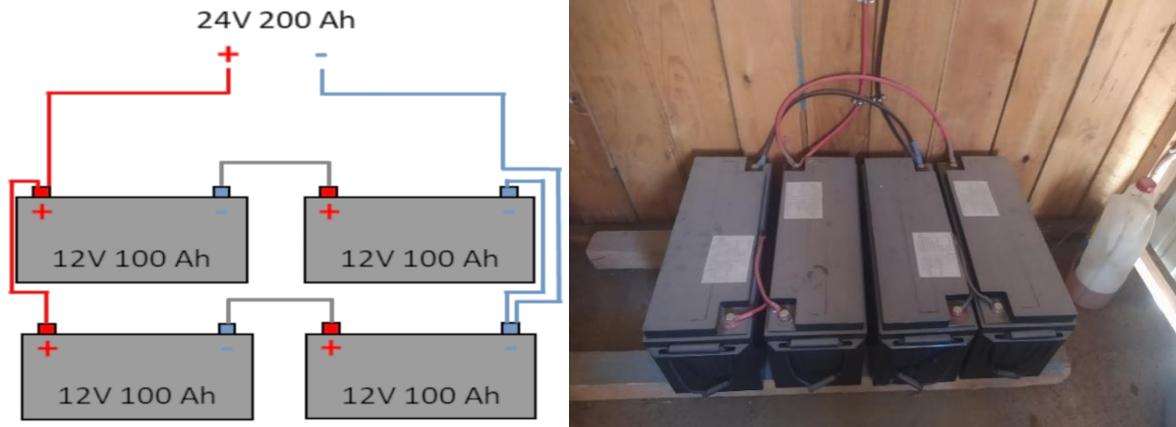


Figure I.12 : Montage parallèle-série

I.3.1.5. Précautions d'utilisations des batteries

- Une batterie ne doit jamais être stockée déchargée. Les batteries en état de décharge complète doivent être rechargées dans un délai maximum de 48 heures : au-delà, les dommages sont irréversibles.
- Il ne faut jamais court-circuiter une batterie, même brièvement. Non seulement ça l'endommage mais en plus la batterie risque dans certains cas d'exploser.
- Les deux causes principales de mortalité d'une batterie sont la décharge profonde et la surcharge [15].

I.4. Supercondensateur

Le supercondensateur stocke l'énergie sous forme électrostatique, il est connu pour sa capacité à stocker et délivrer un courant très élevé (forte puissance) grâce à sa très faible résistance série équivalente (quelques milli ohms), sa très faible densité d'énergie, et sa durée de vie qui est plus élevée à celle des batteries (plusieurs centaines de milliers de cycles) [13]. Ils sont utilisés pour fournir des pics de puissances demandées.



Figure I.13 : Supercondensateur

I.4.1. Structure et principe de fonctionnement d'un supercondensateur

Un supercondensateur est constitué de quatre éléments principaux : les collecteurs de courant, la matière active (charbon actif), l'électrolyte et le séparateur. Ces éléments sont assemblés pour former une cellule électrochimique complète et les collecteurs de courant sont reliés à un circuit électrique externe comme il est représenté à la figure (I.14) [16].

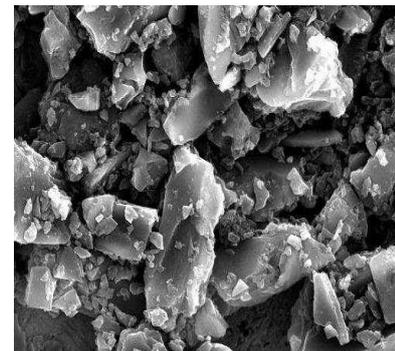
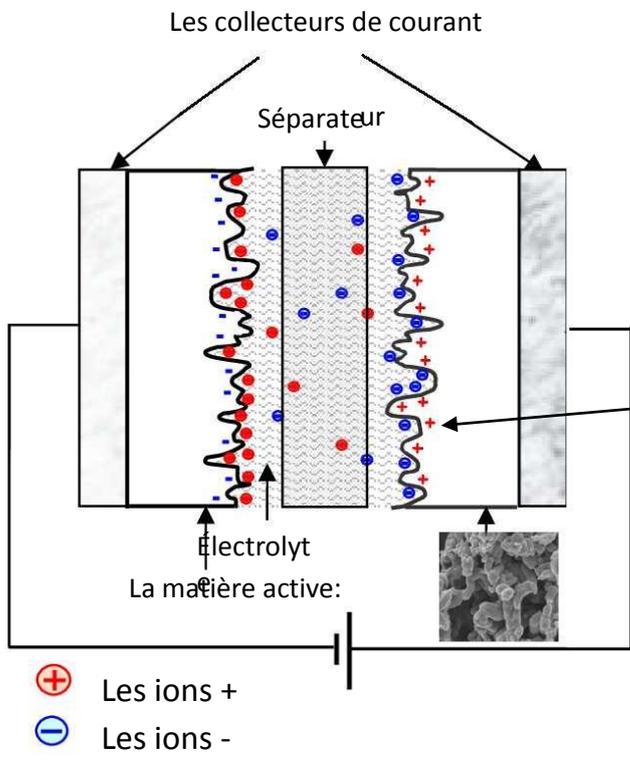


Figure I.14 : Schéma d'un supercondensateur

Figure I.15 : Charbon actif

- ✓ Les collecteurs de courant font le lien entre la matière active et le circuit électrique extérieur. Leur fonction est de collecter efficacement les charges développées au niveau de la matière active.
- ✓ L'électrolyte est une substance conductrice contenant des ions mobiles. Il peut s'agir d'un solvant contenant des ions dissous (électrolyte aqueux ou organique), ou d'un liquide ionique pur, sans solvant. Les liquides ioniques sont très onéreux.
- ✓ Le séparateur est utilisé pour éviter les courts-circuits dans le système en isolant électriquement les deux électrodes, mais ce séparateur doit tout de même laisser passer les ions de l'électrolyte.
- ✓ La matière active est le matériau poreux de l'électrode sur laquelle les ions sont adsorbés. C'est l'interface électrode / électrolyte qui est à la base du stockage de l'énergie dans les supercondensateurs [16].

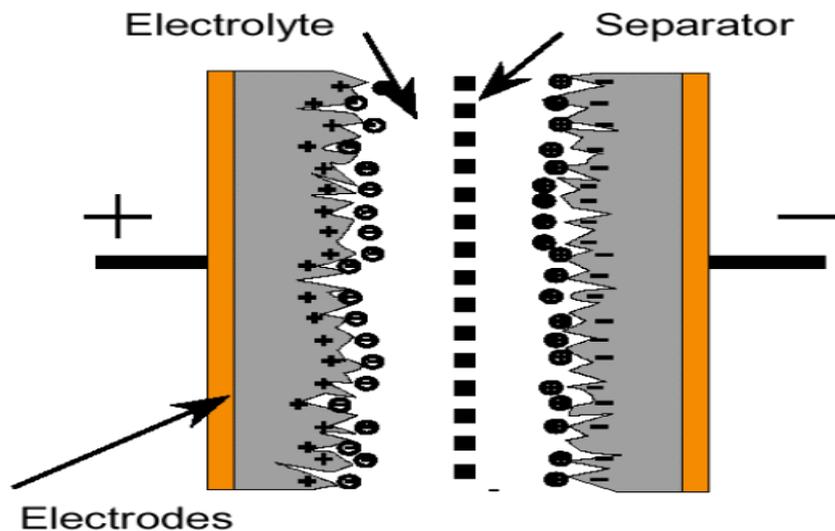


Figure I.16 : Structure d'un supercondensateur

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte qui est appelée une double couche électrique. Le stockage de l'énergie est principalement électrostatique car il n'y a pas de réaction électrochimique comme dans le cas des batteries [16].

I.4.2. Les avantages et les inconvénients d'un supercondensateur

- ✓ **Les avantages** [2]
 - Charge et décharge très rapide (un dynamique rapide).
 - Longue durée de vie ou nombre de cycles élevés par rapport aux accumulateurs.
 - Très haute densité de puissance.
 - Résiste à des températures extrêmes.
 - Résistance série très basse (quelques milli ohms).
- ✓ **Les inconvénients** [2]
 - Faible densité d'énergie.
 - Le coût élevé comparant à celui des batteries.
 - Technologie moins mûre que celle des batteries.

I.4.3. Comparaison entre la batterie et le supercondensateur

Les caractéristiques d'un supercondensateur et d'une batterie sont complètement différentes [2].

	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge	1s<t<30s	Entre 1 heure et 5 heures
Temps de décharge	1s<t<30s	Entre 0.3 heure et 3 heures
Rendement charge/décharge	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance [W/kg]	10⁴	<10³
Densité d'énergie [Wh/kg]	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10⁶	10³

Tableau I.2: Comparaison entre la batterie et le supercondensateur

Il est clair d'après ce tableau que le supercondensateur est un élément potentiel utilisable pour le stockage de l'énergie électrique pour fournir des pics de puissances sur une période très courte (pendant quelques secondes jusqu'à quelques dizaines de

secondes) vu sa rapidité de sa charge et sa décharge par rapport à la batterie. De plus, le supercondensateur est actuellement celui qui a le plus d'intérêt principalement dans le domaine des véhicules électriques pour la récupération d'énergie lors du freinage.

I.5. Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des appareils qui sont utilisés pour maximiser la production de puissance des sources d'alimentations et transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries en une tension alternative ou vice versa ou en une tension continue différente.

I.5.1. Onduleur (convertisseur DC/AC)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de convertir une tension et un courant continu en une tension et un courant alternatif. On distinguera donc toujours la partie continue notée CC (courant continu), en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée CA (courant alternatif), en aval de l'onduleur.

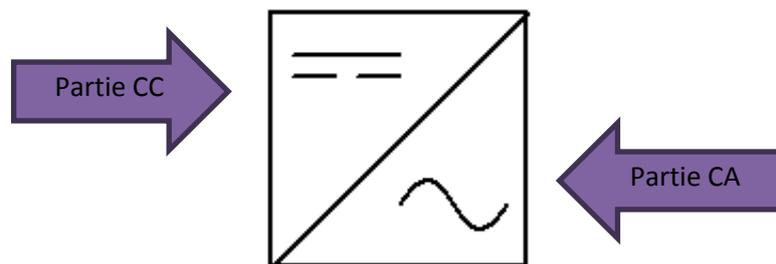


Figure I.17 : Convertisseur DC/AC (Onduleur)

- Partie CC : Côté CC, l'onduleur doit être adapté à la tension du système imposé par le parc de batterie. Les fabricants prévoient généralement des tensions d'entrée de 12 V, 24 V ou 48 V.
- Partie DC : Côté DC, l'onduleur imposera un signal de sortie adapté aux appareils qu'il alimente, par exemple (cas général) : Tension alternative de fréquence 50Hz et la valeur de la tension efficace : $U_{\text{eff}}=230$ V.

I.5.2. Hacheur (convertisseur DC/DC)

Les convertisseurs DC/DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, et les systèmes hybrides. Ces convertisseurs

servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée, et peuvent être de type abaisseur de tension « Buck », ou éleveurs de tension « Boost » ou abaisseur-éleveur "Buck-Boost [1].

I.5.2.1. Hacheur série (convertisseur Buck)

Un convertisseur « Buck » permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension.

I.5.2.2. Hacheur parallèle (convertisseur Boost)

Un convertisseur « Boost » permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est un éleveur de tension. Il est utilisé dans les systèmes PV dans le but de diminuer le nombre de cellules car ce dernier permet d'atteindre le niveau de tension souhaité.

I.5.2.3. Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur « Buck-Boost » est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

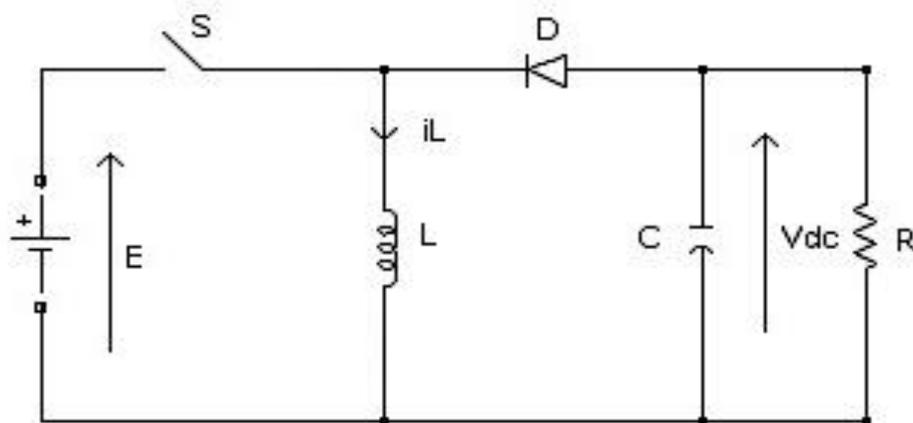


Figure I.18 : Circuit électrique du hacheur Buck-Boost

La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur (S) est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, tandis que, lorsque le commutateur (S) tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance (L) est renversée, l'énergie stockée et se transfère vers la charge (R) via la diode (D).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur la technique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique basant sur les cellules photovoltaïques, pour cela nous avons présenté les différents types de système photovoltaïque et le fonctionnement des éléments appartenant aux chaînes de conversion de ce système et y compris le stockage hybride (batterie et supercondensateur).

Pour un bon fonctionnement et exploitation de cette énergie nous avons introduit aussi à un système de gestion d'énergie, le dimensionnement et le fonctionnement des composants du système global doivent tenir compte des variations de la charge.

Dans ce but, nous étudions et modélisons la chaîne de conversion et le stockage ainsi l'évaluation et le contrôle de tout le système dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

*Modélisation et
dimensionnement du
système photovoltaïque
avec stockage hybride
(batterie /
supercondensateur)*

Introduction

Après avoir vu dans le premier chapitre quelques notions de base sur les systèmes hybrides en particulier le système hybride qui se compose d'un générateur photovoltaïque et un système de stockage batterie supercondensateur.

Dans ce chapitre nous allons étudier ce système en commençant par le dimensionnement qui nous permettra à connaître la taille du générateur ainsi le nombre de batterie à installer. Ensuite nous modélisons chaque composant du système PV et la régulation utilisée (MPPT) et le système du stockage (batterie /supercondensateur) cela nous permettra à mieux comprendre le principe de fonctionnement et le comportement des panneaux photovoltaïques en fonction de l'ensoleillement et de la température ambiante.

II.1. Schéma du système étudié

L'utilisation des éléments de stockage d'énergie électrique est indispensable dans nombreuses applications des systèmes autonomes. Notre installation se compose d'un système de stockage hybride (batterie et un supercondensateur) comme montre la figure (II.1). Le régulateur de charge assure :

- La protection de la batterie contre les charges excessives et les décharges trop profondes.
- L'optimisation du régime de charge de la batterie.
- Prolonge la durée de vie de la batterie.
- Surveille la température de la batterie.

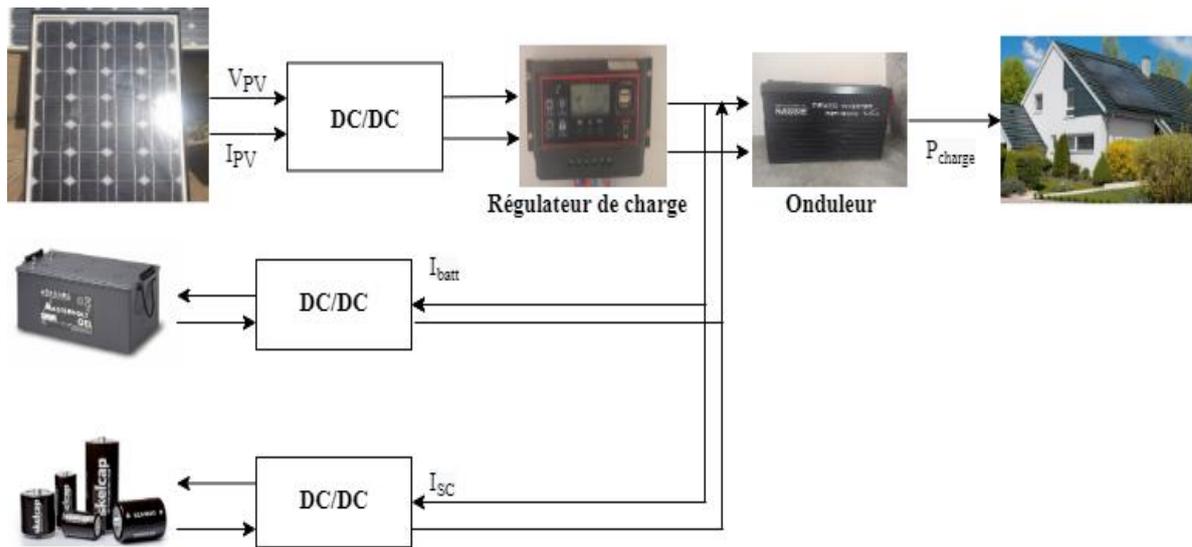


Figure II.1 : Schéma du système étudié

II.2. Dimensionnement des panneaux et caractéristiques

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement des panneaux photovoltaïques les plus appliquées et parmi, nous citons les trois les plus utilisées :

- Méthode du besoin journalier.
- Méthode des puissances.
- Méthode des surfaces.

L'installation photovoltaïque doit répondre au besoin de la maison en énergie durant la consommation quotidienne moyenne. Avant d'entamer le calcul de dimensionnement, nous devons d'abord établir le bilan énergétique pour déterminer le nombre de panneaux photovoltaïque et de batteries nécessaire pour alimenter ce foyer autonome.

Le tableau ci-dessous contient les différents appareils utilisés, ainsi leurs puissances unitaires et leurs durées d'utilisations.

Chapitre II Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie /supercondensateur)

Appareils	Nombre	Pu(W)	Durée(h/j)	E(Wh/j)
Lampe (3 W)	7	3	3	63
Machine à laver	1	60	1	60
Télévision	1	50	3	150
Pc Portable	1	65	3	195
Réfrigérateur	1	68	24	1632
Micro-onde	1	53	1	53
Chargeur téléphone	2	3	½	1.5
Somme				2154.5(Wh/j)

Tableau II.1: Besoin journalier d'une maison

Le tableau suivant et la figure (II.2) montre les caractéristiques du module photovoltaïque qu'on a choisi pour établir ces dimensionnements.

La puissance crête d'un module : $P_c= 80Wc$
La tension à vide : $U_{co}=21.6V$
Le courant de puissance maximale : $I_{mpp}=4.65A$
La tension de puissance maximale : $U_{mpp}=17.2V$
Le courant de court-circuit : $I_{cc}=5A$

Tableau II.2: Fiche technique du module photovoltaïque

Chapitre II Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie /supercondensateur)



Figure II.2 : Plaque signalétique de panneau photovoltaïque

II.2.1. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon le besoin journalier

Le tableau ci-dessous montre les lois de calculs de la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier. Avec :

P_c : La puissance crête., B_j : Le besoin journalier, E_j : L'énergie solaire journalière, $E_{sréf}$: La puissance de l'éclairage dans les conditions STC, S_{pv} : La surface du panneau.

$$E_s = 4 \text{ kWh/m}^2, E_{sréf} = 1000 \text{ W/m}^2, S_{pv} = 0.646 \text{ m}^2, \text{ Pertes} = 20\%$$

Besoin journalier	Energie photovoltaïque journalière	Nombre d'heures d'équivalentes	Energie photovoltaïque réelle	Nombre de panneaux	Nouvelle puissance estimée	Surface de captage
$B_j = \sum_{1}^n P_c h * \Delta t$	$E_{pv/j} = P_c * N_e$	$N_e = \frac{E_s}{E_{sréf}}$	$E_{pv/jr\acute{e}elle} = E_{pv/j} * (1 - 0.2)$	$N_{pv} = \frac{B_j}{E_{pv/jr\acute{e}elle}}$	$P_{nouv} = P_c * N_{PVnouv}$	$S_c = N_{pv} * S_{pv}$
2154.5(Wh/j)	320(Wh/j)	4 (h/j)	256(W)	8 panneaux	640(W)	5.17 (m ²)

Tableau II.3: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier

II.2.2. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon la puissance

Le tableau ci-dessous montre les lois de calculs de la méthode de dimensionnement selon la puissance.

Chapitre II Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie /supercondensateur)

η : Rendement., S_c : La surface de captage.

$$\eta = 12\%, S_c = 5.17 \text{ m}^2$$

Puissance crête estimée	Nombre provisoire de panneaux	Nouvelle puissance estimée
$P_{est} = E_s * S_c * \eta$	$N_{pv} = \frac{P_{est}}{P_c}$	$P_{nouv} = N_{pv,prov} * P_c$
620.4 (W _c)	7.8 ≈ 8 Panneaux	620.4 (W)

Tableau II.4: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la puissance

II.2.3. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon la surface :

Les tableaux ci-dessous illustrent les lois de calculs de la méthode de dimensionnement selon la surface.

$$S_{toit} = 5.172 \text{ m}^2 (l_T = 1.724 \text{ m}, L_T = 3 \text{ m}), S_{pv,u} = 0.646 \text{ m}^2 (L_{pv} = 1.21 \text{ m}, l_{pv} = 0.563 \text{ m}).$$

Avec: S_{toit} : Surface du toit; $S_{pv,uni}$: Surface unitaire du panneau.

N_{pv}	$P_{nouv} (W_c)$
$N_{pv} = S_{toit} / S_{pv,u}$	$P_{nouv} = N_{pv,prov} * P_c$
8 Panneaux	640 (W _c)

Tableau II.5: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la surface.

Selon la longueur			Selon la largeur		
N_{L1}	N_{L2}	$N_{p,max1}$	N_{I1}	N_{I2}	$N_{p,max2}$
$N_{L1} = \frac{\text{longdutoit}}{\text{longdupann}}$	$N_{L2} = \frac{\text{largdutoit}}{\text{largdupann}}$	$N_{pvmax} = N_{I1} * N_{I2}$	$N_{I1} = \frac{\text{longueurdutoit}}{\text{largeurdupann}}$	$N_{I2} = \frac{\text{largeurdutoit}}{\text{longueurdespan}}$	$N_{pvmax} = N_{I1} * N_{I2}$
3.06	2.47	7.58 ≈ 8 Panneaux	1.42	5.32	7.55 ≈ 8 Panneaux

Tableau II.6: Calcul de la taille du générateur photovoltaïque de la méthode de dimensionnement selon la surface.

Pour la première surface on prend le nombre de panneaux selon le sens de la longueur qui est de 8 panneaux, et on prend le même sens de la largeur concernant la seconde surface qui est aussi de 8 panneaux.

II.3. Dimensionnement de stockage

Le calcul de la capacité (C_{batt}) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit :

$$C_{batt} = \frac{B_j * J_{aut}}{U_{batt} * PDP * \eta_{batt}} = 200.48Ah \quad (II.1)$$

Avec :

J_{aut} : Nombre de jour d'autonomie.

U_{batt} : Tension de la batterie.

PDP : La profondeur de décharge profonde.

η_{batt} : Rendement de la batterie.

K_T : Coefficient de température de la capacité.

$$J_{aut}=3 \text{ jours}, U_{batt}=12 \text{ V}, PDP=0.7, \eta_{batt}=0.9$$

Le nombre de batteries utilisées se calcule selon la manière suivante :

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt.u}} = 2 \quad (II.2)$$

$C_{batt.u}$: Capacité unitaire de la batterie.

$C_{batt.u}=100Ah$.

Après dimensionnement et calculs, le système nécessite 8 panneaux de 80W_c d'une surface de 0.646 m² et de 2 batteries de (12V, 100Ah) pour une consommation de 2154.5(Wh/j).

II.4. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque

Les équations mathématiques qui sont développées pour la modélisation de la performance des générateurs PV sont basées sur les caractéristiques courant-tension et puissance. Comme on peut distinguer quelque modèle qui représente le comportement

d'une cellule photovoltaïque parmi ces modèles y a le modèle idéalisé, modèle à une diode et modèle à deux diodes, dans notre cas on s'intéresse au modèle à une diode [20].

II.4.1. Modèle a une diode

Le modèle à une diode, est un modèle qui prend en compte les chutes de tension dans la zone PN représentées par une résistance série R_s , quant au courant de fuite une résistance parallèle R_p le représente [11]. Le modèle est représenté par le schéma équivalent figure (II.3) :

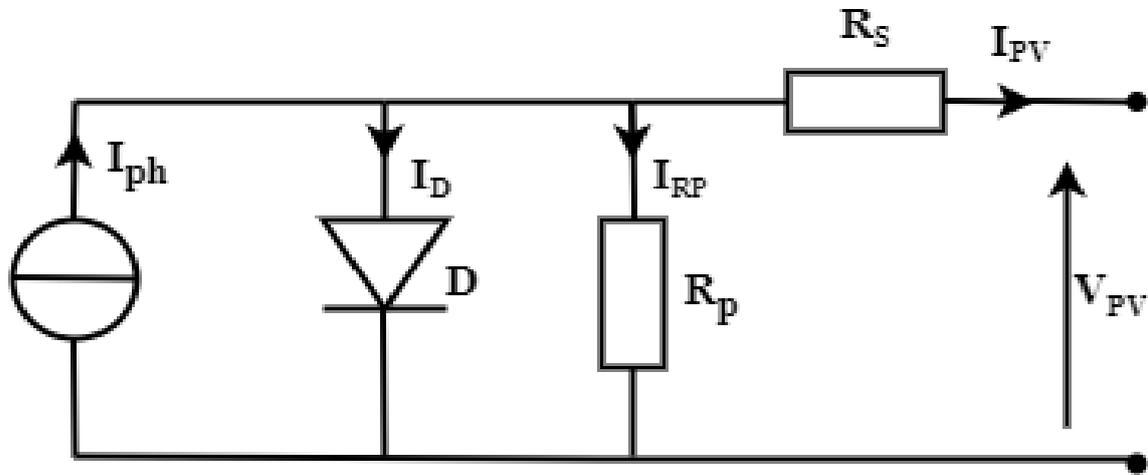


Figure II.3 : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode

A partir de la loi de Kirchhoff est le courant I_{PV} du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement nous a permet d'écrire la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rp} \quad (II.3)$$

$$I_{ph} = P_1 \times E_s \left(1 + p_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) \quad (II.3.1)$$

$$T_j = T_a + E_s \left[\frac{N_{oct} - 20}{800} \right] \quad (II.3.1.1)$$

$$I_D = I_{0d} \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{K.A.N_s.T_j} \right) \right] \quad (II.3.2)$$

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{K.T_j} \right] \quad (II.3.2.1)$$

$$I_{RP} = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.3.3})$$

L'équation (II.3) peut s'écrire aussi de cette manière :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s (1 + P_2 (E_s - E_{STC}) + P_3 (T_j - T_{STC})) - I_D = I_{0d} \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j} \right) \right] - I_{RP} \quad (\text{II.4})$$

Tel que :

T_j : température de jonction.

N_{OCT} : température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire.

T_a : température ambiante.

I_{0d} : courant de saturation de la diode (A).

A : coefficient d'idéalité de la cellule.

N_s : nombre total des cellules connectées en série et/ou en parallèle.

Les constructeurs des panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau (I_{sc} , I_{MPP} , V_{OC} , V_{MPP}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C , AM1.5). Pour valider ce modèle, nous l'avons simulé en utilisant le modèle mathématique déjà décrit et les paramètres du tableau (II.2) de caractéristique du panneau.

Caractéristiques du panneau $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$.

La figure (II.3) montre les courbes caractéristiques courant-tension et puissance – tension d'un panneau solaire dans les conditions standard

$$I_{pv}(V_{pv}) \text{ et } P_{pv}(V_{pv}) \text{ (} E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ et } T_{STC} = 25^\circ\text{C} \text{).}$$

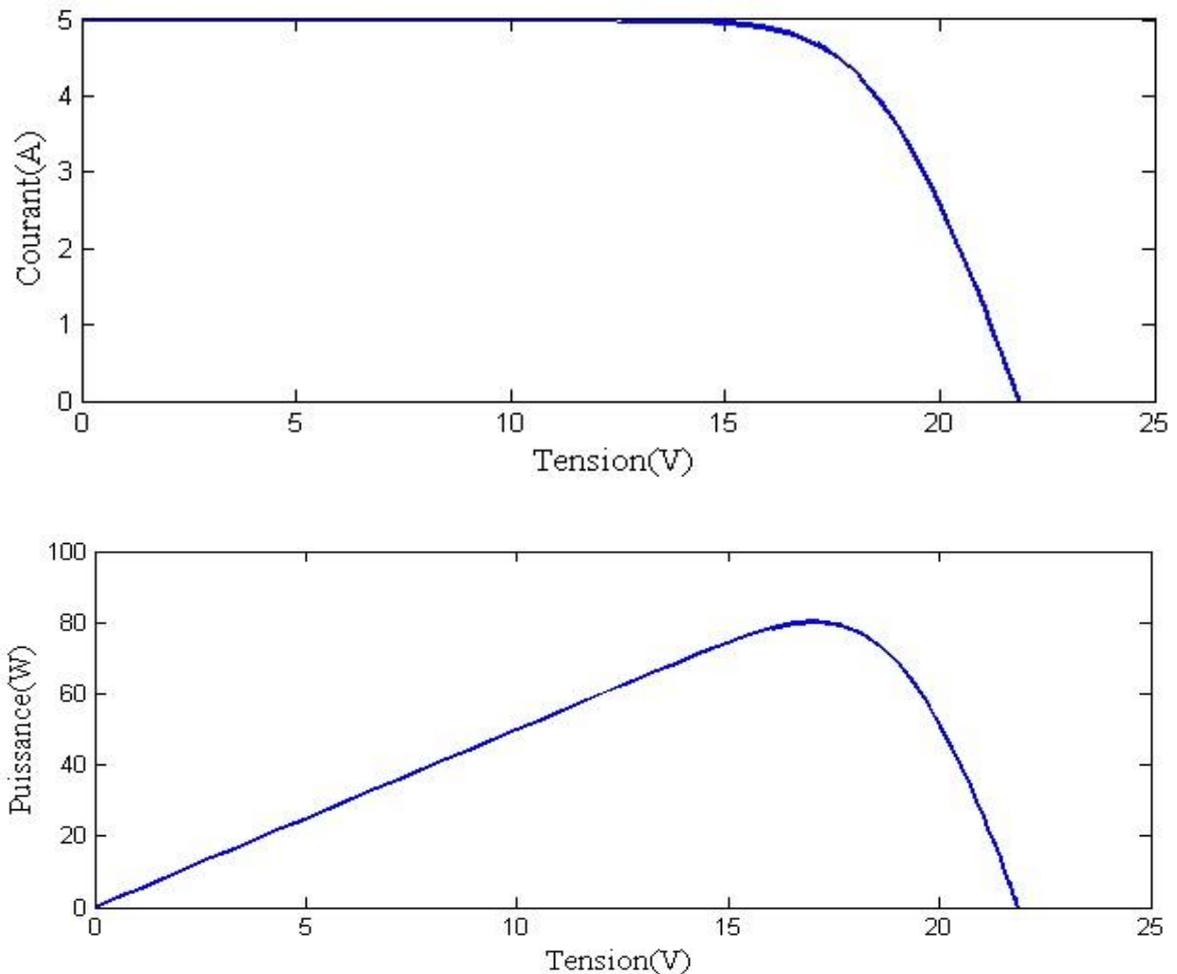


Figure II.3 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions STC

II.4.2. Influence de l'éclairement et la température

Nous avons effectué une simulation avec un éclairement constant de $(1000\text{W}/\text{m}^2)$ pour différentes températures, la figure (II.4) représente respectivement les caractéristiques courant/tension et puissance/tension, nous remarquons que l'effet de température sur le courant est négligeable comparé à la tension V_{CO} qui décroît, plus la température augmente plus la tension est très faible ainsi cette dernière a aussi un effet sur la puissance mais beaucoup plus sur la tension.

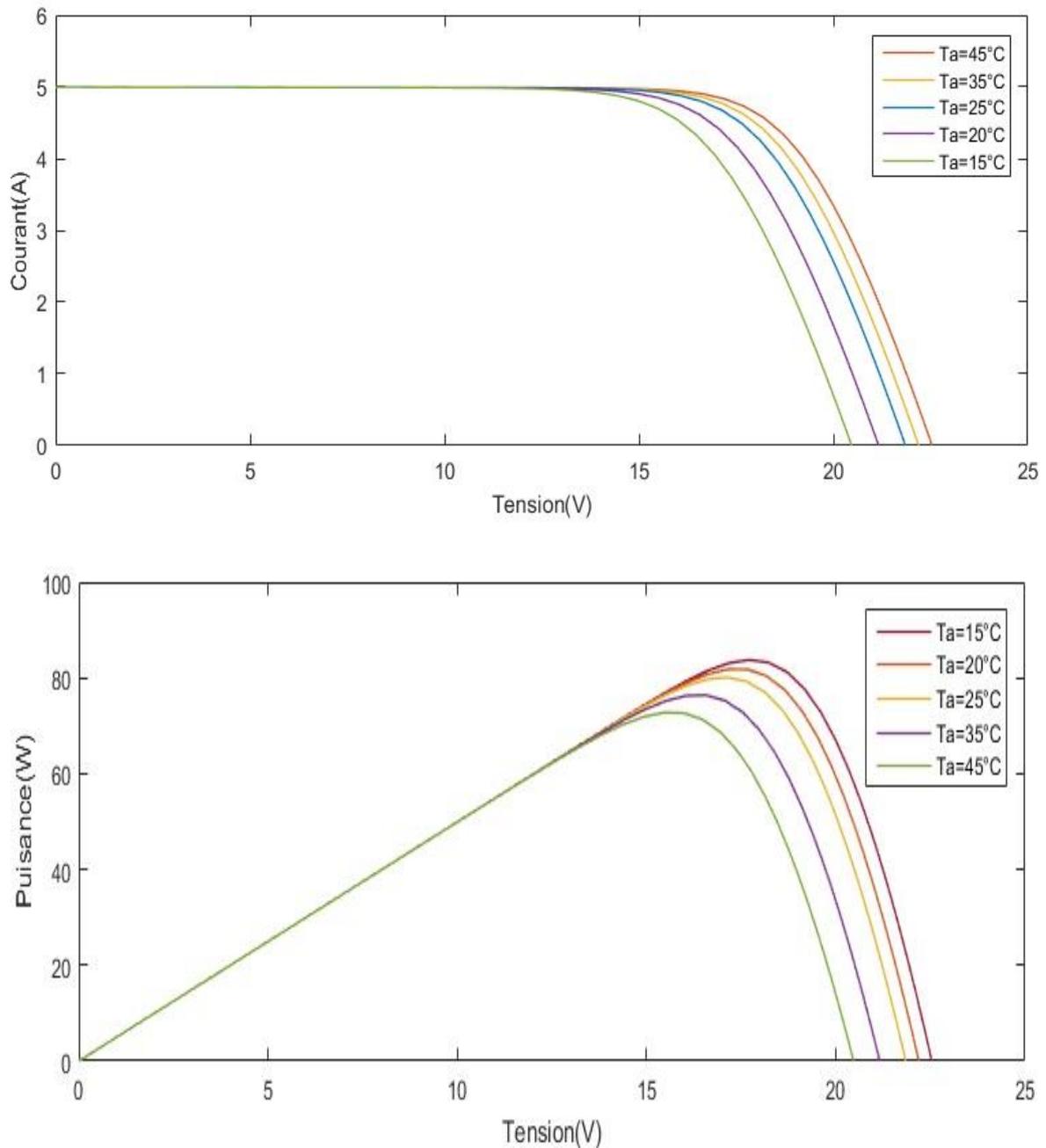


Figure II.4 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures

II.4.3. Influence de l'éclairement

La figure (II.5) représente les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes valeurs de l'ensoleillement entre 200W/m² et 1000W/m² et une température fixe de (25°C). Ce que nous constatons que l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit et un peu sur la tension de circuit ouvert, donc la variation de point de puissance maximale est proportionnelle à l'éclairement.

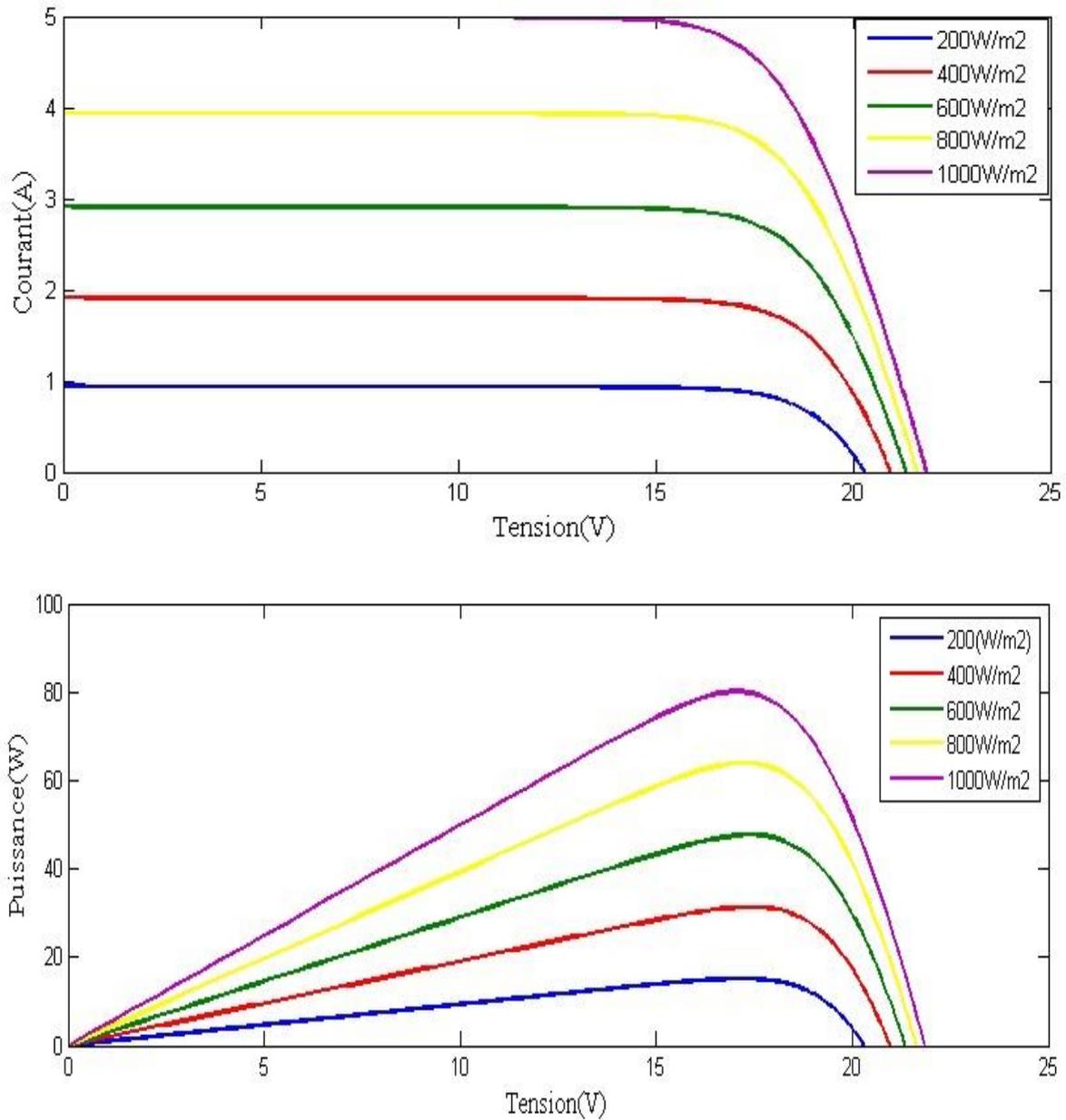


Figure II.5 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différents ensoleillements

II.4.4. Validation des caractéristiques électriques des modules PV

Un essai pratique nous a permis de déterminer les caractéristiques courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ et puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$ du module PV, en faisant varier une résistance de charge pour trois niveaux d'irradiations et de température. Les caractéristiques obtenues en expérimental sont comparées aux caractéristiques de simulation. La méthode Volt-Ampère-métrique est utilisée pour déterminer le modèle mathématique qui s'adapte au type du panneau utilisé.

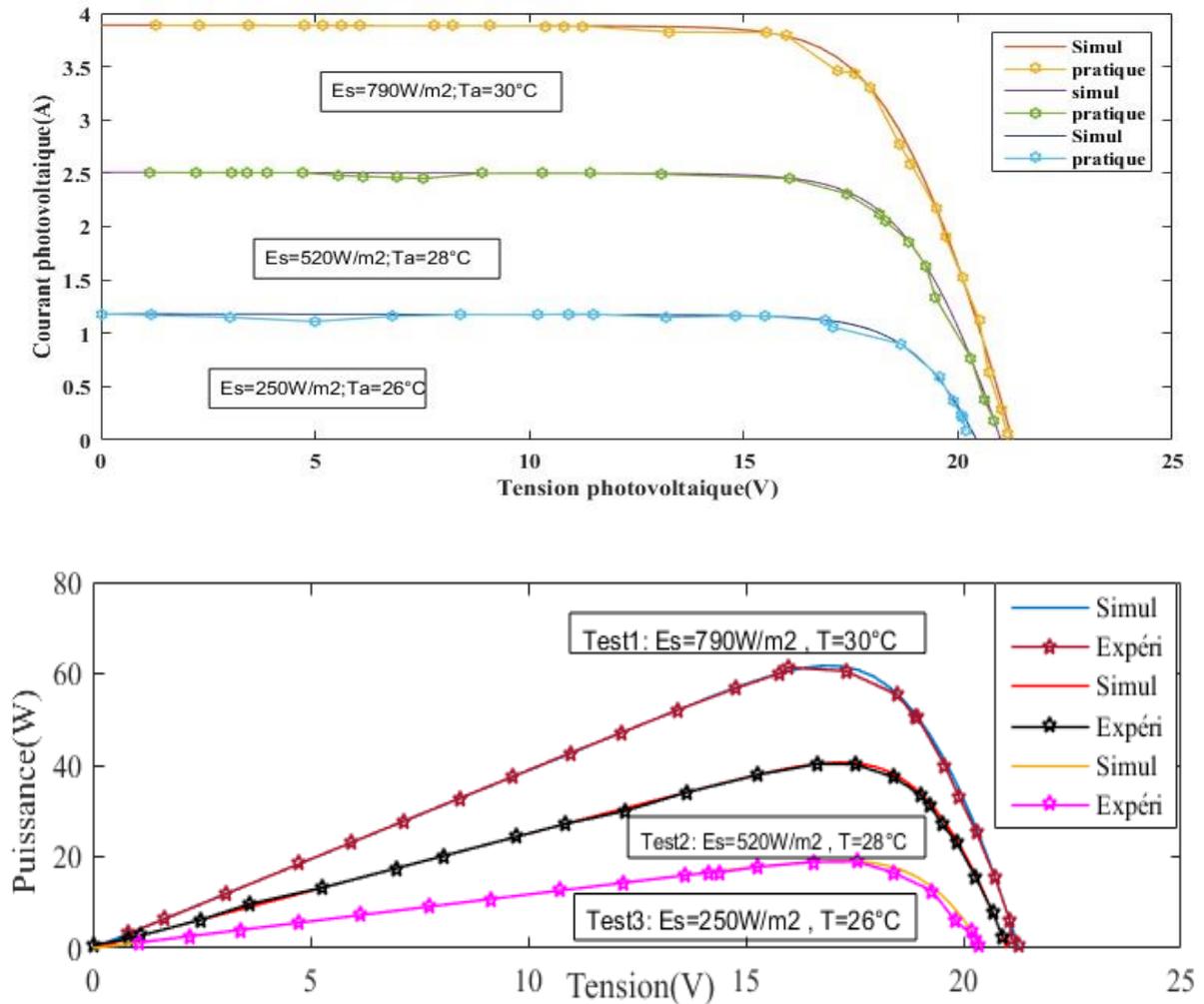


Figure II.6 : Comparaison du résultat pratique et de simulation

Remarque :

Nous remarquons que les courbes résultantes pendant la pratique sont presque les mêmes que les courbes de simulation, pour de différentes valeurs d'irradiations solaire et de températures.

II.4.5. Les effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires

Qu'est-ce que l'effet d'ombrage ?

Les panneaux solaires photovoltaïques sont très sensibles à l'ombre. Les conditions d'ombrage totales ou partielles ont un impact important sur la capacité de production d'énergie et peuvent entraîner des pertes. Les cellules d'un panneau solaire sont généralement connectées en série pour obtenir plus de puissance, et donc une production

convenable d'électricité. Mais lorsqu'un ombrage se produit, cette structure présente certaines limites.

L'énergie produite par une chaîne de cellules est déterminée par celle qui produit le moins. Lorsqu'une cellule est ombragée, l'ensemble de la série est impacté. Pour éviter les pertes d'énergie, l'installation comprend généralement des diodes de dérivation câblées en parallèle aux cellules solaires. Lorsqu'une cellule solaire est ombragée, la diode de dérivation permet de « contourner » une partie des cellules et les autres cellules peuvent ainsi générer de l'énergie à tension réduite [17].

II.4.5.1. Les différents types d'ombrages

II.4.5.1.1. Ombrage temporaire

L'ombrage temporaire résulte de nuages, de déjections d'oiseaux, de poussières ou de feuilles mortes [17].

II.4.5.1.2. Ombrage proche

Les ombres causés par les obstacles proches sont directes. Les cheminées, supports d'éclairage, antennes paraboliques, saillies de toit et de façade, structures de bâtiment décalées, superstructures de toit, pour ne citer que quelques exemples [17].

II.4.5.1.3. Ombrage lointain

L'ombrage lointain provient de l'environnement du bâtiment. Des montagnes, des arbres, des câbles passant au-dessus des bâtiments, des bâtiments voisins ou des bâtiments distants pourraient également être source d'ombre [17].

II.4.5.1.4. Auto-ombrage

Avec les systèmes de montage en tables, une rangée de modules peut entraîner un ombrage sur la rangée voisine. Dans ce cas de figure, il est nécessaire d'optimiser l'inclinaison et l'espacement entre les rangées de modules.

II.4.5.1.5. Ombrage direct

L'ombrage direct peut entraîner de grandes pertes d'énergie, car la proximité de l'objet provoquant l'ombre empêche le panneau solaire photovoltaïque de capter la lumière.

Nous avons fait différents tests expérimentaux avec différentes formes d'ombrages (feuilles d'arbre, sable), comme illustré dans les figures suivantes :

Chapitre II Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie /supercondensateur)

- Feuilles d'arbre pour simuler l'ombrage des arbres à proximité des panneaux PV.
- Sable pour simuler la pollution quotidienne



Figure II.7 : Test avec du sable 75% ,50% et 20% d'ombrage

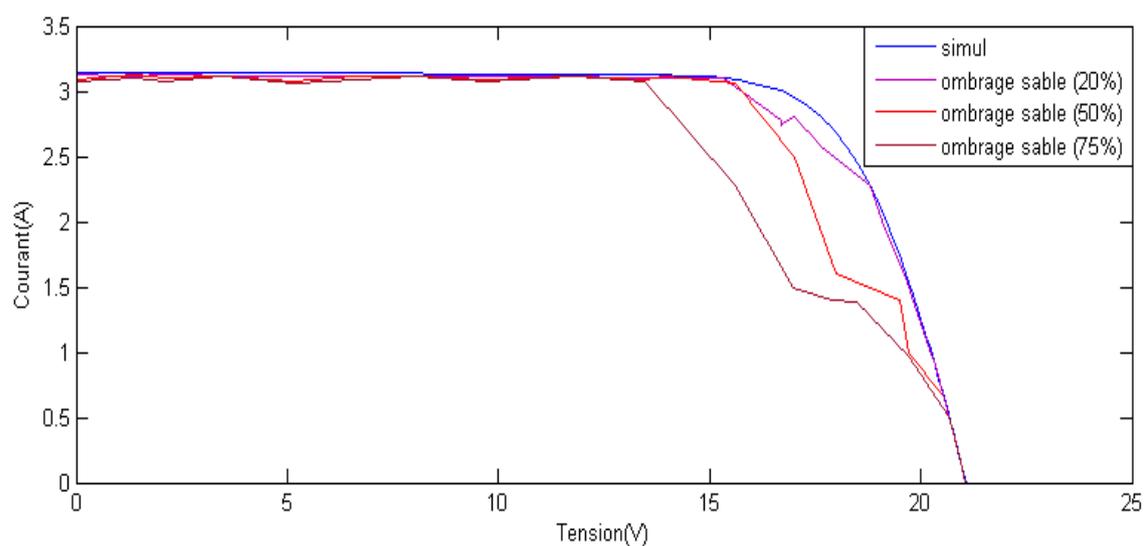


Figure II.8 : Effet de l'ombrage avec du sable sur le courant PV

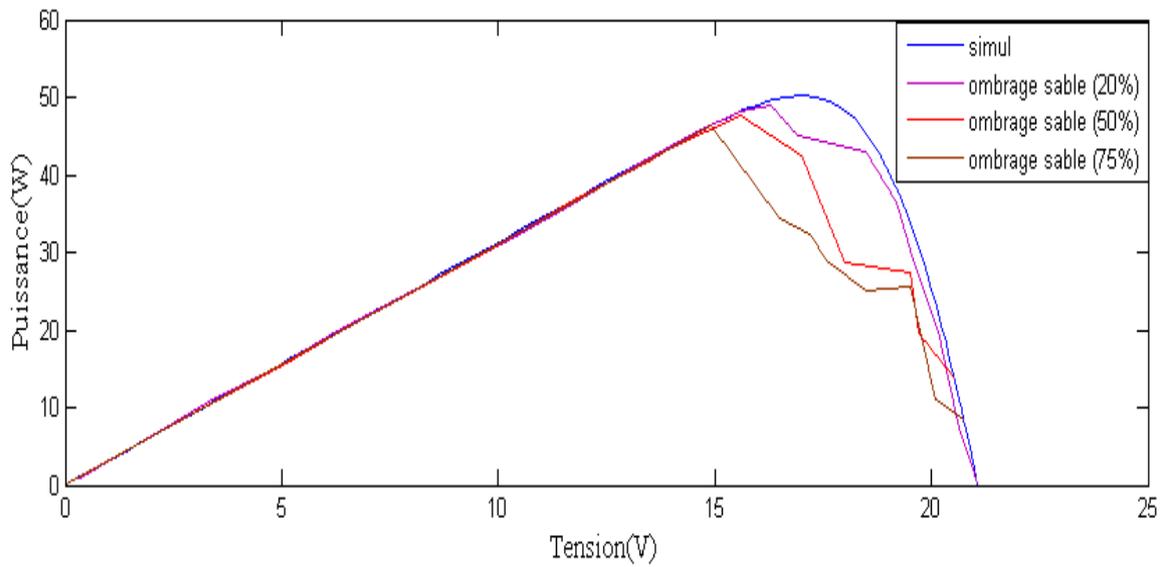


Figure II.9 : Effet de l'ombrage avec du sable sur la puissance PV



Figure II.10 : Test d'ombrage avec des feuilles d'arbre

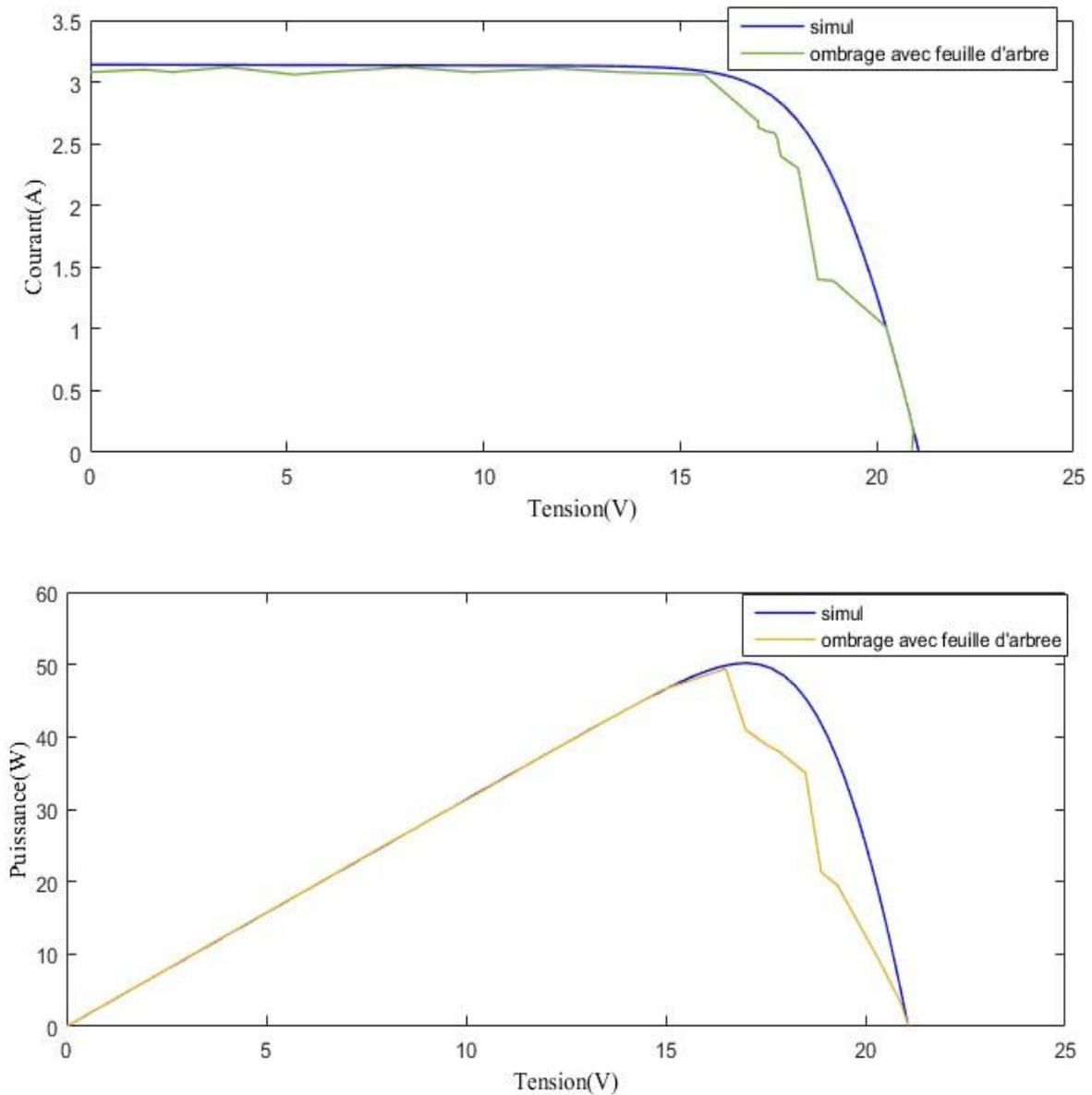


Figure II.11 : Effet de l'ombrage avec feuilles d'arbre sur le courant et la puissance PV

II.5. Le dispositif de stockage

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité nous utiliserons pour notre étude, le modèle R-C qui ne nécessite pas d'identification expérimentale de paramètre empirique nécessaire à l'emploi des autres modèles couramment utilisés.

II.5.1. Le modèle électrique de la batterie

Ce modèle comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{batt}) et une résistance interne

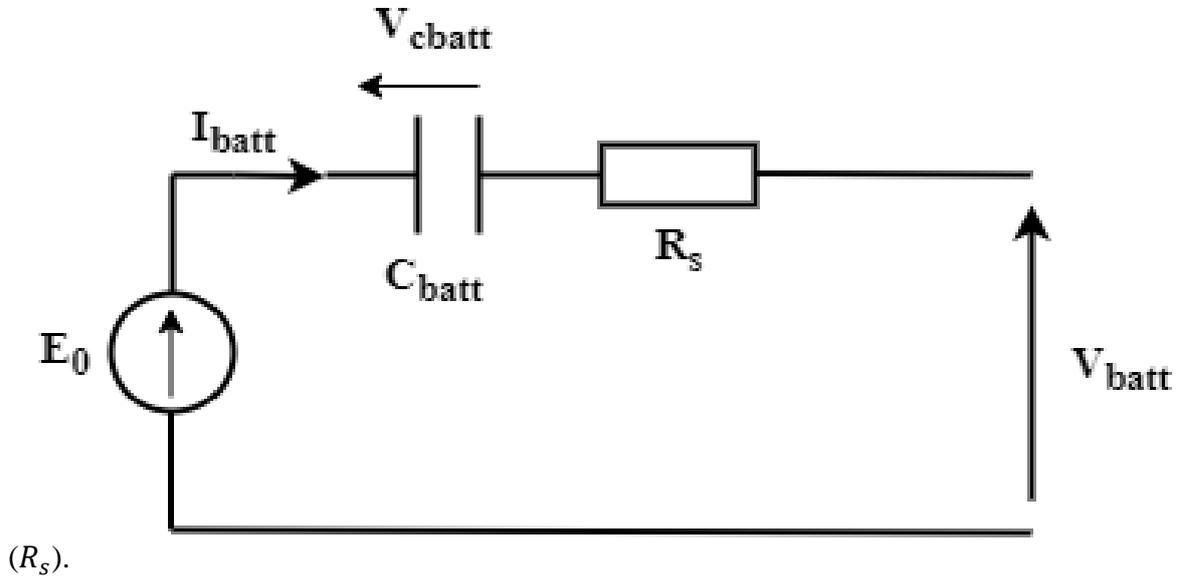


Figure II.12 : Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{batt} \tag{II.5}$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \tag{II.6}$$

C_{batt} : Capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : La quantité de charge manquante par rapport à C_{batt}

Q_{batt} : quantité de charge électrique en Coulomb.

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \tag{II.7}$$

II.5.2. Modélisation du supercondensateur

Face aux dynamiques lentes et aux risques d'usure prématurée des batteries, nous avons ajouté une unité de stockage au système, destinée à absorber ou fournir les pics de puissance.

II.5.3. Modèle constructeur RC

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

Dans ce modèle on ne tient compte ni de l'influence de la tension de charge sur la capacité du composant ni du phénomène de redistribution des charges internes dans le supercondensateur. La résistance série est déterminée à partir de la variation de la tension de la charge ou de décharge suite à une application d'un courant de charge/décharge constant.

$$R_s = \frac{U_{sc}}{I_{sc}} \quad (\text{II.8})$$

Dans ce type de modèle, l'évolution de la tension de décharge de la cellule suite à un courant constant a une représentation linéaire. Ainsi, le comportement du supercondensateur est assimilé à celui d'un condensateur classique (capacité constante en fonction de la tension). La capacité C est déterminé directement à partir de la caractéristique de réponse suite à une décharge à courant constant de la cellule figure (II.13) elle vaut :

$$C_{dc} = \frac{I_{sc}}{\frac{\Delta U_{sc}}{\Delta t_d}} \quad (\text{II.9})$$

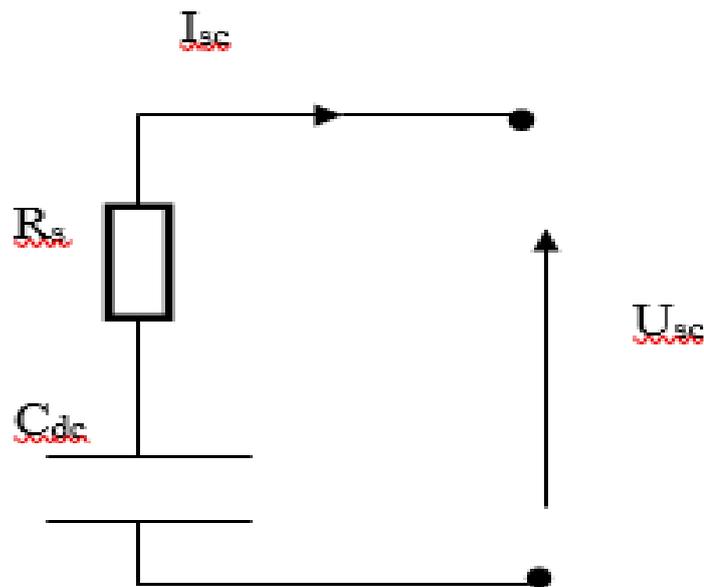


Figure II.13 : Courant de modèle constructeur RC

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

II.5.4. Modélisation du hacheur boost

Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu, il existe le hacheur Boost (élevateur) et Buck (abaisseur).

Le hacheur a pour but de protéger l'état de la sortie en tension dans le système photovoltaïque. En plus de réguler la tension de sortie, le convertisseur CC/CC fonctionne comme le suiveur (tracker) du point de puissance maximale (PPM). Vu que l'intensité du rayonnement change, le courant et la tension du générateur solaire fluctuent constamment et le PPM du GPV se déplace également. avec un suiveur PPM, la puissance de sortie du GPV est presque optimale. Le hacheur peut être utilisé comme régulateur de mode de commutation pour convertir une tension continue normalement non régulée en une sortie de tension continue régulée. Les équations caractérisant le fonctionnement du convertisseur DC/DC sont données comme suite :

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha E + V_{dc}(1 - \alpha) \quad (II.10)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (II.11)$$

Si $0 < \alpha < 0.5$ Le hacheur est abaisseur (Buck)

Si $\alpha \approx 0.5$ La tension d'entrée est égale à la tension de sortie.

Si $0.5 < \alpha < 1$ Le hacheur est un élévateur (Boost).

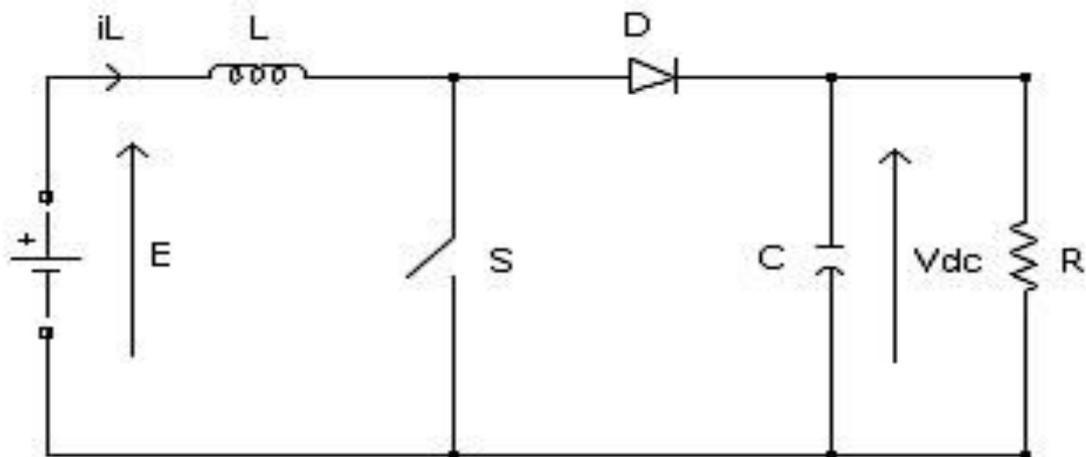


Figure II.14 : Hacheur boost

II.5.5. Modélisation de l'onduleur

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge. Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée. L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de la source hybride.

II.5.6. Organigramme de fonctionnement de la commande MMPT 'P&O'

Dans un système comprenant une source et une charge la recherche du point de fonctionnel optimal par des techniques d'optimisation est très importante. Dans les cas du photovoltaïque cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante entre autres il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal.

Chapitre II Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec stockage hybride (batterie /supercondensateur)

La méthode perturbation & observation (PO) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM: en mesurant les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte (évaluation), qui est dans notre cas: On mesure les caractéristiques (puissance et tension) des panneaux PV puis on induit une petite perturbation sur la tension afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte comme la tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction réciproquement si la puissance diminue la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé, on présente ci-dessous le diagramme de l'algorithme P&O [18].

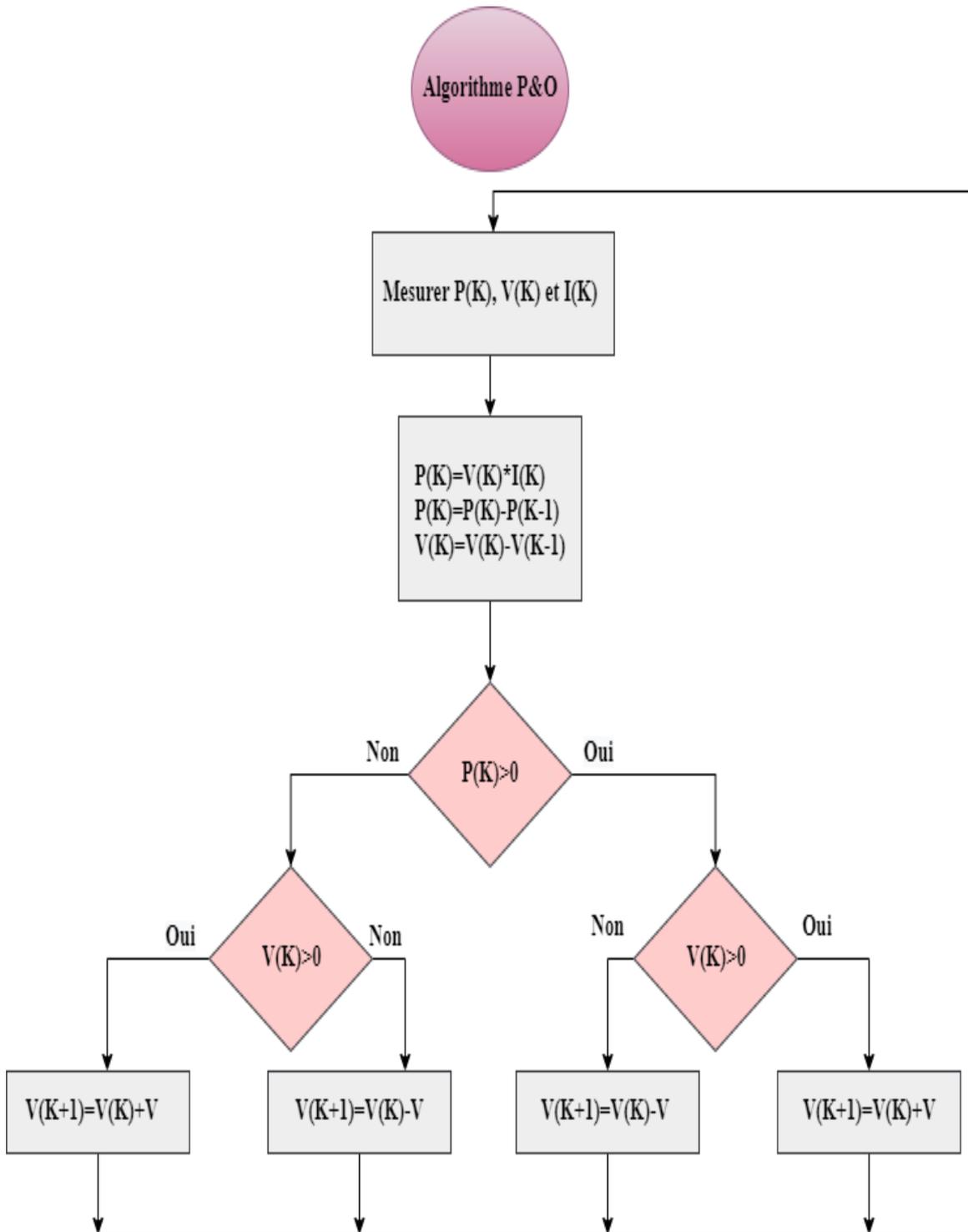


Figure II.15 : Organigramme de l’algorithme P&O

Conclusion

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est essentiel pour son bon fonctionnement et pour la satisfaction de l'utilisateur. Pour cela nous avons dimensionné notre système dans ce chapitre et nous avons modélisé les différents éléments de notre système photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, onduleur, batterie, supercondensateur).

Et pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son meilleur rendement nous avons utilisé la commande MPPT 'P&O' qui permet de suivre le point de puissance maximale pendant la variation brusque de l'ensoleillement et de température.

Chapitre III

Etude d'un système photovoltaïque autonome avec stockage

Introduction

Après avoir dimensionner et modéliser tous les composants du système, dans ce chapitre on présentera les échanges d'énergie entre les différents composants du système pour réguler le processus de charge/décharge de stockage.

III.1. Etude d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec stockage par batterie

Le système hybride constitué d'une chaîne photovoltaïque avec stockage par batterie alimentant une charge variable

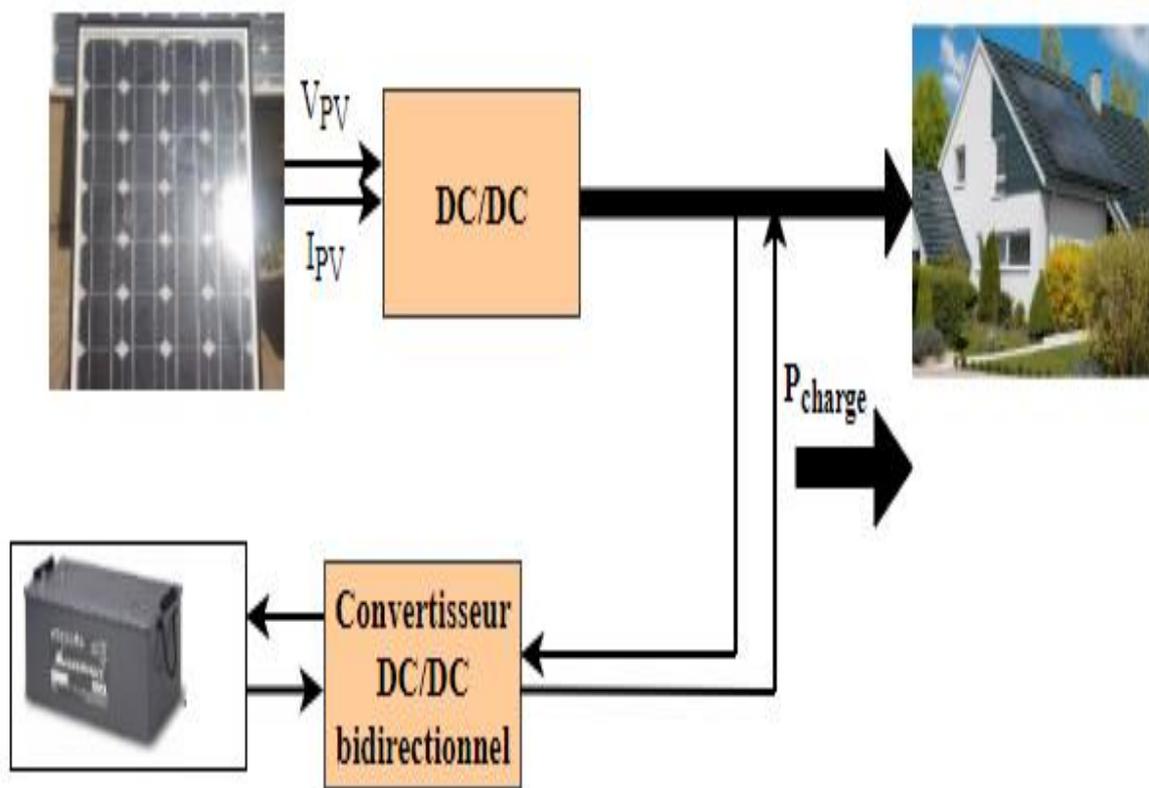


Figure III.1 : Schéma d'une chaîne de conversion avec stockage par batterie

Dans le but de réguler la tension V_{dc} du bus continu avec un convertisseur Buck-Boost, le diagramme fonctionnel du contrôle de la tension du système est illustré dans la figure (III.2).

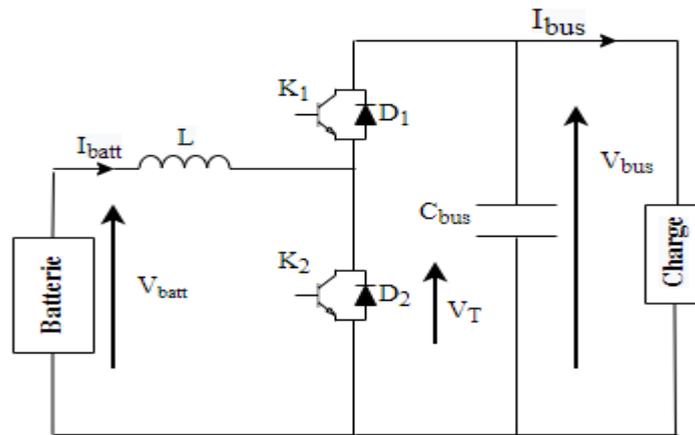


Figure III.2 : Convertisseur connecté à une batterie

Les rapports cycliques α_{21} et α_{22} de la source de tension qui sont attribués pour les interrupteurs K_1 et K_2 figure (III.2) sont fournis par une double chaîne de régulation de type PI comme sur la figure (III.3).

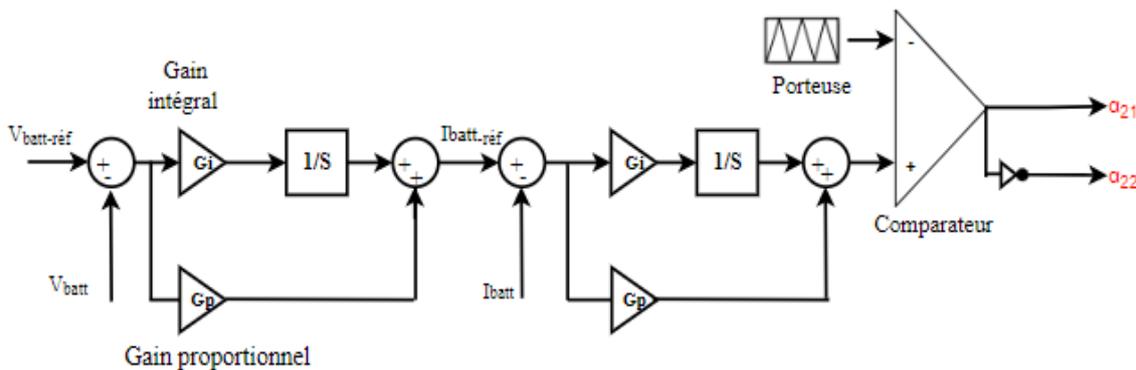


Figure III.3 : Chaîne de régulation du bus continu

III.2. Etude d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec stockage par supercondensateur

Pour étudier le comportement d'un supercondensateur on a besoin de mettre un convertisseur statique qui est le convertisseur buck-boost bidirectionnel à l'intermédiaire du supercondensateur et de la charge pour augmenter la tension qui satisfait la charge et de faire une régulation de la tension comme montre la figure (III.4), car généralement la tension de supercondensateur est très faible qui est l'inconvénient majeure de ce dernier.

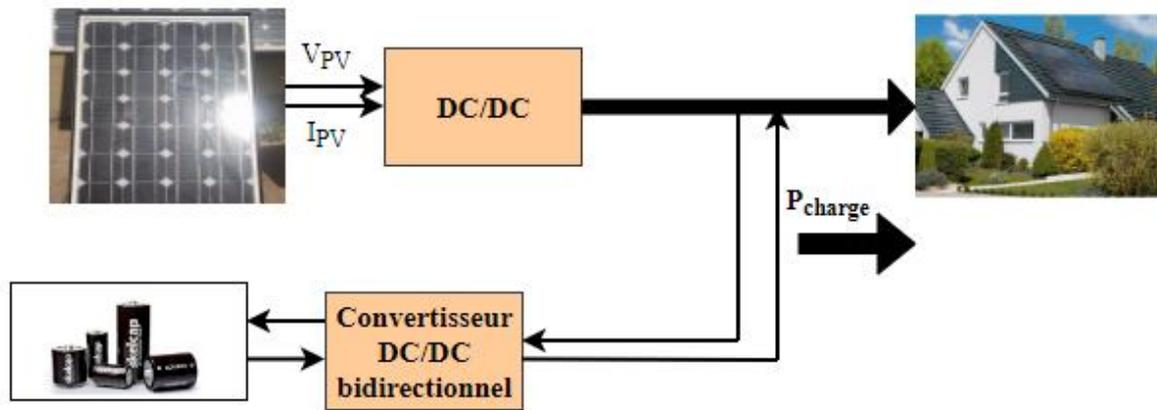


Figure III.4 : Schéma d'une chaîne de conversion avec stockage par supercondensateur

Dans le but de réguler la tension V_{dc} du bus continu avec un convertisseur Buck-Boost, le diagramme fonctionnel du contrôle de la tension du système [18].

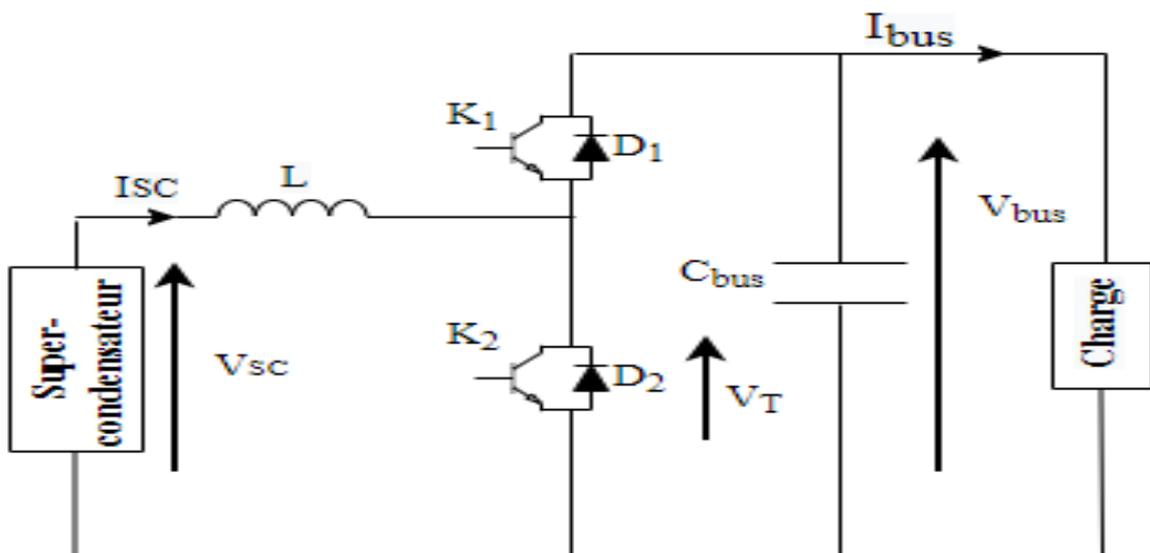


Figure III.5 : Convertisseur connecté à un supercondensateur

Les rapports cycliques α_{21} et α_{22} de la source de tension qui sont attribués pour les interrupteurs K_1 et K_2 figure (III.5) sont fournis par une double chaîne de régulation de type PI comme sur la figure (III.6).

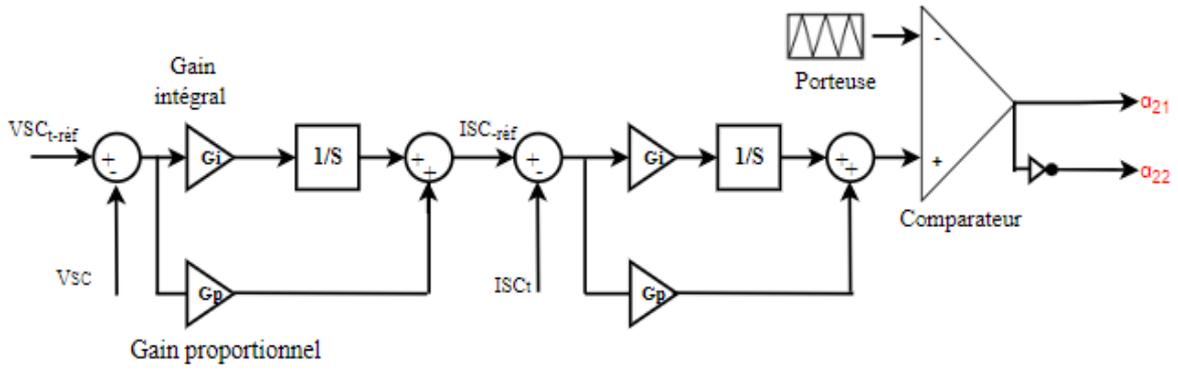


Figure III.6 : Chaîne de régulation du bus continu

La référence I_{SC} est déterminée par un traitement proportionnel et intégral de l'erreur entre la référence de tension du bus et celle mesurée aux bornes du condensateur C_{bus} , celle-ci est comparée aussi au courant débité par la source, et l'erreur obtenue est passée par un deuxième régulateur de type PI.

III.3. Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant un profil avec variations d'ensoleillement et de température par paliers. Les caractéristiques suivantes sont acquises par la modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink

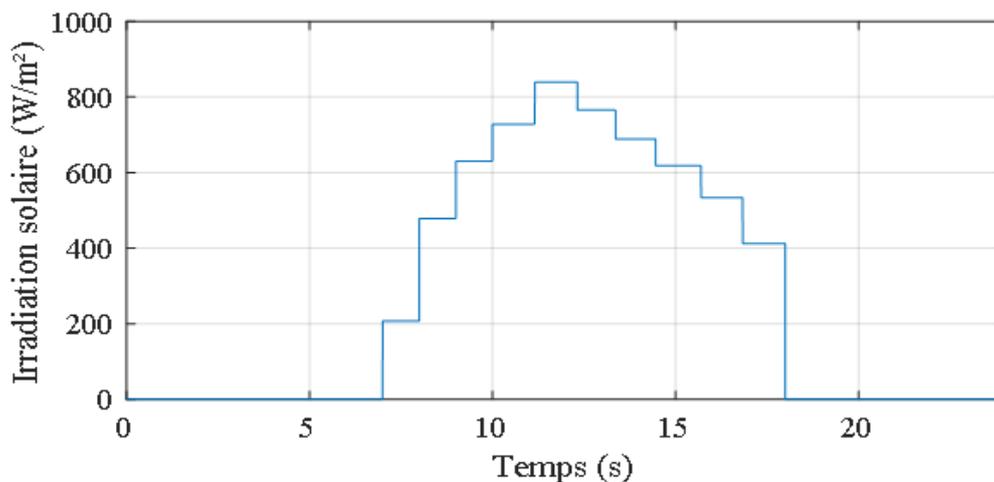


Figure III.7 : Profil de l'ensoleillement avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

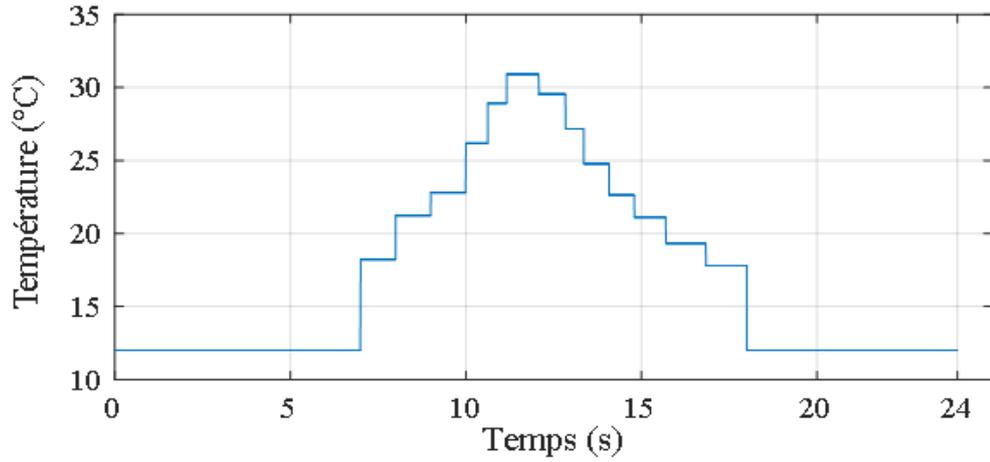


Figure III.8 : Profil de température avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

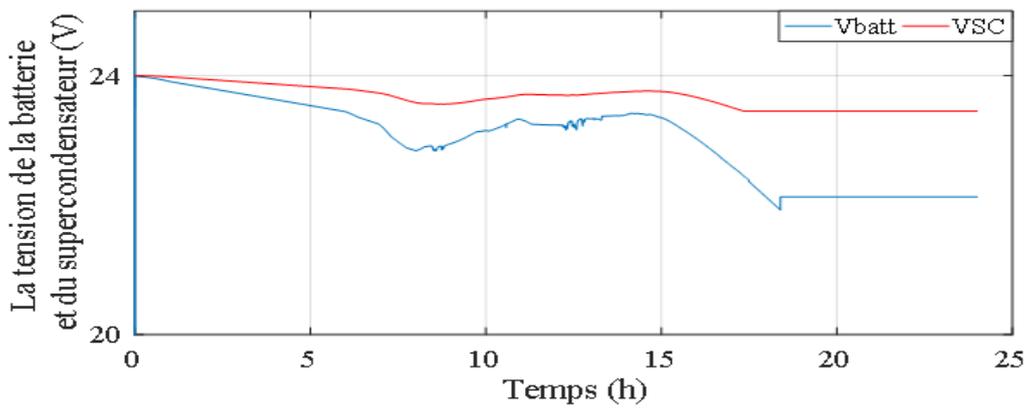


Figure III.9 : La tension de la batterie et supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

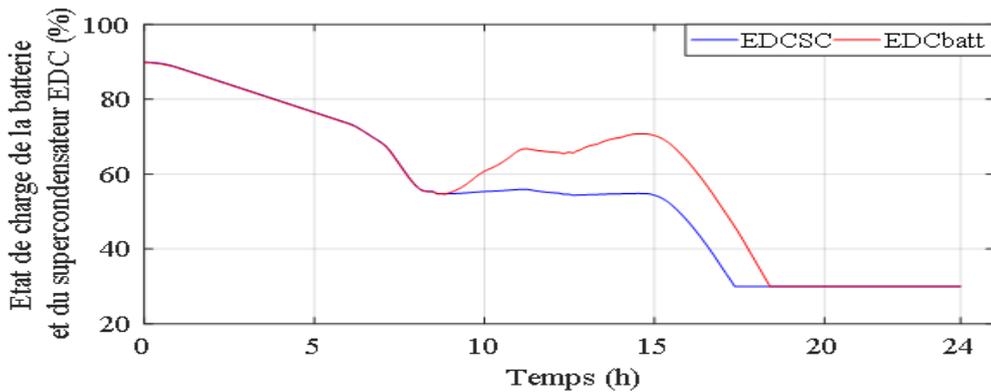


Figure III.10 : Etat de charge de la batterie et supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

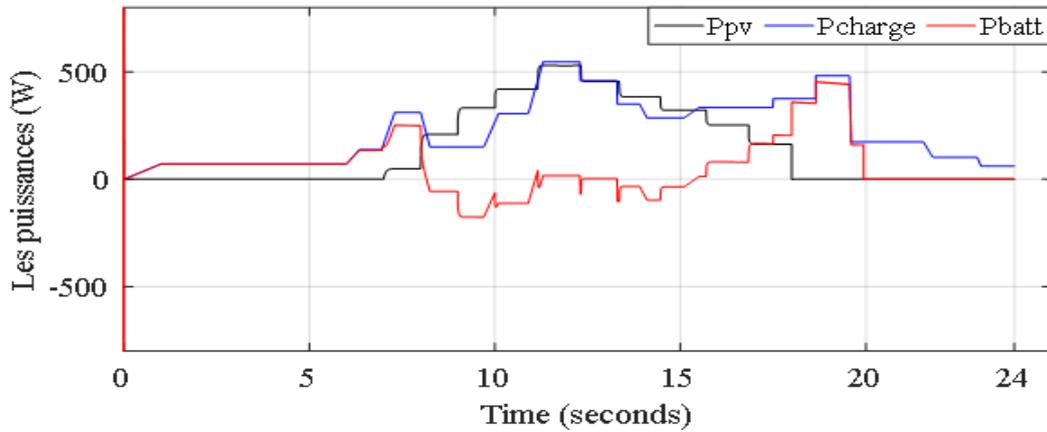


Figure II.11 : Allure des différentes puissances avec stockage par batterie avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

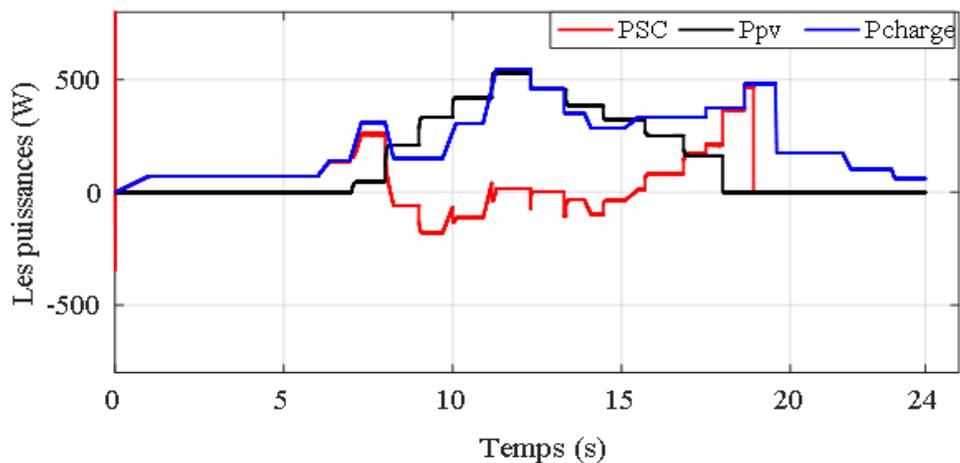


Figure III.12 : Allure des différentes puissances avec stockage par supercondensateur avec variations d'ensoleillement et de température par paliers

Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant un profil réel mesuré d'ensoleillement et de température. Les mesures sont faites au laboratoire LTII. Les caractéristiques suivantes sont obtenues par simulation sous Matlab/Simulink

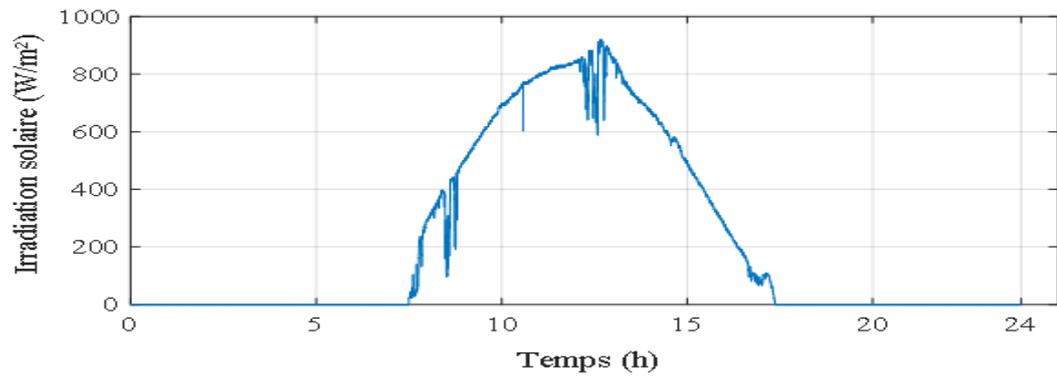


Figure III.13 : Profil d'irradiation solaire mesuré le 02/06/2022

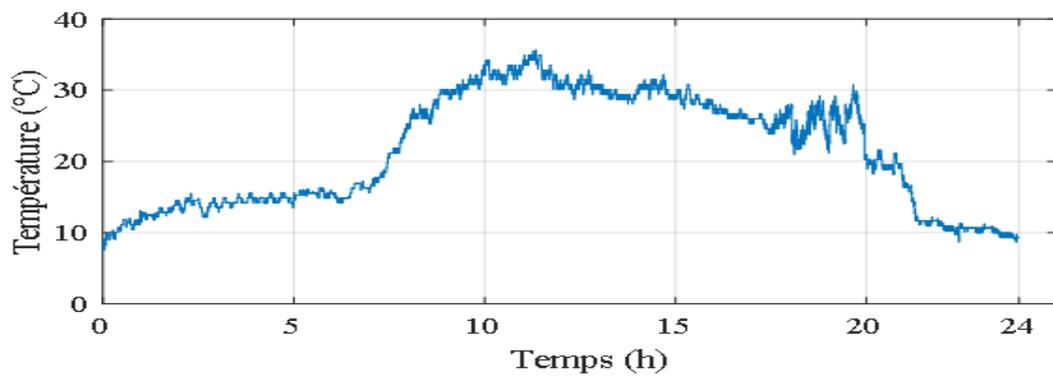


Figure III.14 : Profil Température mesuré le 02/06/2022

Les figures suivantes représentent l'état de charge et la tension du système étudié photovoltaïque avec stockage par batterie et supercondensateur.

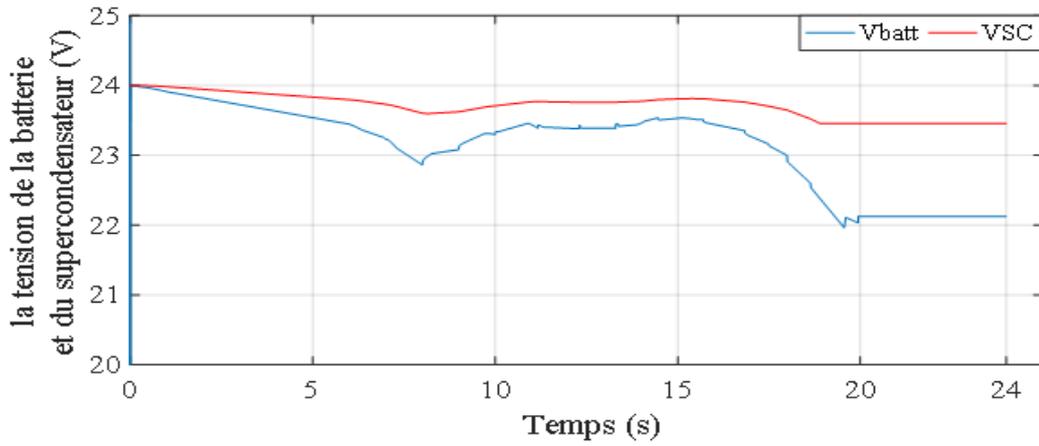


Figure III.15 : La tension de la batterie et supercondensateur

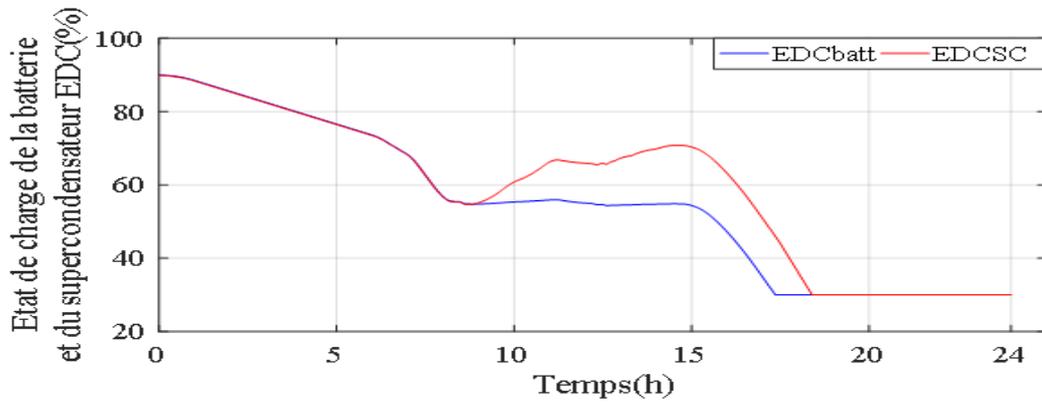


Figure III.16 : Etat de charge de la batterie et supercondensateur

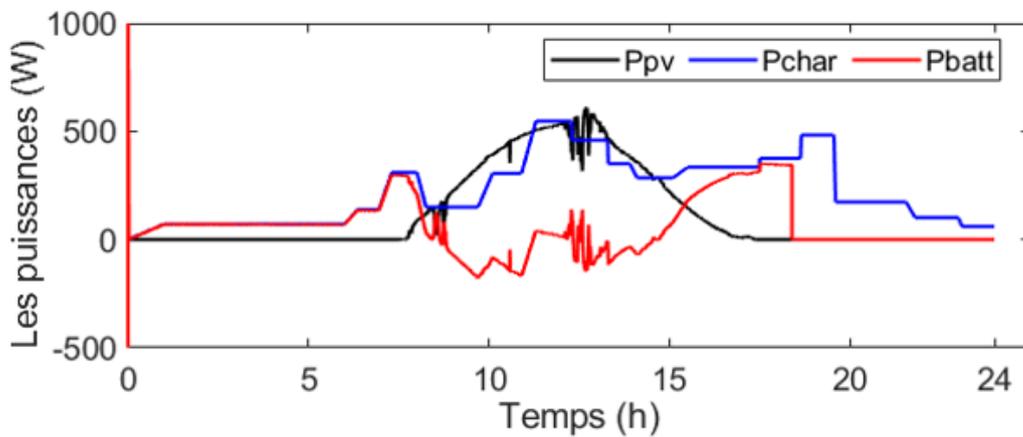


Figure III.17 : Allure des différentes puissances avec stockage par batterie

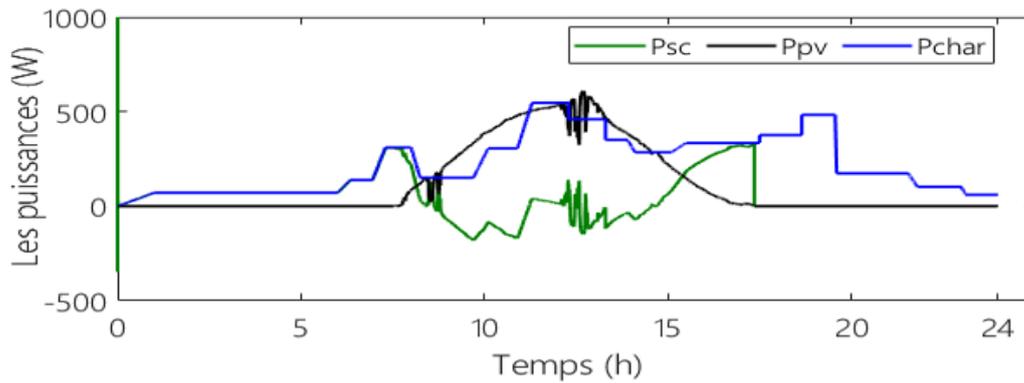


Figure III.18 : Allure des différentes puissances avec stockage par supercondensateur

- L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques n'est pas disponible pendant 24 heures, elle est produite que durant la journée, à partir de 7h jusqu'à 17h. Le pic de puissance est atteint à midi.
- Pour l'état de charge de la batterie, et le supercondensateur entre 17h à 23h les batteries et supercondensateur sont complètement déchargées, Donc un stockage hybride est obligatoire pour satisfaire le besoin de la charge.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré sur la présentation des résultats de simulation du système photovoltaïque avec stockage batterie et un autre système avec le supercondensateur.

La stratégie proposée distribue la régulation de la tension du bus DC entre les différentes sources en fonction des besoins de la charge.

Pour prolonger la durée de vie et de satisfaire les besoins de la charge, un système de gestion d'énergie avec stockage hybride effectué dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Simulation du système étudié PV avec stockage

Introduction

Le système de stockage d'énergie est essentiel pour maintenir le bon équilibre de puissance entre le système photovoltaïque et la demande de la charge. Parmi les différents types des systèmes de stockage d'énergie, le système de stockage hybride (batterie/supercondensateur) a attiré plus d'attention de termes de l'analyse de la recherche en raison de ses nombreux avantages et les performances globales du système. La batterie est utilisée pour compenser les besoins en énergie pendant une longue durée, tandis que le supercondensateur gère principalement les transitoires fluctuations de puissance, cela augmente le cycle de vie de la batterie.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter l'algorithme de gestion qui permet de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge de stockage.

IV.1. Etude d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec stockage par batterie et supercondensateur

Le système à étudier est un système photovoltaïque avec batterie et supercondensateur relié à un bus continu CC pour l'alimentation d'une charge continue ou alternative suivant l'application.

Description du Système

Le système étudié est représenté dans la figure (IV.1) il est composé d'un générateur photovoltaïque et un stockage hybride assuré par l'utilisation d'une combinaison de batteries et super-condensateurs. Les batteries stockent de l'énergie pour une longue durée. Les super-condensateurs peuvent rapidement absorber un changement de courant pour réduire les risques sur les batteries.

Le convertisseur connecté au PV est un convertisseur Boost qui permet d'augmenter la tension des panneaux photovoltaïques Pour la fournir au bus continu DC ainsi fournit au même temps la puissance maximale des panneaux photovoltaïques grâce à l'utilisation d'un algorithme de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) [2].

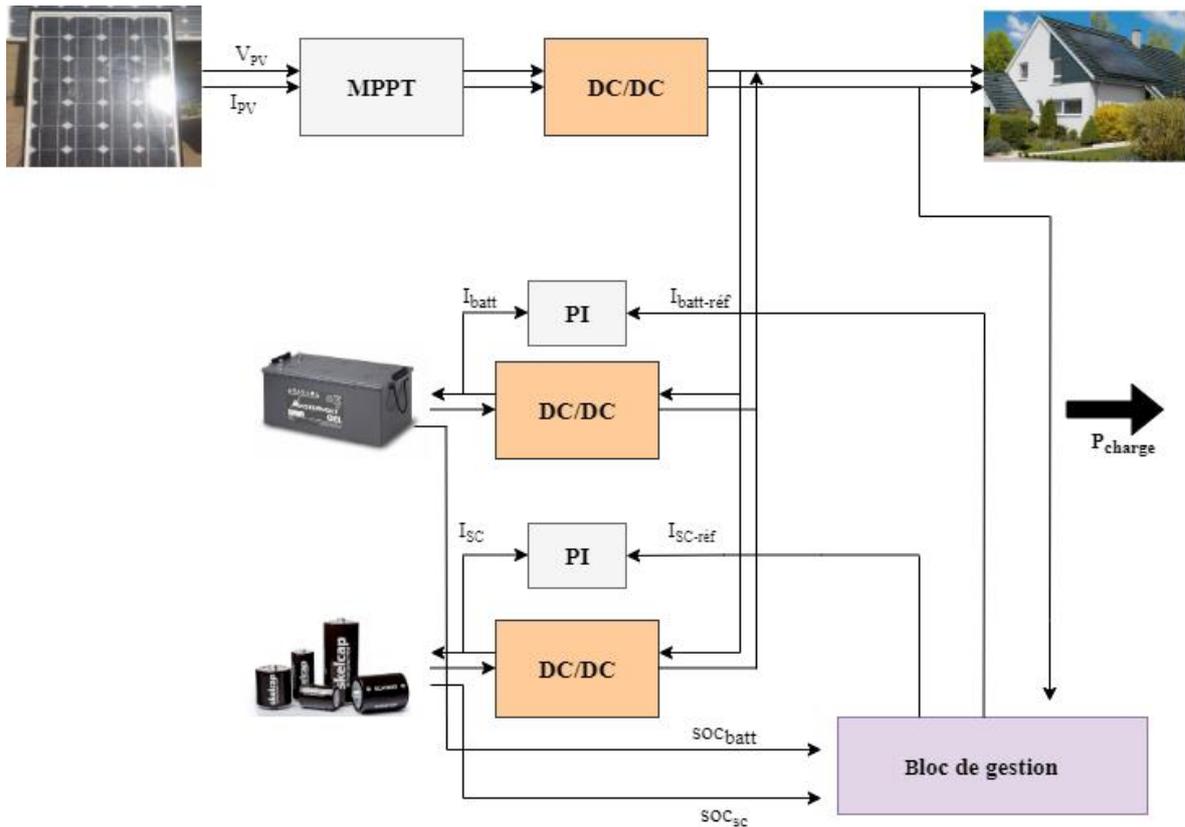


Figure IV.1 : Schéma d'une chaîne de conversion avec stockage par batterie et supercondensateur

La solution traditionnellement utilisée dans les systèmes électriques est le transport de la puissance sous forme alternative, comme schématisé dans la figure (IV.2).

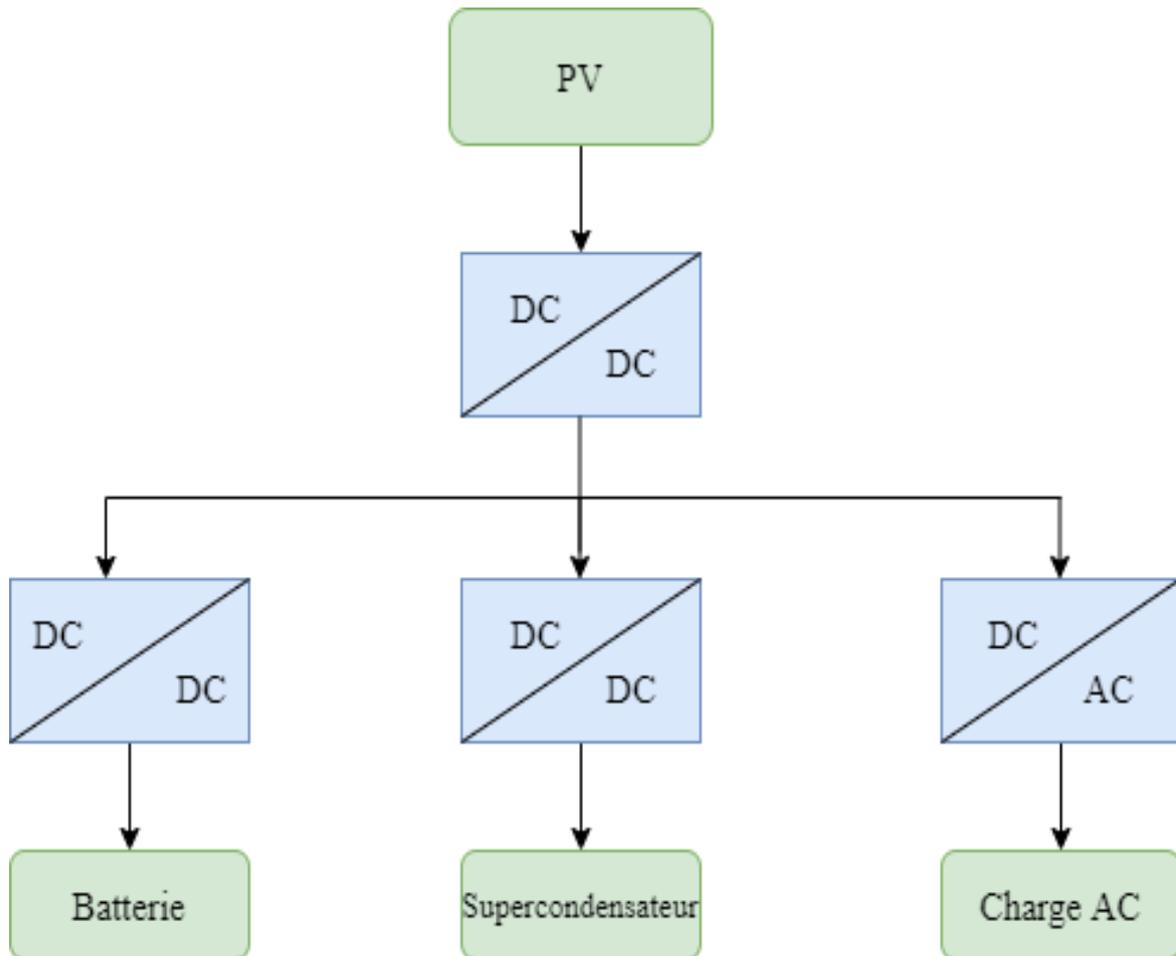


Figure IV.2 : Schéma d'un système de puissance avec bus continu

Tension du bus continue DC est contrôlée selon le principe décrit dans la figure (IV.3). Le correcteur PI calcule le courant de référence du bus DC (I_{dcref}) pour maintenir la tension du bus DC à la tension du système.

Le courant de référence des batteries $I_{battref}$ et des super-condensateurs I_{scref} est produit par le courant de référence du bus continue I_{dcref} .

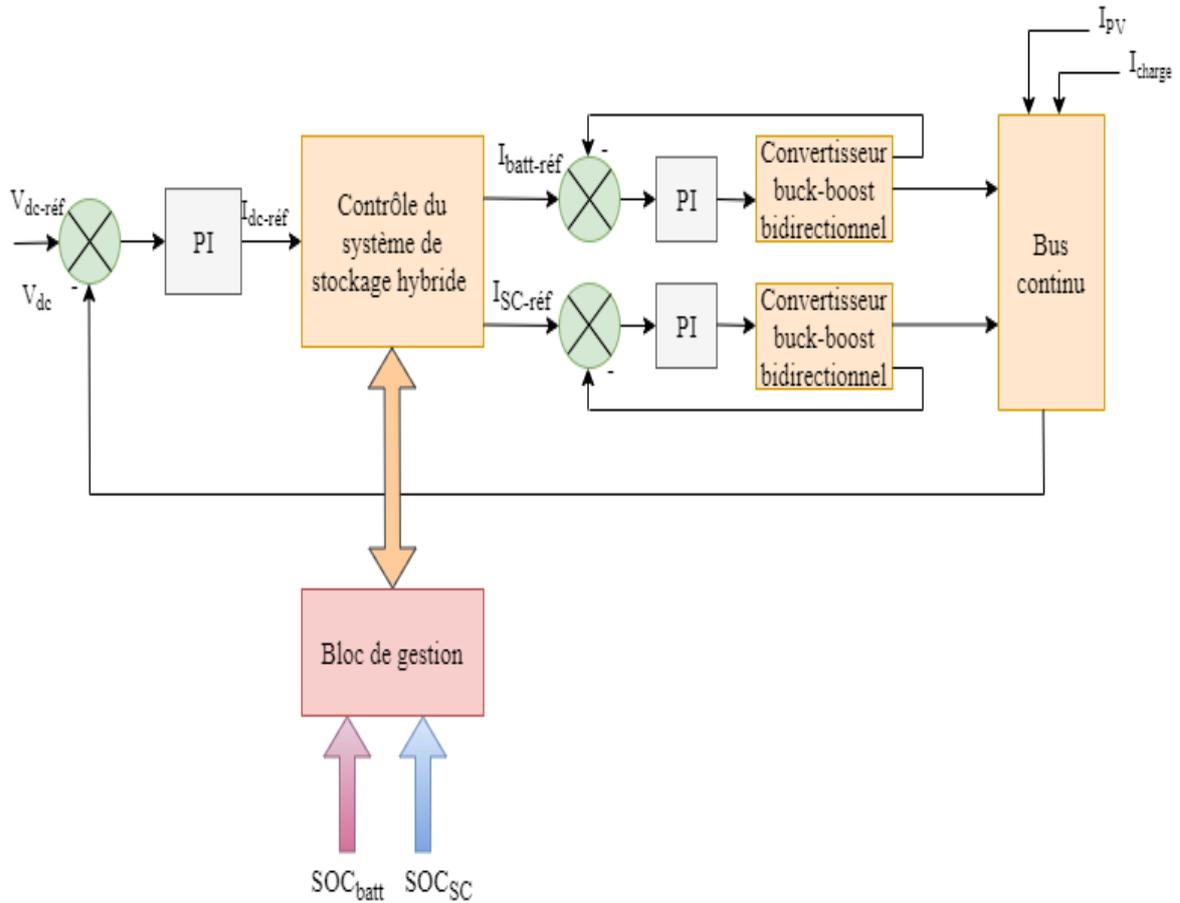


Figure IV.3 : Contrôle du système de stockage hybride avec bus continu

IV.2. Stratégies de commande des unités de stockage

Afin de valider l'association batteries et super-condensateurs, on a proposé quatre combinaisons qui nous permet de voir clairement la différente combinaison des batteries et le super-condensateur et la méthode de distribution d'énergie utilisant à fois des batteries et des super-condensateurs est proposée pour le stockage d'énergie photovoltaïque dans deux cas actif et inactif.

Etat		Actif	Inactif
Source principale	PV	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant un jour ensoleillé 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant la nuit • Pendant un jour nuageux • En cas de panne
Sources auxiliaires	Batterie+Supsecond en sateur	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant l'incapacité de source principale, par exemple: <ol style="list-style-type: none"> 1. Les conditions climatiques sont faibles 2. La demande de la charge est supérieure à la production 3. En cas de panne de la source principale PV 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant le fonctionnement normal de la source principale PV • La demande de la charge égale ou inférieure à la production ($P_{Ch} \leq P_{PV}$)
Charge principale	Charge DC	<ul style="list-style-type: none"> • La charge est connectée 	<ul style="list-style-type: none"> • La charge est déconnectée
Charges auxiliaires	Batterie+Supsecond en sateur	<ul style="list-style-type: none"> • En cas où existe un excès d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Lorsque le SOC est supérieure à un seuil haut

Figure IV.4 : L'état de chaque composant constituant le système hybride

On peut voir les quatre scénarios pour le stockage d'énergie et le partage de puissance, dans la figure (IV.4) et la figure (IV.5).

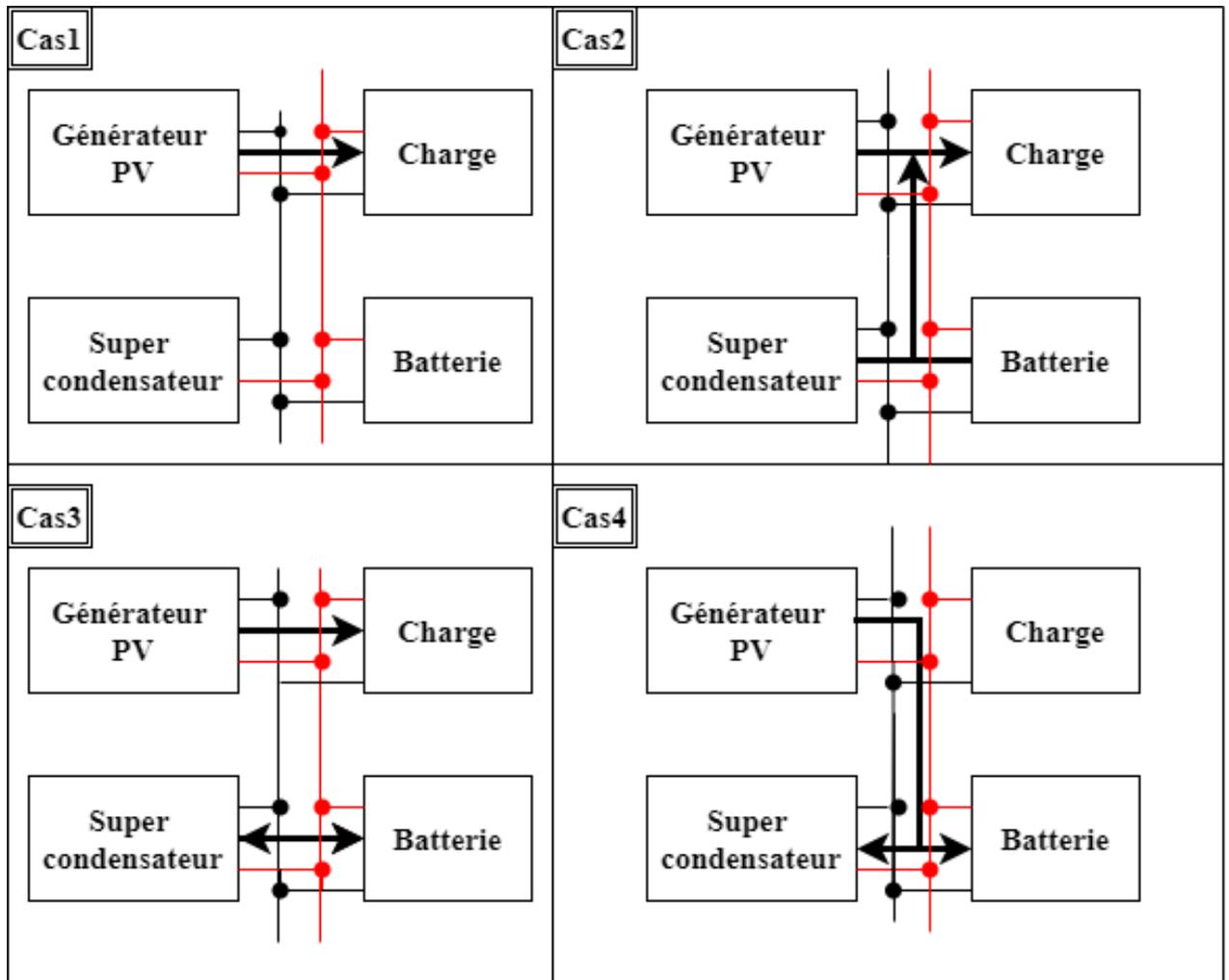


Figure IV.5 : Scénario de fonctionnement du système hybride

IV.3. Stratégie de control de l'association batteries et supercondensateur

La figure (IV.6) représente l'organigramme de gestion de puissance de notre système de stockage hybride (batterie/supercapaciteur) pour parvenir à fournir la puissance qui est demandée par notre charge. Dans le cas normal d'état de charge des batteries et des supercondensateurs, le SOC_{batt} et le SOC_{sc} doivent être compris entre 30% et 90% qui représentent respectivement le SOC_{min} et le SOC_{max}.

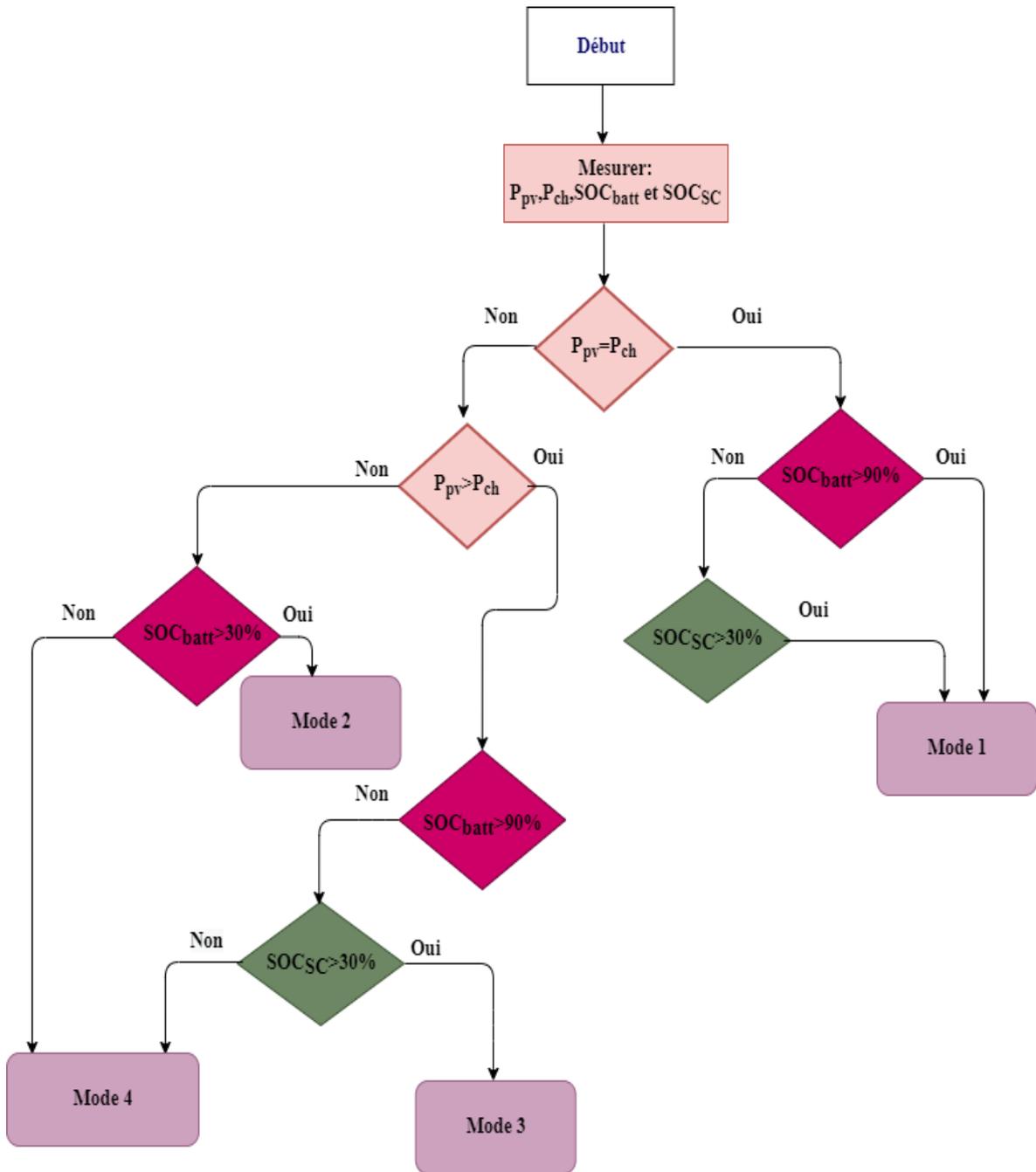


Figure IV.6 : Organigramme du système de stockage hybride (batterie/super-condensateur)

IV.3.1. Les différents modes possibles

Il y a six modes différents :

- **Mode 1** : Quand la puissance photovoltaïque égale à la puissance demandée, et $30% < SOC_{batt} < 90%$, $30% < SOC_{sc} < 90%$ dans ce cas la batterie et le super-condensateur sont complètement chargés donc on les déconnecte.

- **Mode 2 :** Quand la puissance photovoltaïque est inférieure à celle demandée par la charge, et aussi la batterie et le super-condensateur sont chargés $30\% < SOC_{batt} < 90\%$, $30\% < SOC_{sc} < 90\%$ dans ce cas le manque sera compensé par la batterie et le supercondensateur pour alimenter la charge.
- **Mode 3 :** Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et $30\% < SOC_{batt} < 90\%$, $30\% < SOC_{sc} < 90\%$ (batterie et supercondensateur sont chargés), dans ce cas la charge sera alimentée par la puissance photovoltaïque générée.
- **Mode 4 :** Si la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance de la charge, e et aussi $0 \leq SOC_{sc} \leq 30\%$ dans ce cas la charge est déconnectée et on charge les batteries et le supercondensateur avec la puissance photovoltaïque générée.

Cas	Période	GPV	Batt+SC	P_{diff}	SOC	Description
1	Pendant un jour ensoleillé ou nuageux	Actif	Repos	$P_{diff}=0$	$30\% < SOC < 90\%$	$P_{Ch}=P_{GPV}$
2		Actif	Déchargé (Source)	$P_{diff}<0$		$P_{Ch}=P_{GPV}+P_{Batt+SC}$
3		Actif	Chargé (Charge)	$P_{diff}>0$		$P_{Ch}=P_{GPV}-P_{Batt+SC}$
4		Actif	Chargé (Charge)	$P_{diff}>0$	$SOC < 30\%$	$P_{Ch}=0$ $P_{GPV}=P_{Batt+SC}$

Figure IV.7 : Différents Scénarios de fonctionnement du système hybride

IV.3.2. Résultats de simulation et interprétations d'un profil réel pour une journée d'été

Les sources d'énergie photovoltaïque dépendent des conditions météorologiques et d'un besoin de stockage d'énergie pour équilibrer la production et la demande d'énergie.

On a procédé à la simulation du système étudié par graphe comme introduction à la simulation pendant 24 s qui correspond réellement à 24 h avec le chargement d'échelle. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possible.

Les deux figures suivantes figure (IV.8) et figure (IV.9) représentent respectivement la température et l'ensoleillement pendant 24 h.

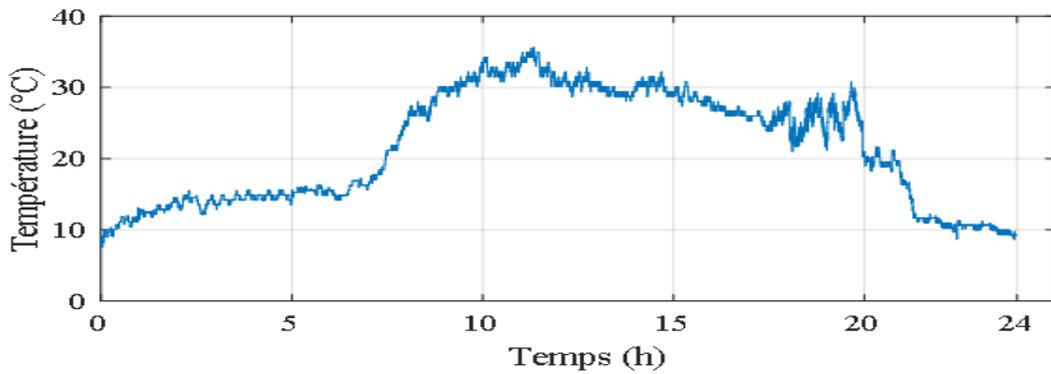


Figure IV.8 : Profil de la température pendant une journée d'été

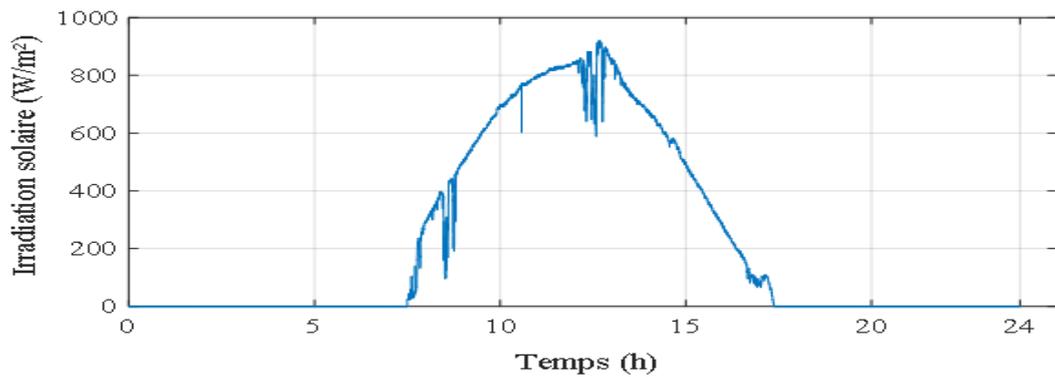


Figure IV.9 : Profil d'irradiation solaire mesuré le 02/06/2022

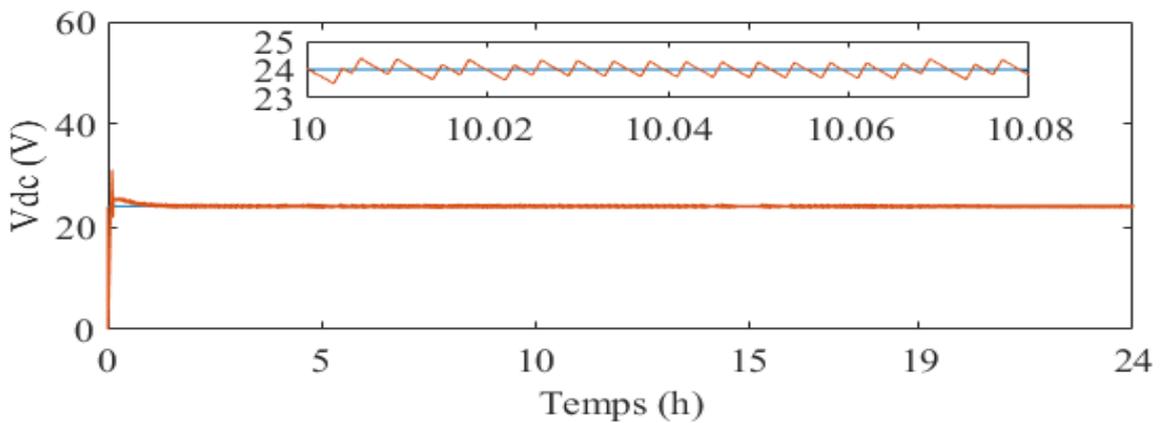


Figure IV.10 : La tension au niveau du Bus-continu

On peut bien remarquer que l'allure des EDC dans la figure (IV.12) et celle des tensions dans la figure (IV.11) évoluent de la même manière.

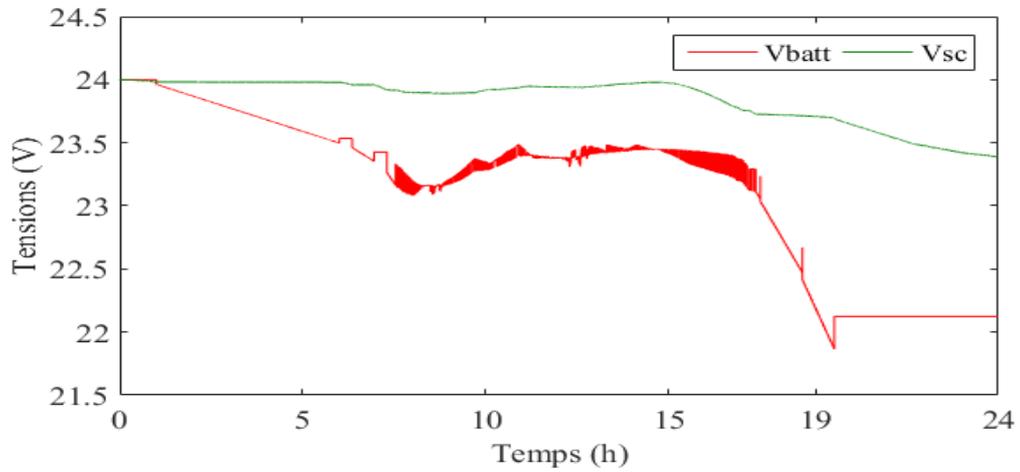


Figure IV.11 : La tension de la batterie et supercondensateur

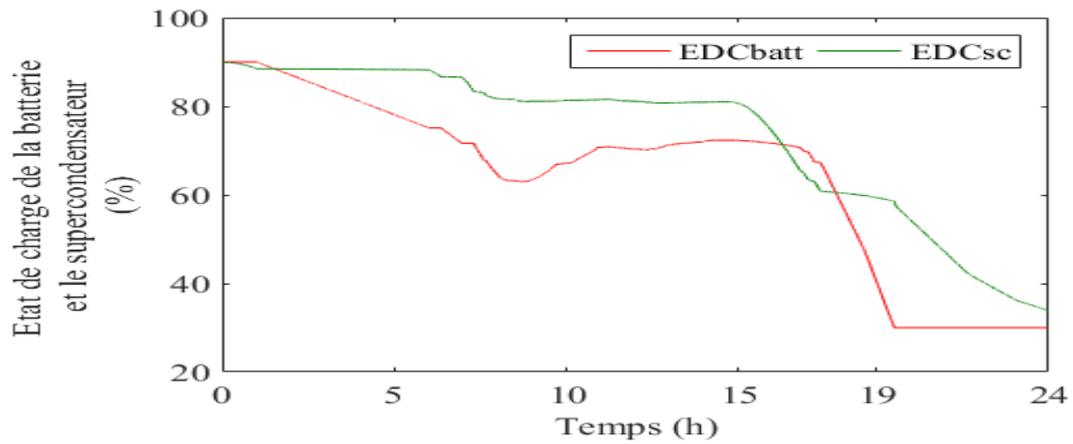


Figure IV.12 : Allure des EDC

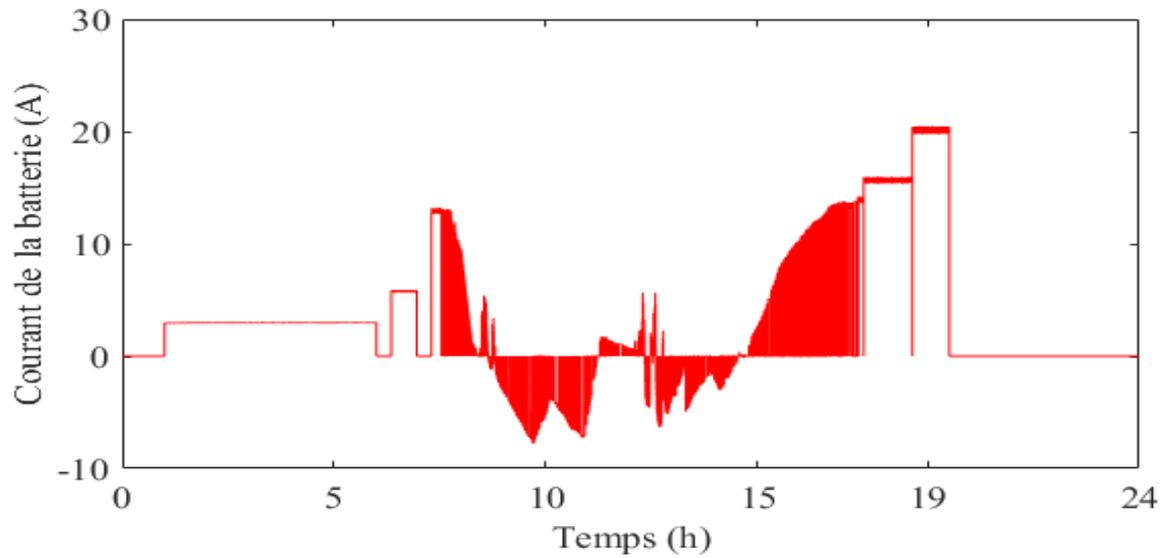


Figure IV.13 : Allure de courant I_{bat}

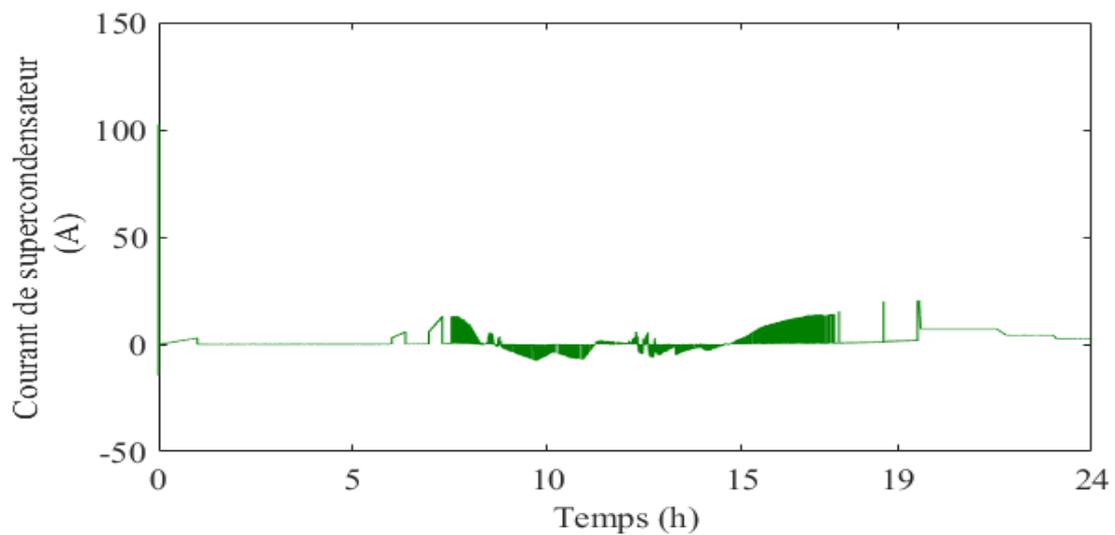


Figure IV.14 : Allure de courant I_{sc}

Nous remarquons dans la figure (IV.13) et la figure (IV.14) que le mode charge et décharge est illustré par le signe de courant de stockage tel que le signe négatif indique une charge et le signe positif indique une décharge.

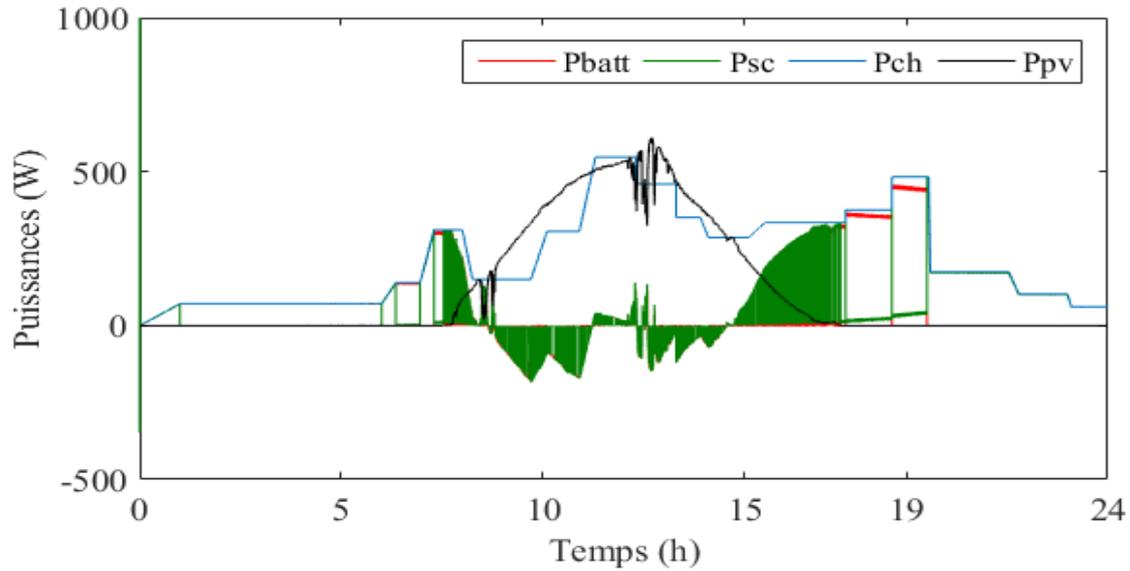


Figure IV.15 : Allure des puissances Ppv, Pch, Psc et Pbat

Quand la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est supérieure à la puissance de la charge et $EDC_{batt} > EDC_{max}(90\%)$ et le supercondensateur est déchargé, on déconnecte la batterie ($t=9h$), la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques et le surplus pour charger le supercondensateur, comme montre la figure (IV.15).

IV.3.3. Résultats de simulation avec un profil de variation d'ensoleillement et de température

Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant les mêmes profils figure (III.7) et figure (III.8), avec variations d'ensoleillement et de température par paliers. Les caractéristiques suivantes sont acquises par la modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink.

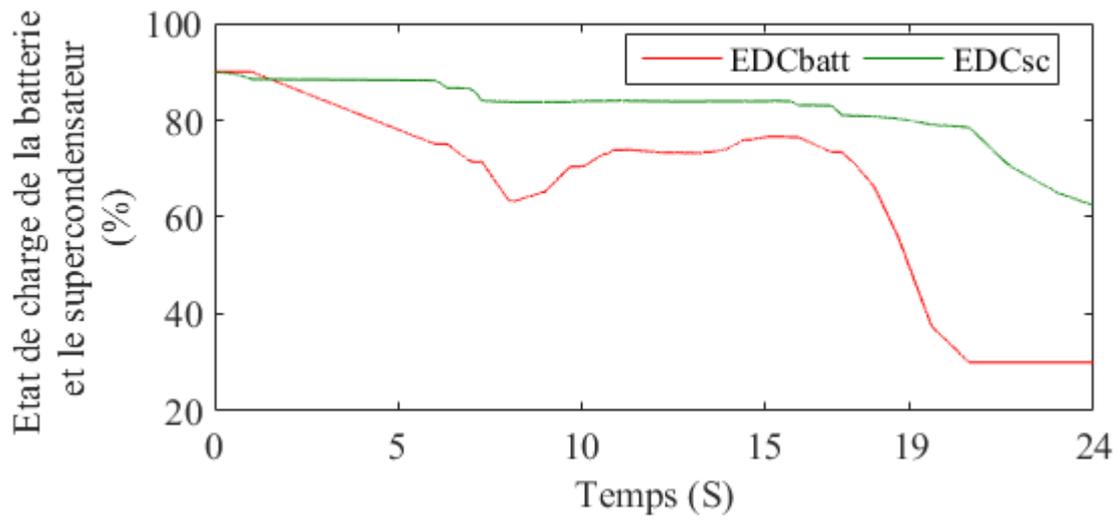


Figure IV.16 : Allure des EDC

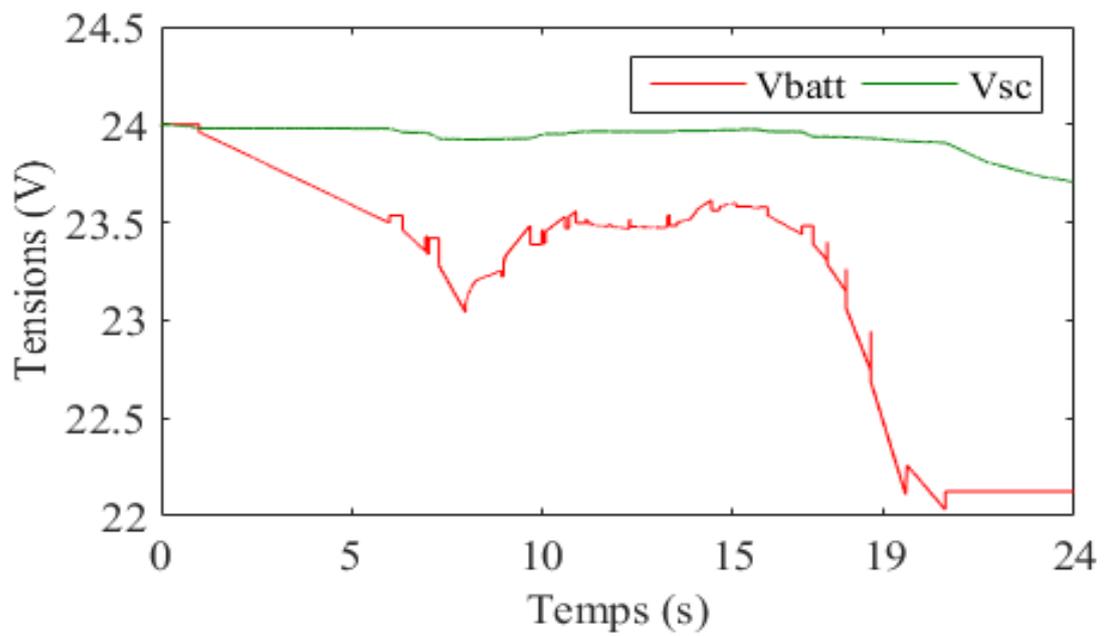


Figure IV.17 : Tensions aux bornes du supercondensateur et des batteries

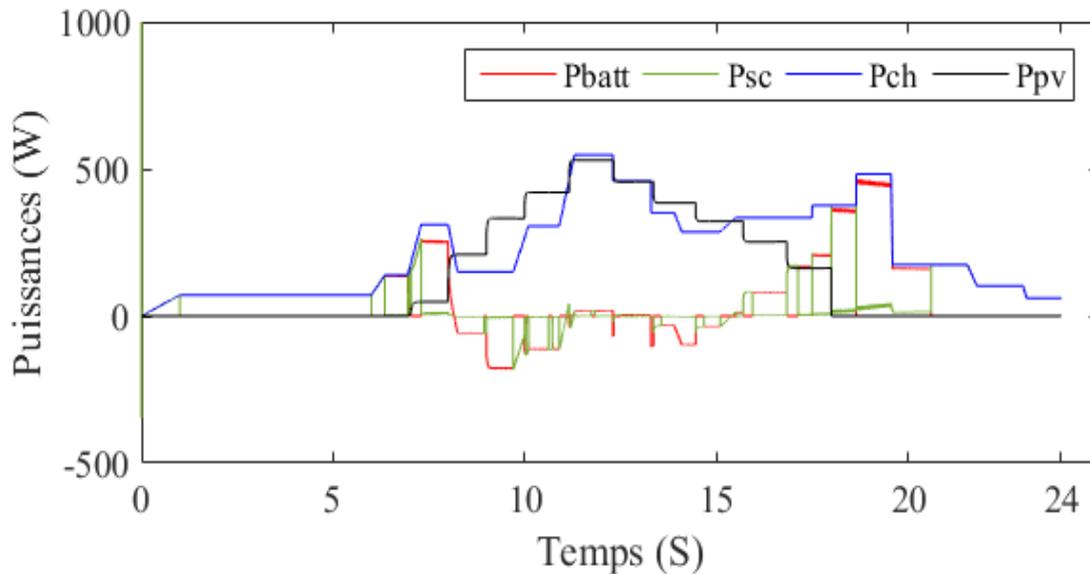


Figure IV.18 : Allure des puissances Ppv, Pch, Psc et Pbat

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mené la gestion et le contrôle de flux énergétique dans un système photovoltaïque autonome dont nous avons mis en avant le rôle du stockage hybride, le comportement des batteries et des super-condensateurs durant la variation d'ensoleillement et de consommation à l'aide d'un programme de gestion.

La présence du stockage hybride (batterie supercondensateurs) permet d'éviter les recharges et les débits excessifs, selon les résultats montent que la batterie sert à une alimentation de la charge durant les périodes dont la production du champ est nulle ou insuffisante, d'autre part l'utilité de supercondensateurs repose sur l'absorption d'un surplus d'énergie produite ou dans le cas d'une forte demande de puissance.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans notre travail présenté nous avons étudié la gestion d'un système photovoltaïque avec stockage batterie supercondensateur.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un aperçu sur l'énergie photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques en général. Leur principe de fonctionnement et les différentes cellules qui constituent le module photovoltaïque, et les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie ainsi on a présenté les différentes batteries et supercondensateur.

Dans le deuxième chapitre, on a fait étude a un système photovoltaïque autonome Il a pour objectif : la modélisation des composants, le fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque, la régulation de la tension du bus CC, La modélisation de la batterie de stockage et le supercondensateur, Pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) on a utilisé la méthode P&O (perturbation et observation), nous avons aussi dimensionné le champ photovoltaïque et le stockage.

Dans le troisième chapitre on a procédé à la simulation du système photovoltaïque avec stockage par batteries et aussi avec le super-condensateur.

Dans le dernier chapitre Nous pouvons conclure que les résultats de simulation obtenu sont en concordent avec la gestion proposée. Dans ces conditions, les simulations effectuées pour le système d'énergie photovoltaïque avec stockage hybride (batteries, super-condensateurs) ont permis de montrer l'intérêt des super-condensateurs. En effet, elles permettent de faire face efficacement aux pics de puissance. Les batteries ne fournissant, ainsi, que la puissance moyenne pour laquelle elles ont été dimensionnées.

Comme perspectives, il serait possible d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation pour l'extraction du maximum de puissance puis faire une comparaison.

Liste bibliographie

Liste bibliographique

- [1] Boudehouche.M et Ouennoughi.M « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage». Mémoire de Master de l'université de Bejaia (2015-2016)
- [2] Boukhara.M. et Menasri.T « Evaluation et contrôle d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec stockage hybride (batterie/super-condensateur) ». Mémoire de Master de l'université de Bejaia (2020-2021).
- [3] Benseddik.O. « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master2, université Kasdi Merbah- Ouargla, 2012.
- [4] Comment l'Energie Solaire se Transforme-t-elle en Electricité ? In monkitsolaire [en ligne].2019. Disponible sur <https://www.monkitsolaire.fr/blog/comment-l-energie-solaire-se-transforme-t-elle-en-electricite--n4> (Consulté le 01/05/2022)
- [5] Belhadj.M « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [6] Eljouad.Z « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques » Mémoire présenté en vue de l'obtention du Grade de Docteur de l'Université d'Angers sous le sceau de l'Université Bretagne Loire, 2016
- [7] Bilbao Learreta.A « Réalisation De Technique MPPT Numérique ». Rapport De Stage Projet De Fin D'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Université Virgile.
- [8] Alonso.C « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [9] Abouda.S « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage ». Thèse de doctorat.Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Avril 2015.
- [10] Abbes D., Martine A., Champenois G., Robyns B., Real time supervision for a hybrid renewable power system emulator, Simulation Modelling Practice and Theory 42 (2014) 53– 72.
- [11] Zaouche.F «Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïques». Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, 2018.

Liste bibliographie

- [12] Azib.S et Zaidi.A « Etude d'un système de stockage par un supercondensateur ». Mémoire de Master Université Bejaia (2016-2017).
- [13] Alcicek.G « Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion véhicule électrique ». UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD. Thèse de doctorat soutenue le 08 Décembre 2014.
- [14] Zeraibi.KH et Meguellati.N « les sources d'énergie miniatures ». Université Mohamed Elbachir Elibrahimi-Bordj Bou Arreridj. Mémoire de fin d'étude soutenue le 16/06/2014.
- [15] www.mastervolt.fr/batteries (Consulté le 26/05/2022)
- [16] BOKHARI.Y « Un Système Hybride Pv - Pàc -Sc Pour Une Application Embarquée ». Université Mohamed Khider de Biskra, Mémoire de Master soutenu le mercredi 10 juillet 2019.
- [17] <https://www.trace-software.com/fr/les-effets-dombrage-sur-la-performance-des-panneaux-solaires> (Consulté le 12/06/2022)
- [18] Rekioua.D « Optimization of Photovoltaic Power Systems » Edition Springer, 2019
- [19] Oulami.N « les batteries », Institut de Formation en Electricité et Gaz.
- [20] Larfaoui.T et Zebboudj.M « Gestion d'un système multi-sources (photovoltaïqueéolien) avec stockage par batteries ». Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, Mémoire de fin d'étude (2020/2021).
- [21] Helali.K « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative ». Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Mémoire de Magister soutenu publiquement le 25/06/2012.
- [22] Ameer.A et Daoudi.M « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque (application entreprise ENAVA) ». Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Soutenu le 02/06/2016.

Annexes

Annexes

Les paramètres constants identifiés à partir des mesures expérimentales et des paramètres standards (STC) (TP master 2, Modules Application et dimensionnement des systèmes à énergies renouvelables, Madame Rekioua).

P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	R _s (Ω)	R _p (Ω)	E _{sréf} (W/m ²)	T _{jréf} (°C)
0.00548	0.922×10 ⁻⁵	-2.345×10 ⁻⁵	29.54	0.83	235.1551	1000	25

Les paramètres du panneau photovoltaïque

$$Eg = (1.76. 1019)$$

$$q = (1.6. 10^{-19} C)$$

$$K = (1.38 \times 10^{-23} (SI))$$

Les caractéristiques du panneau photovoltaïque

Tension maximale (Vmpp)	17,2 V
Courant maximal (Impp)	4,65 A
Tension à circuit ouvert (Vco)	24,6 V
Courant de court-circuit (Isc)	5,0 A
Poids	8 Kg
Tnoct	50°C
Dimensions	1195×541×30 (mm)
Rendement	15%
Prix	20000 DA

