

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaïa



Faculté de Technologie



Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de Cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Électrotechnique

Thème :

*Evaluation et contrôle d'un système de production
d'énergie photovoltaïque avec stockage hybride
(batterie/super-condensateur)*

Réalisé par :

BOUKRARA Massinissa
MENASRI Taous

Encadré par :

Monsieur Kassa IDJDARENE
Monsieur Ismail HACINI

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

On remercie Dieu le tout puissant le très miséricordieux, qui nous a donné la force et qui nous a guidé à faire ce modeste travail.

*Nous tenant à remercier notre promoteur Monsieur **KASSA IDJDARENE**, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a voulu nous consacrer.*

*Nous adressons nos vifs remerciements et notre gratitude à notre Co-promoteur Monsieur **ISMAIL HACINI**, pour la qualité des discussions qui ont nourris ce travail, pour sa cofinance sans cesse renouvelée et pour cette capacité d'enthousiasme sans laquelle ce travail n'aurait peut-être pas abouti.*

On tient également à remercier, les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer à l'évaluation scientifique de ce travail et pour l'intérêt qu'il sont porté à ce travail en acceptant de le juger dans des délais très contraignants.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au coures de la réalisation de ce mémoire.



- Massinissa, Taous -

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon cher papa et ma chère mère,

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon
égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse
atteindre mes objectifs*

A mes chers frères Hakou et Tami, à ma sœur Lyza ;

A tout ma famille et mes chers amis

*pour leurs indéfectibles soutiens, pour leurs conseils
précieux tout au long de mes études,*

*A mes intimes qui m'ont aidé et supporter dans les
moments difficiles*

A ma binôme Menaseri FOUZIA,



- Massinissa -

Dédicace

*A ceux qui m'ont tout donnée sans rien en retour, à ceux
qui m'ont encouragé durant toutes ces années d'étude, aux
être les plus chères au monde,*

A mes très chers parents

*Pour leurs soutiens et leurs sacrifices que dieu leurs
procure*

Bonne santé et longue vie.

Mes sœurs et mes frères

Souhila, Siham, Karima, Salim, Rouchddine.

A mes belles-sœurs, mes nièces et mes neveux

*Nawal, Amira, Massilia, serin, Adem, Aris, Karam,
Malik, Zakaria, Adem, Amine*

*A la mémoire de mes très chères grands-mères et mon
grand-père*

A tous mes amis

*Melissa, Assai, Djamila, Lydia, Hanane, Sonia, Dyhia,
Sabrina, Bariza*

A mon binôme Boukrara Massinissa.



Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste d'abréviation

Liste des symboles

Liste des figures

Introduction Générale 1

Chapitre I

Généralité photovoltaïque et stockage hybride

I.	Introduction	5
I.1.	Historique	5
I.2.	L'énergie solaire photovoltaïque	6
I.3.	Rayonnement solaire	6
I.4.	Les différents types de rayonnement solaire	7
I.4.1.	Le module PV	8
I.4.2.	Caractéristiques d'un module	8
I.4.3.	Le panneau photovoltaïque	9
I.4.4.	Le champ photovoltaïque	9
I.4.5.	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	9
I.4.6.	La cellule photovoltaïque	11
I.5.	Les différentes technologies	11
I.5.1.	Principaux types de cellule	12
I.5.2.	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	15
I.6.	La mise en série et en parallèle des cellules photovoltaïques	16
I.7.	Les différents systèmes photovoltaïques	17
I.7.1.	Systèmes photovoltaïques autonomes	17
I.7.2.	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	18

Sommaire

I.7.3. Systèmes hybrides	19
I.8. Fonctionnement et constitution d'un système photovoltaïque	19
I.8.1. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	19
I.9. Le stockage hybride (batterie et super condensateur)	21
I.10. Batteries	21
I.10.1. Le schéma de principe de fonctionnement d'une batterie est le suivant	22
I.10.2. Caractéristiques générales des batteries	22
I.11. Super condensateur	23
I.11.1. Structure et fonctionnement des super condensateurs	23
I.11.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs	24
I.11.3. Les avantages et les inconvénients	26
I.12. Comparaison entre les batteries et le super condensateur	27
Conclusion	28

Chapitre II

Modélisation des différentes parties du système étudié

II. Introduction	30
II.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque	30
II.2. Modélisation de la batterie	33
II.2.1. Modélisation de la batteries RC	33
II.2.2. Charge et décharge d'une batterie RC	34
II.3. Modélisation des Super condensateurs	36
II.3.1. Modèle de base RC	36
II.3.2. Modèle à deux branches de Zubieta	37
II.4. Les convertisseurs statiques	39
II.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)	39
II.4.2. Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage	40
II.4.3. Dimensionnement du champ photovoltaïque	41

Sommaire

II.4.4. Dimensionnement du stockage	41
II.5. Caractéristique du GPV	42
II.5.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV	44
II.5.2. Influence de l'ensoleillement	44
II.6. Maximum Power Point tracking (MPPT)	47
II.6.1. Introduction	47
II.6.2. Principe de fonctionnement	47
II.7. Les algorithmes MPPT	48
II.7.1. Méthode de conductance incrémentale (IncCond)	48
II.7.2. La méthode perturbation & Observation (PO)	49
II.7.3. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT P&O	52
Conclusion	54

Chapitre III

Evaluation et control du système étudié

III. Introduction	56
III.1. Étude d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec stockage par batterie	56
III.2. Gestion d'énergie du système photovoltaïque	58
III.2.1. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'été	60
III.3. Description du système	63
III.4. Stratégie de control de l'association batteries et super-condensateurs	66
III.5. Résultats de simulation	69
Conclusion	73
Conclusion Générale	74
Liste bibliographie	
Annexes	

Liste D'abréviation

Liste d'abréviation

Bus DC : Bus à courant continu.

CIEMAT : Centre de recherche énergétique environnementale et technologique (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas).

DC/DC : Convertisseur tension continu/continu.

EDC : Etat de charge

GPV : Générateur photovoltaïque.

IC : Conductance incrémentée.

IncCond : Incremental Conductance (Conductance Incrémentale)

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

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

PI : Proportionnel intégral.

PPM : Point de puissance maximal.

PV : Photovoltaïque.

SC : Super Condensateur.

SOC : State of charge (en français EDC : Etat de charge).

STC : Conditions standards de fonctionnement.

Liste des Symboles

Liste des symboles

ΔI : La variation du courant [A].

ΔP : La variation de la puissance [W].

ΔV : La variation de la tension [V].

ΔT_c : La variation de la température.

α_{cc} : Le coefficient d'incrémentation du courant [A/°C].

β_{c0} : Coefficient d'incrémentation de la tension [V/°C].

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

E_0 : Tension à vide de la batterie [V].

V_{batt} : Tension de la batterie [V].

G : L'irradiation solaire [W/m²].

G_{stc} : Insolation dans les conditions standards [W/m²].

I_{PV} : Courant photovoltaïque [A].

I_{ph} : Le photon courant de la cellule [A].

I_D : Courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV [A].

I_{mpp} : Courant à la puissance maximale [A].

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

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

P_{PV} : Puissance du Panneau photovoltaïque [W].

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

I_{PV} : Courant fournie par le générateur photovoltaïque [A].

I_c : Courant qui traverse la capacité [A].

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

Liste des Symboles

I_{ch} : Courant de la charge [A].

K : Constante de Boltzmann ($K=1.38 \text{ J/k}$) [J/k].

m : Facteur d'idéalité [-].

R_p : Résistance shunt (Parallèle) [Ω].

R_s : Résistance série [Ω].

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle.

T_{stc} : La température dans les conditions standards [$^{\circ}\text{C}$].

V_{dc} : La tension redressée [V].

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

V_{c0} : Tension en circuit ouvert [V].

I_{sc} : Courant de super-condensateurs [A].

R_1 : Resistance de la branche principale.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : généralité photovoltaïque et stockage hybride.

Figure I. 1: Le rayonnement solaire	6
Figure I. 2: Réponse spectrale d'une cellule (PV)	7
Figure I.3 : Module photovoltaïque	8
Figure I.4 : panneaux photovoltaïques	9
Figure I.5 : cellule, module, panneau et champ PV	11
Figure I.6: Silicium Monocristallin.	12
Figure I.7: Silicium Poly cristallin	13
Figure I.8: Silicium Amorphe.....	14
Figure I.9 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	16
Figure 1.10: Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.....	16
Figure 1.11: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques.....	17
Figure I.12 : Système PV autonome ou isolé.	18
Figure I.13: Système PV raccordé au réseau sans batterie	18
Figure I.14: Diagramme de Ragone qui compare divers système de stockage d'énergie. ..	21
Figure I.15 : Fonctionnement d'une batterie	22
Figure I.16: Structure d'un super condensateur.....	24
Figure I.17 : Schéma représentatif d'un super condensateur.....	24
Figure I.18 : Etêtent charge	25
Figure I.19: Etat déchargé	25
Figure I.20: Schéma comparatif	28

Liste des figures

Chapitre II : Modélisation des différentes parties du système étudié

Figure II.1 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode	31
Figure II .2 : Modèle R-C de la batterie	34
Figure II.3 : Courant de batterie	35
Figure II.4 : Tension des batteries dans le cas d'un changement d'échelle.....	35
Figure II.5 : Etat de charge des batteries dans le cas d'un changement d'échelle.....	35
Figure II.6 : Modèle de base de super condensateur – Profil de décharge à courant constant.....	37
Figure II.7 : Modèle électrique des super condensateurs	38
Figure II.8 : Système PV conçu autour d'un hacheur Boost	39
Figure II.9: Schema d'un hacheur Buck-Boost	40
Figure II.10 : Caractéristique : courant tension $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque.....	43
Figure II.11 : Caractéristique : puissance- tension $P(V)$ d'un panneau photovoltaïque.....	43
Figure II.12 : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque pour irradiation variable et $T_c = 25^\circ\text{C}$	44
Figure II.13 : Caractéristiques puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour irradiation variable et $T_c = 25^\circ\text{C}$	45
Figure II .14 : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0, 25, 50, 75, 100^\circ\text{C}$) et $G = 1000 \text{ w/m}^2$	46
Figure II.15 : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0, 25, 50, 75, 100^\circ\text{C}$) et $G = 1000 \text{ w/m}^2$	46
Figure II.16: Incrémentation de Conductance	48
Figure II.17: Algorithme d'incrémentation de la conductance.....	49
Figure II.18. Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO	50

Liste des figures

Figure II.19 : Organigramme de l'algorithme P&O	51
Figure II.20 : Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$)	52
Figure II.21 : Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).	52
Figure II.22 : Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$)	53
Figure II.23: Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$)	53

Chapitre III : Evaluation et control du système étudié

Figure III.1 : schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	56
Figure III.2 : Schéma du bus continu.	57
Figure III.3 : Block du diagramme de régulation de la tension de sortie du Buck-Boost. ..	58
Figure III.4 : Algorithme de gestion d'énergie du système photovoltaïque	59
Figure III.5: Profil de l'éclairement pendant une journée d'été.	60
Figure III.6: Profil de consommation	61
Figure III.7 Allure des tensions du bus continu et sa référence	61
Figure III.8: Tension aux bornes des batteries	61
Figure III.9: Etat de charge des batteries	62
Figure III.10 : Courant à dissiper dans une charge dérivative	62
Figure III.11: Allure des courants I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}	63
Figure III.12. Schéma de principe du stockage d'énergie photovoltaïque	64
Figure III.13: Schéma du bus continu	65

Liste des figures

Figure III.14:Schéma fonctionnel de la commande bus DC	66
Figure III.15 : Organigramme de la répartition des sources de référence du système de stockage sans stratégie de contrôle.....	67
Figure III.16 : Idref avec différente valeur de filtre.....	68
Figure III.17 : Isupref avec différente valeur de filtre	68
Figure III.18 : Ibattref avec différente valeur de filtre	69
Figure III.19: le courant Ipv.	69
Figure III.20: profile d'ensoleillement	70
Figure III.21: le courant Idc référence.....	70
Figure III.22: la tension de Bus-continu Vdc	70
Figure III.23 : courant de batterie et sa référence.....	71
Figure III.24: courant de super-condensateurs et sa référence	71
Figure III.25: état de charge de batteries	71
Figure III.26: état de charge de super-condensateurs	72
Figure III.27: les courants Idref, Ibattref, Isref	72

Introduction Générale

Introduction Générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être. [3]

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années les systèmes photovoltaïques sont celles qui possèdent les énergies spécifiques les plus élevées, D'ici une vingtaine d'années, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Pour parvenir à cet objectif, il faudra s'affranchir des deux principaux problèmes liés à la production d'énergie photovoltaïque en site isolé qui sont la difficulté de fonctionnement

Suivant un point optimal et le stockage efficace de l'énergie produite. En effet, du fait du caractère non linéaire de la caractéristique des panneaux photovoltaïques, leur tension dépend fortement de la charge connectée. Pour corriger ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance. S'agissant du problème lié au stockage, l'utilisation des batteries au plomb est très répandue dans le domaine et permet d'atteindre un rapport performance/cout assez intéressant. [1]

Malheureusement lorsque ces derniers sont soumis à des conditions d'utilisation extrêmes (fort courant de décharge par exemple), leur performance se dégrade rapidement. Des lors, l'utilisation d'une source hybride de stockage s'avère judicieuse ; les batteries seront dédiées à leur rôle traditionnel de stockage et de fourniture d'énergie tandis que la source associée permettrait de faire face aux forts appels de courant. Des travaux dans le domaine des stockages hybrides ont permis de montrer que les super-condensateurs sont des composants parfaitement adaptés à cette technique. [2]

Pour cela nous intéressons dans le cadre de ce travail à l'étude d'un système photovoltaïque autonome alliant un algorithme MPPT optimisé et une source de stockage

Introduction Générale

hybride efficace (batteries, super-condensateurs).Le présent travail est subdivisée en trois chapitres.

Dans le chapitre 1, nous rappellerons des généralités sur l'énergie solaire et le système photovoltaïque aussi nous définirons les composants de notre système.

Dans le 2^{ème} chapitre nous allons modéliser les différents composants de notre système le module photovoltaïque, la batterie et le super condensateur de stockage, les convertisseurs d'énergie, nous présenterons aussi un dimensionnement pour le champ photovoltaïque et le stockage par batteries.

Enfin, pour finir, nous présenterons dans le chapitre III, la conception et la simulation d'un banc photovoltaïque énergétiquement autonome d'une puissance de 17080 W avec un stockage hybride compose de batteries et de super-condensateurs , nous allons voir le fonctionnement des composants pour une simulation de 24 h, sous un ensoleillement et un profil de charge variable et finalement, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale qui résume notre travail dans sa partie théorique et simulations des résultats aussi quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

Chapitre I
Généralité
photovoltaïque et stockage
hybride

Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique par intermédiaire des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. 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. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage).

La nature des besoins et du type d'applications des énergies stockées exige la diversification des moyens de stockage.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir l'énergie photovoltaïque et le stockage hybride (batterie et super condensateur).

I.1. Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière.

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [4].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de *Bell Laboratoires* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires [4].

La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [4].

I.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium recouvert d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, c'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et libèrent un courant électrique continu. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

I.3. Rayonnement solaire

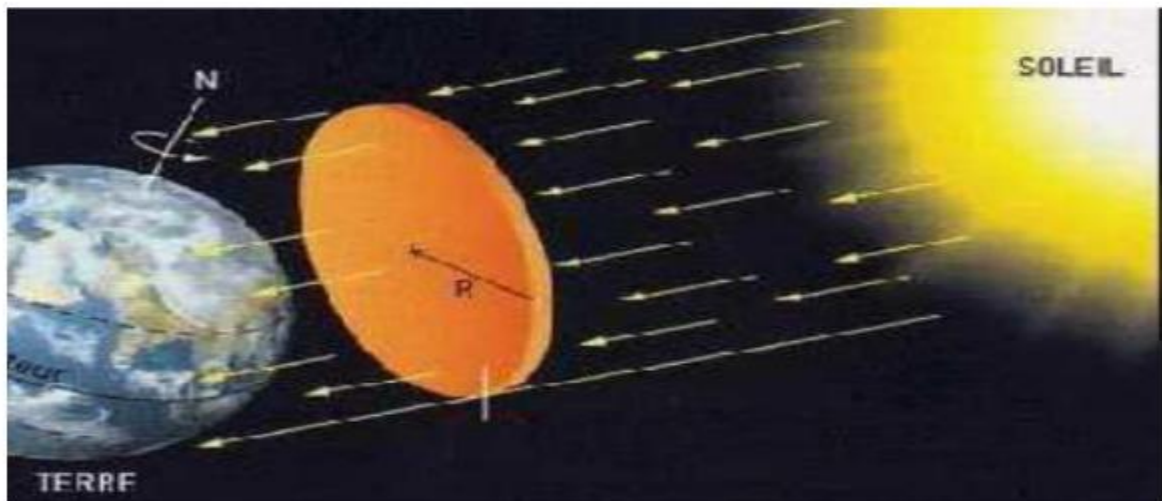


Figure I. 1:Le rayonnement solaire

La couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante d'ordre de 180.10^6 GW malgré la distance énorme entre le soleil et la terre (150.10^6 Km), c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie.

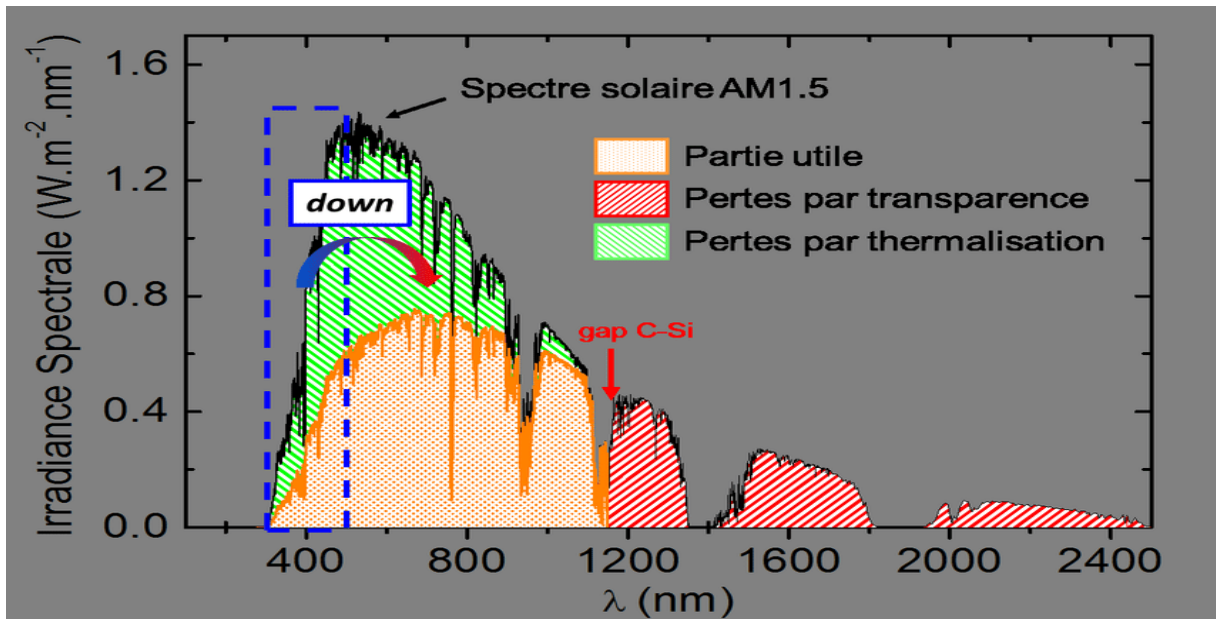


Figure I.2: Réponse spectrale d'une cellule (PV) [5].

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$, l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m^2 .

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui a une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité, ...etc.), [5].

I.4. Les différents types de rayonnement solaire

a. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [6].

b. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste [6].

c. Le rayonnement global

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct [6].

I.4.1. Le module PV

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées tels que la puissance, le courant de court circuit et la tension en circuit ouvert [7].

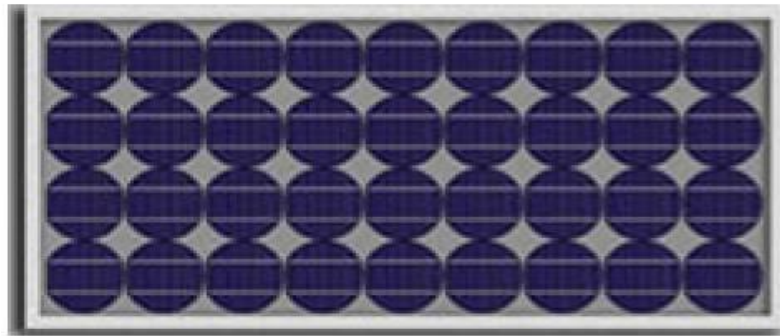


Figure I.3: Module photovoltaïque [8].

I.4.2. Caractéristiques d'un module

- **La puissance de crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$).
- **Tension à vide V_{oc}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil".
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".c'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle $V_{pv} = 0$
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$.
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance

maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} * I_{cc}$. [9]

I.4.3. Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [11] Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure (I.4). [10]



Figure I.4 : panneaux photovoltaïques

I.4.4. Le champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser en série et en parallèle, on part de la tension nominale à atteindre que l'on divise par la tension au point de puissance maximale d'un panneau. [12]

I.4.5. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

➤ Les avantages

D'abord, une haute fiabilité

- Elle ne comporte pas de pièces mobiles
- Qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées;

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de très grandes puissances ;

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entre tiens réduits et ils nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [13]

➤ **Les inconvénients**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est

Nécessaire, le coût du générateur est accru. [13]

I.3. Le générateur photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste à une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs [14].

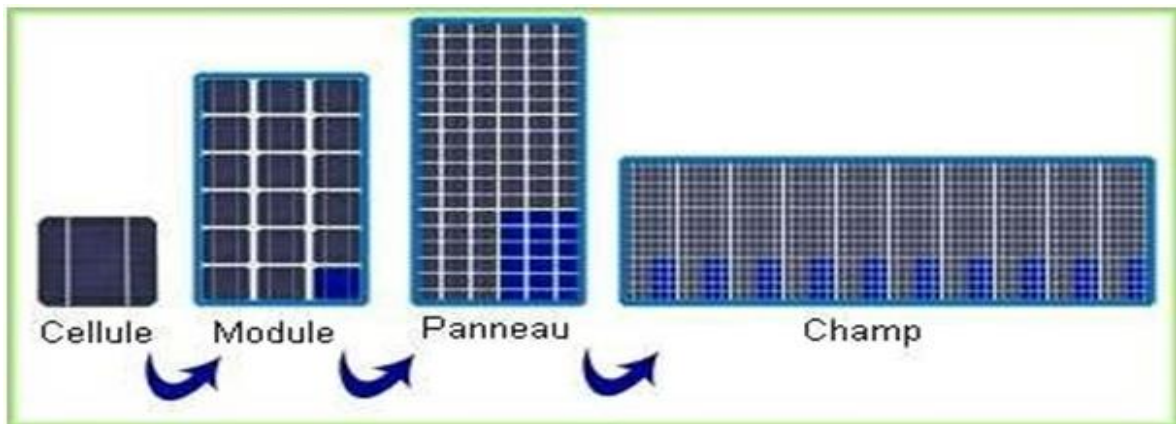


Figure I.5 : cellule, module, panneau et champ PV

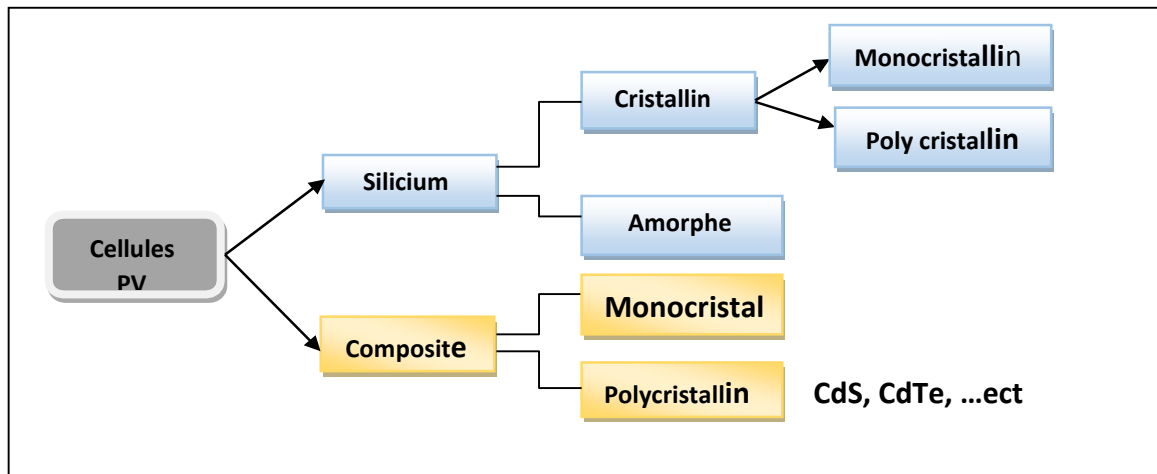
I.4.6. La cellule photovoltaïque

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. [15]

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure cadmium (Cds) ou de tellure de cadmium (CdTe). Le matériau le plus utilisé pour les cellules solaires dites photovoltaïques, jusqu'à présent, notamment pour le terrestre reste le silicium (Si) sous de nombreuses formes (cristallin, multi cristallin, amorphe, en couche mince,...etc.) en raison de son faible coût. [16]

I.5. Les différentes technologies

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS



I.5.1. Principaux types de cellule

Les cellules photovoltaïques peuvent être constituées avec des différents semi-conducteurs. Actuellement, le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans les cellules photovoltaïques est les siliciums, ce dernier présente l'essentiel de la production mondiale des cellules PV, il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Selon la nature, on peut distinguer trois types de cellules photovoltaïques:

a. Silicium monocristallin

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 12 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie. [17]



Figure I.6: Silicium Monocristallin

➤ **Avantage :**

-Rendement électrique des panneaux : 12 à 16 %STC.

-Puissance des panneaux : 5 à 150Wc

-Gamme d'éclairement : 100 à 1000W/m².

-Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

➤ **Inconvénients :**

-Première génération de photopiles.

-Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

-Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

-Rendement faible sous un faible éclairement [18].

b. Silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines. [17].

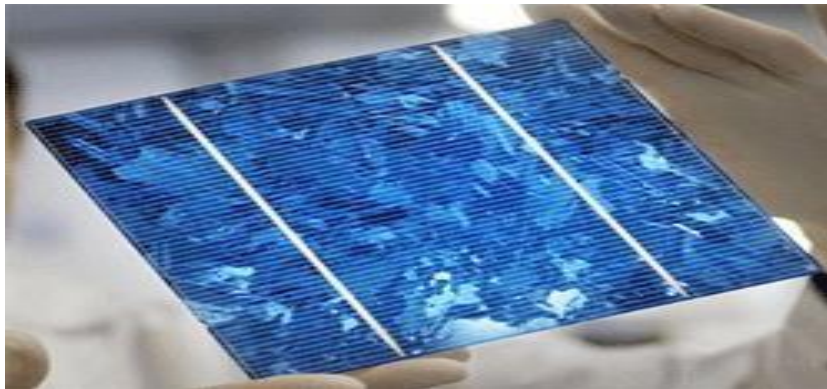


Figure I.7 : Silicium Poly cristallin.

➤ **Avantage**

-Rendement électrique des panneaux : 11- 13 %STC.

-Puissance des panneaux : 5 à 150Wc.

-Gamme d'éclairement : 200 à 1000W/m².

-Usage identique à celui du silicium cristallin.

-Adapté à la production à grande échelle.

➤ **Inconvénient :**

Rendement faible sous un faible éclairement, inférieur au monocristallin [18].

C. Silicium amorphe

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. À l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10 %), mais la technologie évolue rapidement. Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificielle de 20 à 3000 lux) [17].

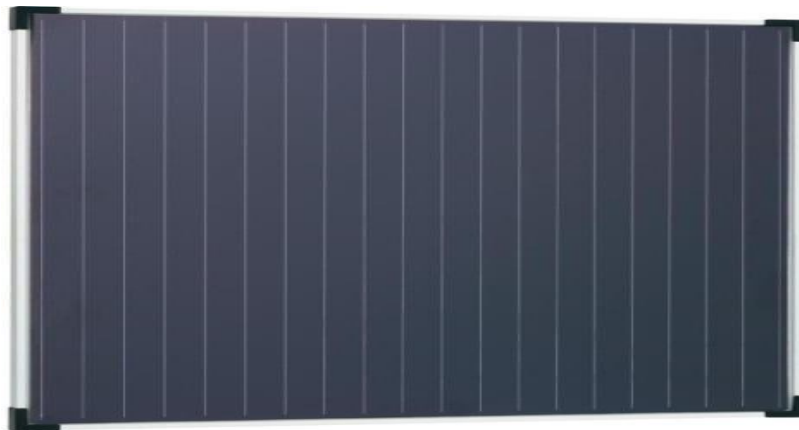


Figure I.9: Silicium Amorphe

➤ **Avantage**

-Rendement électrique des panneaux : 5- 7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi-jonctions»).

-Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).

-Usage: électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes.

-Un peu moins chère que les autres technologies.

-Fonctionnent avec un éclairement faible même avec un temps couvert.

➤ **Inconvénients :**

-Rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7%.

-Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin.

-Performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6mois), puis est stabiliser ensuite (10à20% selon la structure de la jonction) [18].

I.5.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est illustré dans la figure (I.10). La structure la plus simple d'une cellule PV se compose de deux couches minces de semi-conducteur dopés différemment, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type N et l'autre de type P et inversement, c'est à la jonction de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Cette jonction est la jonction PN qui représente le cœur de la cellule photovoltaïque. [19][20]

La cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, un photon incident dans la jonction P-N arrache un électron et crée ainsi un couple libre d'électron-trou. Sous l'effet du champ électrique, les électrons s'accumulent dans la couche dopée N, alors que les trous s'accumulent dans la couche dopée P. Cette réaction entraîne alors une différence de répartition de charges créant ainsi une différence de potentiel électrique entre les deux couches de la cellule, c'est l'effet photovoltaïque [21]. En conséquence, un courant électrique peut circuler en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur. [19]

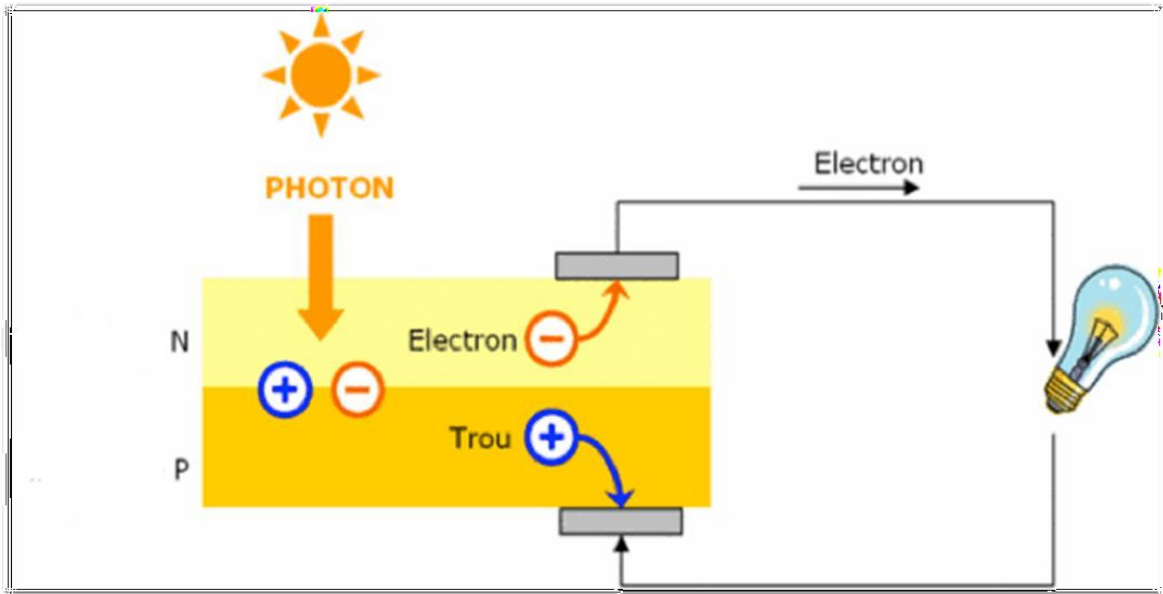


Figure I.10 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [22].

I.6. La mise en série et en parallèle des cellules photovoltaïques

➤ La mise en séri

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. [23]

La **figure (1.11)** montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

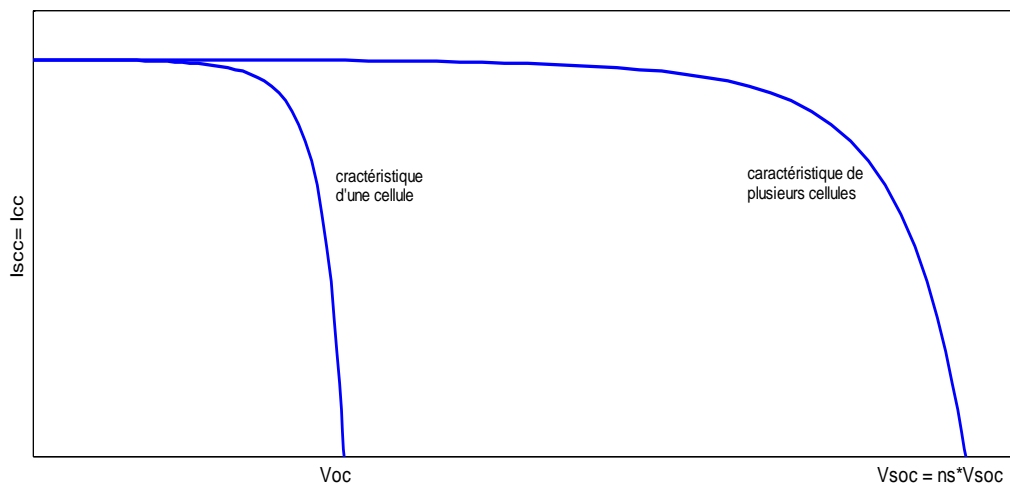


Figure 1.11: Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques

➤ **La mise en parallèle :**

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [23].

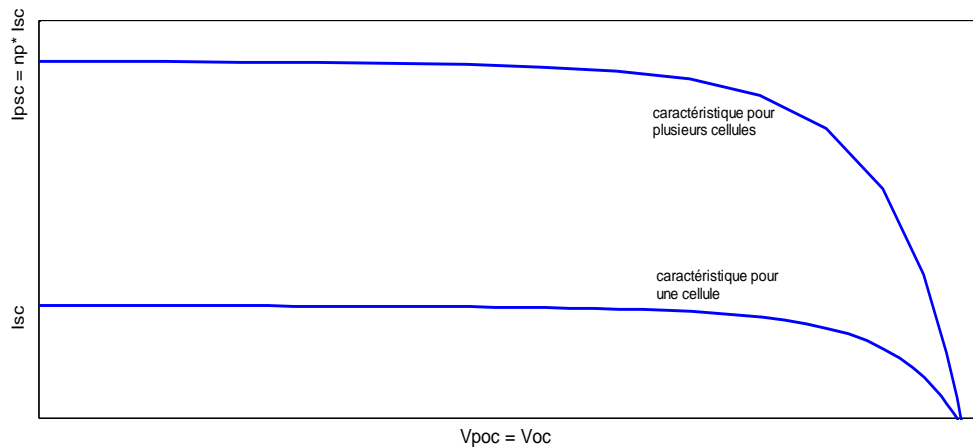


Figure 1.12 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques

I.7. Les différents systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont trois types :

I.7.1. 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. [24]

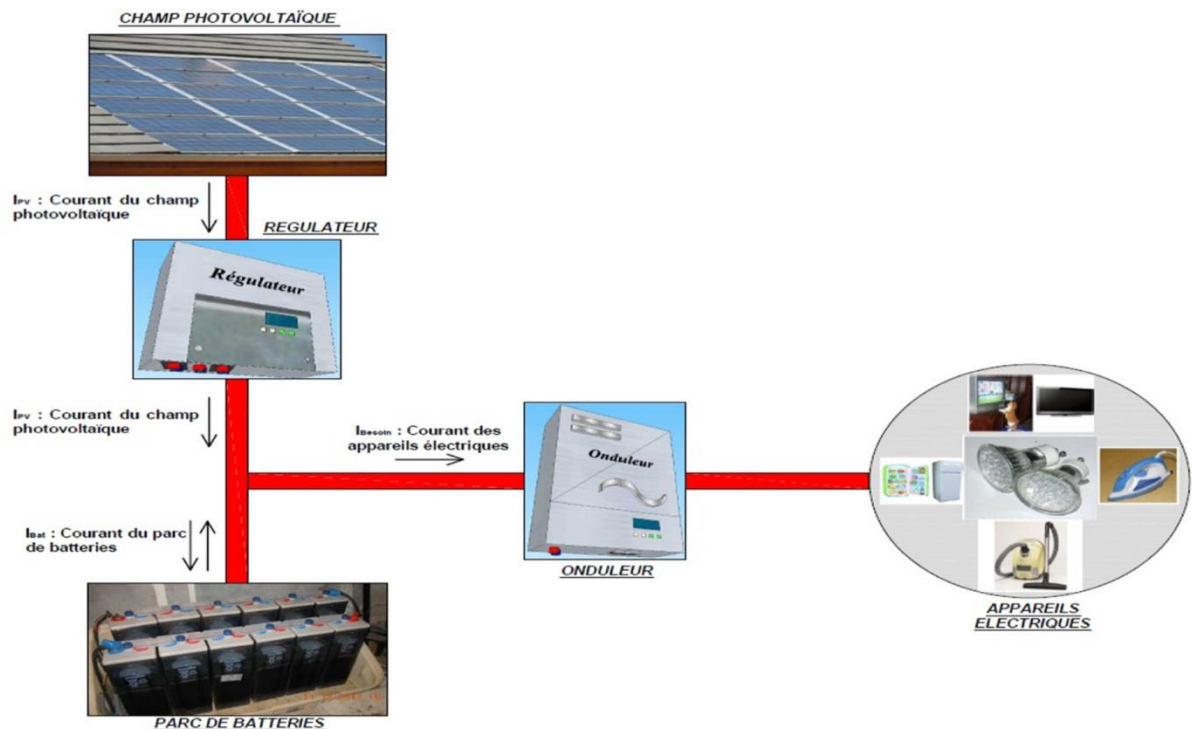


Figure I.13 : Système PV autonome ou isolé

I.7.2. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu – courant alternatif (CC-CA). 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 [24].

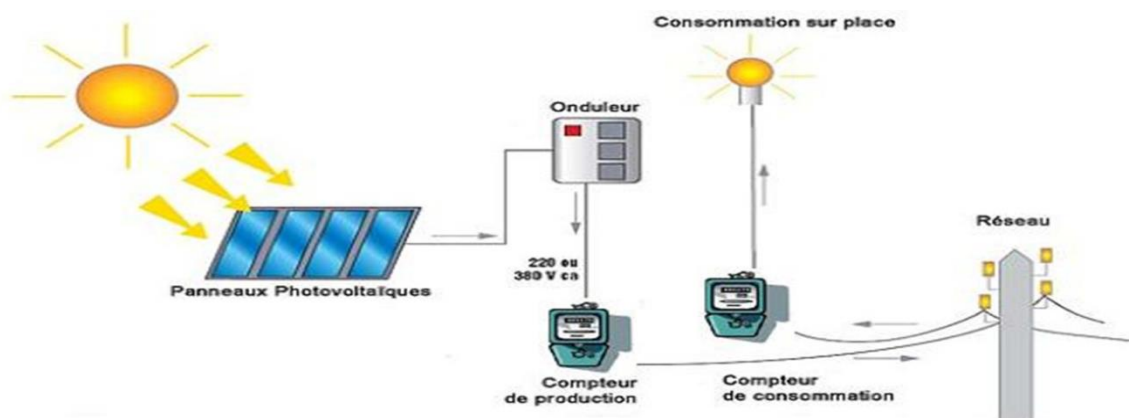


Figure I.14 : Système PV raccordé au réseau sans batterie

I.7.3. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. [24]

I.8. Fonctionnement et constitution d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation conçu pour fournir l'énergie électrique au moyen du photovoltaïque, cet ensemble de dispositifs est constitué généralement de ces éléments suivants [25] :

- Le champ photovoltaïque, composé d'un ensemble de module orientés et interconnectés en série et en parallèle, qui recueillent les radiations lumineuses du soleil et les transforment en courant continu à basse tension.

- Un accumulateur, qui stock l'énergie produite par le générateur et permet de disposer de courant électrique pendant la nuit ou les jours nuageux.

- Un régulateur de charge, c'est un dispositif électronique qui surveille l'état de charge des accumulateurs, il les protège contre les surcharges et les décharges profondes.

- Un convertisseur à pilotage MPPT, c'est un dispositif électronique qui assure que le système travail toujours à puissance maximale.

- Un onduleur, est un dispositif électronique qui assure la conversion de la tension continue d'entrée en tension alternative de sortie.

- Charge : l'utilisation (consommateur). [25]

I.8.1. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

➤ **Avantage:**

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.

- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillant cependant de longues périodes.

- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.

- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.

- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.

- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

- Ils ont une longue durée de vie.

- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés. [26]

➤ **Inconvénients :**

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.

- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,

- ils sont tributaires des conditions météorologiques.

- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif [26].

I.9. Le stockage hybride (batterie et super condensateur)

L'électricité ne peut être stockée facilement et nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie (chimique, thermique, potentielle, mécanique, etc...). Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable. Il y a plusieurs méthodes de stockage d'énergie pouvant être différenciées en deux catégories. [27]

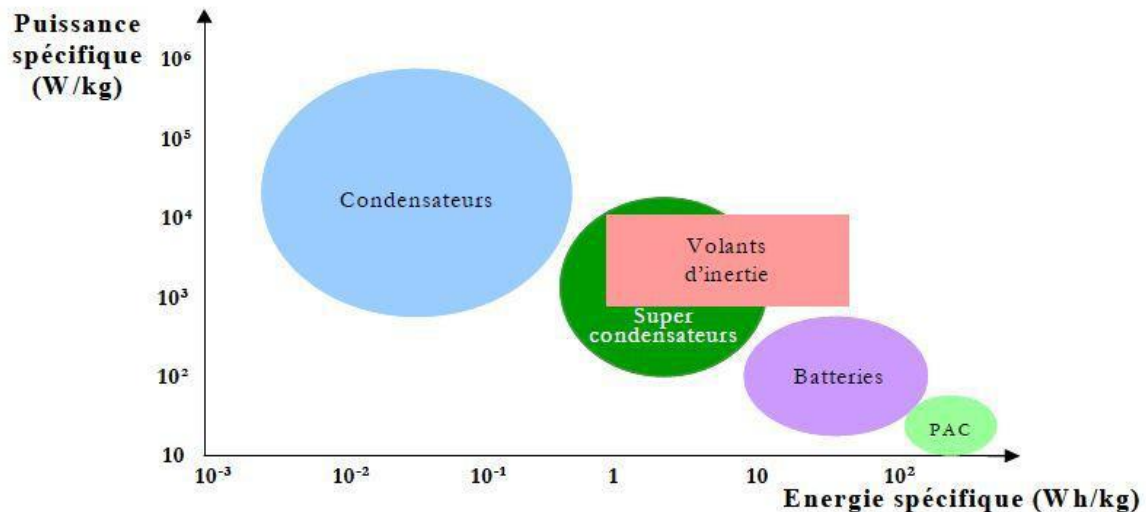


Figure I.15: Diagramme de Ragone qui compare divers système de stockage d'énergie [28]

- **Stockage à long terme** : (les batteries) : Le stockage court terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage –déstockage est comprise entre quelques fractions de seconde et quelques heures.

- **Stockage à court terme** (les supercondensateurs) : Le stockage long terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage –déstockage est compris entre quelques heures à plusieurs jour voir quelque moi.

I.10. Batteries

Une batterie ou un accumulateur électrochimique est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de décharge. C'est la modification chimique d'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie.

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. [29]

I.10.1. Le schéma de principe de fonctionnement d'une batterie est le suivant

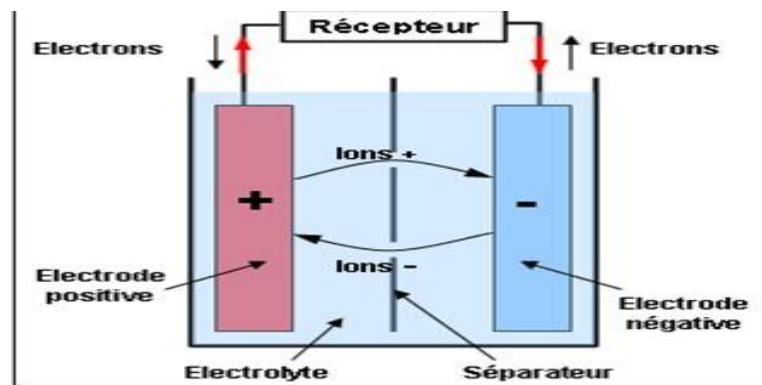


Figure I.16 : Fonctionnement d'une batterie

Il existe différents types de batteries, on peut citer :

- La batterie plomb acide
- La batterie nickel cadmium
- La batterie sodium chlorure de nickel
- La batterie lithium-ion
- La batterie zinc air

I.10.2. Caractéristiques générales des batteries

Les accumulateurs destinés aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités suivantes :

- être robustes
- avoir un bon rendement de charge et de décharge

- avoir une faible résistance interne
- avoir un taux d'autodécharge faible
- Maintenance réduite
- posséder une grande réserve d'électrolyte
- avoir une durée de vie importante
- être aptes aux Cyclades (on entend par *cycle*, la décharge de la batterie, quel que soit la profondeur de décharge, suivie d'une recharge

Dans ce travail notre choix se porte sur les batteries plomb acide vue aux avantages qu'elles présentent:

- Prix qui revient moins cher que les autres types de batteries.
- Elles sont solides
- Capable de fournir des courants élevés
- Sans effet mémoire [30].

I.11. Super condensateur

Un super-condensateur appelé aussi super-capacité ou condensateur à double couche, stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique. L'histoire de ce composant débute avec la découverte du phénomène capacitif par Hermann Von Helmholtz en 1853. Les premiers supercondensateurs étaient commercialisés par NEC dans les années 70, sous la dénomination de super-capacitors [31]. Avec les supercondensateurs, il est possible d'obtenir des capacités surfaciques élevées et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacité. Ceci fait des supercondensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint.

I.11.1. Structure et fonctionnement des super condensateurs

La structure élémentaire d'un super condensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un zéro électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (**Fig. I.17**). L'assemblage de l'ensemble est réalisé comme pour les condensateurs classiques [32].

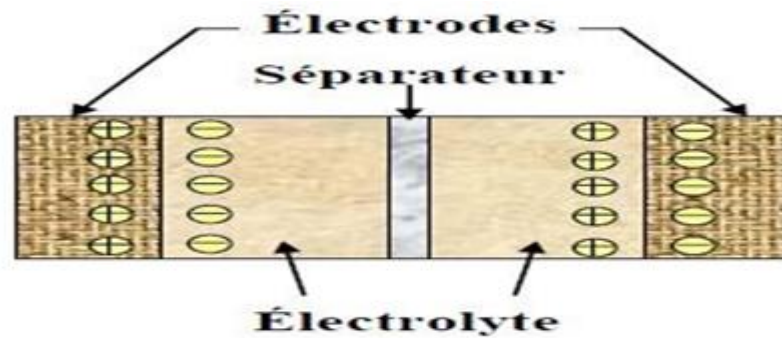


Figure I.17: Structure d'un super condensateur

Un super condensateur peut être schématisés par deux capacités représentatives des Charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (**Fig. I.18**) [33].

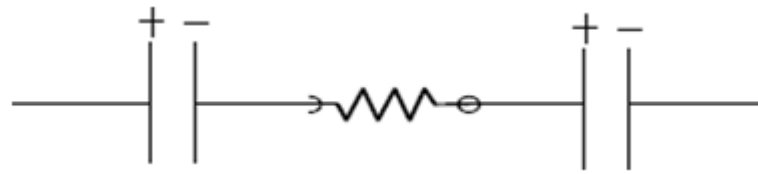


Figure I.18 : Schéma représentatif d'un super condensateur

I.11.2. Principe de fonctionnement des super condensateurs :

Le principe général de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge) : [34]

A) Etat en charge :

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du super condensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel. (**Fig. I.19**)

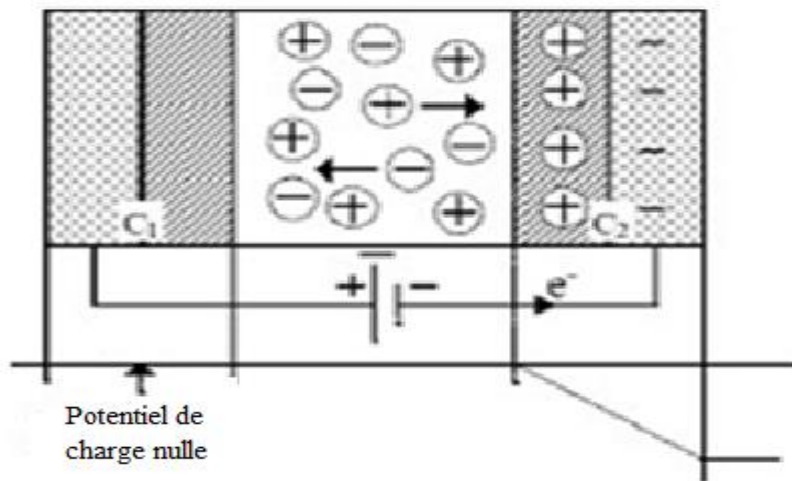


Figure I.19 : Etêtent charge

B) Etat déchargé :

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q_{el}) que du côté de l'électrolyte (q_{ion}). q_{el} et q_{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électro neutralité impose $q_{el} = -q_{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres). (Fig. I.20)

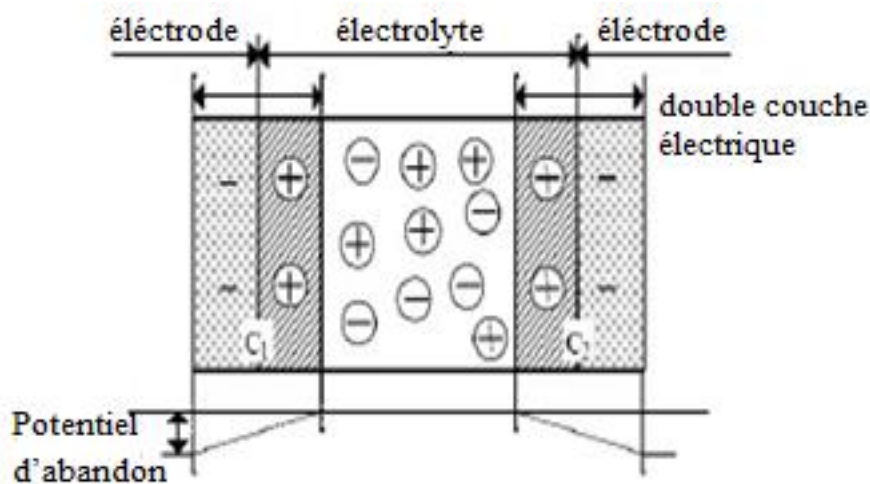


Figure I.20: état déchargé

I.11.3. Les avantages et les inconvénients

❖ Les avantages

- Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques.

- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques.

- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides.

- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement).

- ESR (résistance série) très basse.

- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée).

- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel.

- Charge très rapide. [35]

❖ Les inconvénients :

- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg).

- Plage de tension limitée.

- Technologie moins mûre que celle des batteries.

- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques.

- Energie spécifique plus faible que celle des batteries.

- Le coût. [35]

I.12. Comparaison entre les batteries et le super condensateur

Les batteries et les supercondensateurs ont des caractéristiques électriques Extrêmement différentes.

	Batterie	Super-condensateurs
Temps de charge t	1 heure<t<5 heures	1s<t<30s
Temps de décharge	0.3 heure<3 heures	1s<t<30s
Rendement charge/décharge	entre 70% et 85%	entre 85% et 98%
Densité de puissance (W/kg)	<10³	10⁴
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 10 et 100	entre 1 et 10
Durée de vie nombre de cycles	10³	10⁶

Tab I.1 : Comparaison entre la batterie et le Super-condensateurs.

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le super-condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Le super-condensateur a déjà pris place dans la voiture pour la récupération d'énergie et pas seulement dans les véhicules électriques. En effet, les supercondensateurs sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se charger et se décharger très rapidement, le super-condensateur se présente comme une batterie ultra-rapide et fiable. [36]

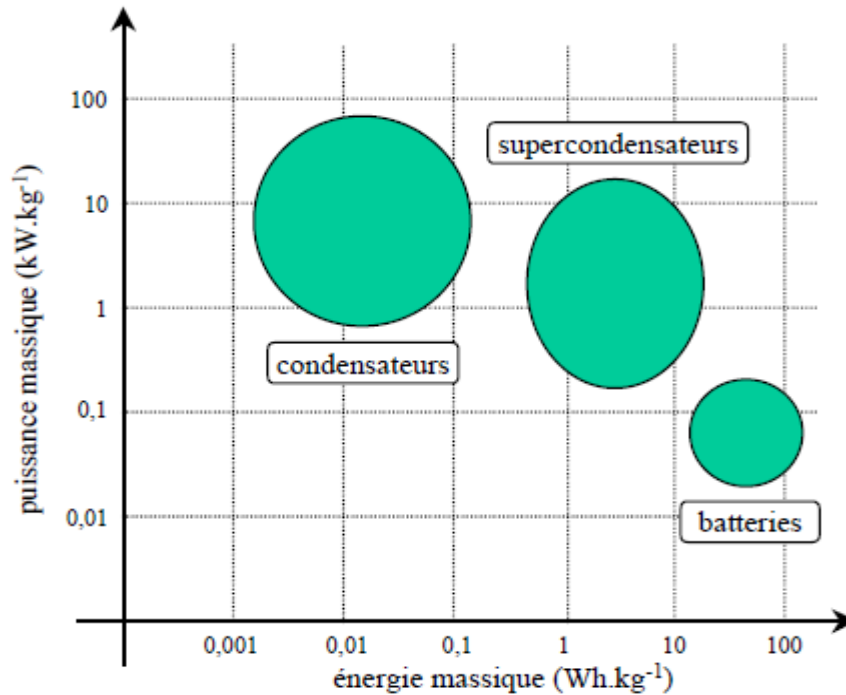


Figure I.21: Schéma comparatif

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu générale sur la technique de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique basant sur les cellules photovoltaïques, pour cela nous avons présenté les différents types de système photovoltaïque et le fonctionnement des éléments appartiens au chaine de conversion de ce système et y compris le stockage hybride qu'on a utilisé plus précisément batterie et super condensateur. 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 chaine de conversion et le stockage ainsi l'évaluation et le control de tout le système dans les chapitres suivants.

Chapitre II
Modélisation des
différentes parties du
système étudié

Introduction

Dans ce chapitre nous allons détailler le concept GPV, on présente et on modélise les différents composants de système PV et la régulation utilisé (mppt) aussi le stockage (batterie, super-condensateurs), nous allons aussi dimensionner le champs pv et le stockage ensuite nous étudions les caractéristiques de notre panneau photovoltaïque en différents conditions climatique, nous précédons à la caractérisation sans régulation puis avec l'adaptation de l'énergie récupéré du panneau photovoltaïque.

II.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque :

Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la performance des générateurs PV sont basées sur les caractéristiques courant-tension et puissance. Dans la littérature on trouve de nombreux modèles mathématiques pour représenter le comportement fortement non linéaire d'une cellule photovoltaïque.

Parmi ces modèles on trouve:

- **Le modèle idéalisé:** c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_p étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (négligé), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposé être nul ($R_s = 0$).
- **Le modèle à une diode :** pour tenir compte des chutes de tension dans les zone P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_p .
- **Le modèle à deux diodes :** une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons. [37]

Pour modéliser un générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire (ou d'un panneau) [38].

Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de cette caractéristique. Nous avons choisi un modèle simplifié, qui est un modèle à cinq paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp} , R_s), qui tient compte

de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques. Ce modèle est caractérisé par son schéma équivalent (figure II.1) :

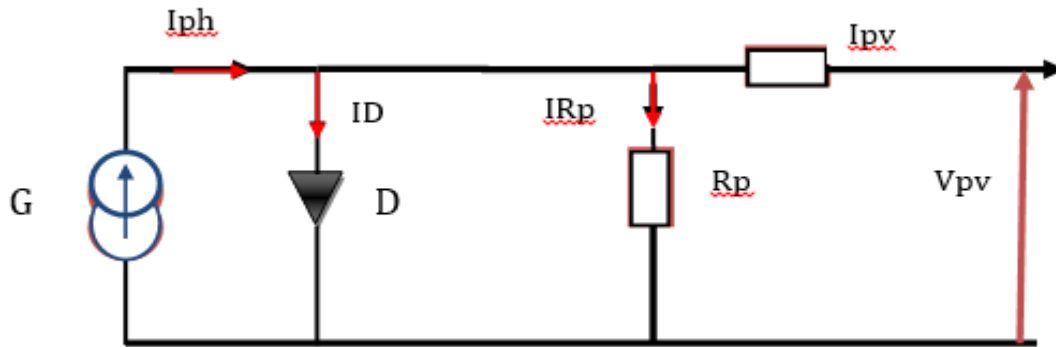


Figure II.1 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode

D'après la figure (II.1), le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque sous les conditions

Standards de fonctionnement, est donné par l'équation (II.1) :

$$I_{pv} = I_{Ph} - I_D - I_p \dots\dots\dots(II.1)$$

L'expression (II.1) s'écrit aussi de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot [1 - K_1 \cdot (e^{k_2 v_p^m} - 1)] \dots\dots\dots(II.2)$$

Dans cette équation, le courant I_{pv} dépend des paramètres K_1 , K_2 , m et de la tension aux bornes du générateur PV. Les coefficients K_2 , K_3 et K_4 sont donnés par les équations suivantes :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{k_4}{v_{co}^m} \dots\dots\dots(II.3)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc} \cdot (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}} \right] \dots\dots\dots(II.4)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + k_1}{k_1} \right] \dots\dots\dots(II.5)$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{k_3}{k_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}\right]} \dots\dots\dots (II.6)$$

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.

I_{cc} : Courant de court circuit. V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable que pour un niveau d'ensoleillement G_{STC} et de température particulière ($G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC} = 25 \text{ °C}$). Relatifs aux conditions standards de fonctionnement (STC). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{STC} \dots\dots\dots (II.7)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1\right) \cdot I_{cc, STC} \dots\dots\dots (II.8)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec :

G_{STC} et G : Représentent respectivement, l'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

T_{STC} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

β_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv, \text{ nouv}} = V_{pv, \text{ STC}} + \Delta V_{pv} \dots \dots \dots (II.10)$$

$$I_{pv, \text{ nouv}} = I_{pv, \text{ STC}} + \Delta I_{pv} \dots \dots \dots (II.11)$$

Les paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) du module sous les conditions standard de fonctionnement c'est-à-dire ($G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC} =25 \text{ }^\circ\text{C}$) sont fournis par les constructeurs de panneaux photovoltaïques. Chaque groupe de panneau est une association série-parallèle de N_s , N_p cellule élémentaires. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons un GPV, selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées.

II.2. Modélisation de la batterie

La batterie joue un rôle important en termes de stockage dans le cas le plus général, mais spécialement dans les installations photovoltaïque autonome. Les modèles les plus utilisés dans la littérature sont généralement le modèle R-C, qui est un modèle électrique simple, et le modèle dit « CIEMAT » [39].

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 [40]. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, nous utiliserons pour notre étude, le modèle R-C, dit aussi modèle simple, qui nécessite pas d'identifications expérimentales de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe.

II.2.1. Modélisation de la batteries RC

Le modèle R-C comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant une capacité interne de la batterie C_{batt} et une résistance interne R_s [41].

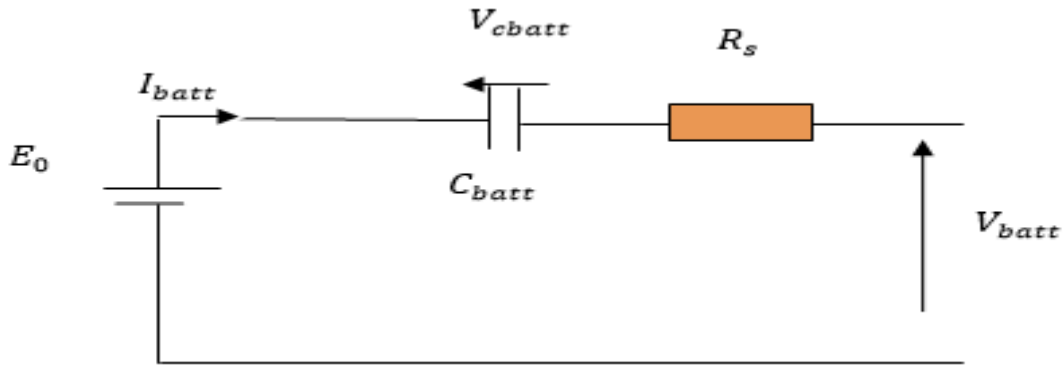


Figure II.2 : Modèle R-C de la batterie

D’après le schéma équivalent en utilisant lois des mailles on obtient :

$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot I_{batt} - V_{cbatt} \dots\dots\dots (II.12)$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \int Idt \dots\dots\dots (II.13)$$

Avec :

C_{batt} : La capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} .

II.2.2. Charge et décharge d’une batterie RC

Le but de notre étude est de rendre compte du comportement d’un système PV autonome sur plusieurs jours tout en tenant compte de toutes les sollicitations de la charge. L’importance que revêt la robustesse des convertisseurs nous oblige donc à tenir compte de la fiabilité de leur boucle de commande lors des simulations. Malheureusement en imposant un pas de calcul de l’ordre du temps de commutation des interrupteurs, le temps de calcul d’une simulation de quelques heures serait de plusieurs jours. Afin de nous dispenser de cette contrainte, nous avons procédé à un changement d’échelle du temps en faisant correspondre la seconde à l’heure.

Résultat de simulation de la batterie R-C : Réponse en tension et état de charge de la batterie dans le cas d’un changement d’échelle (pas de simulation de 5.10-6s).

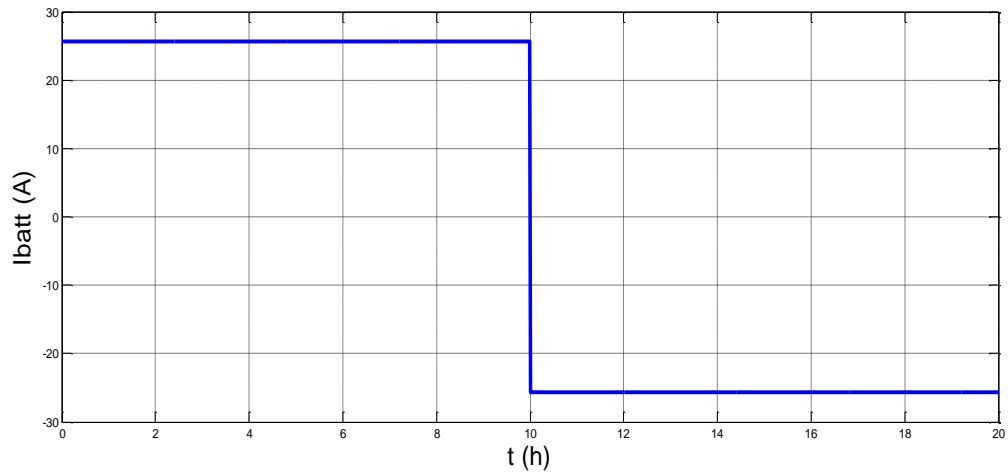


Figure II.3 : Courant de batterie

Les figures (II.4), et (II.5) montrent les résultats de simulation de charge et décharge des batteries.

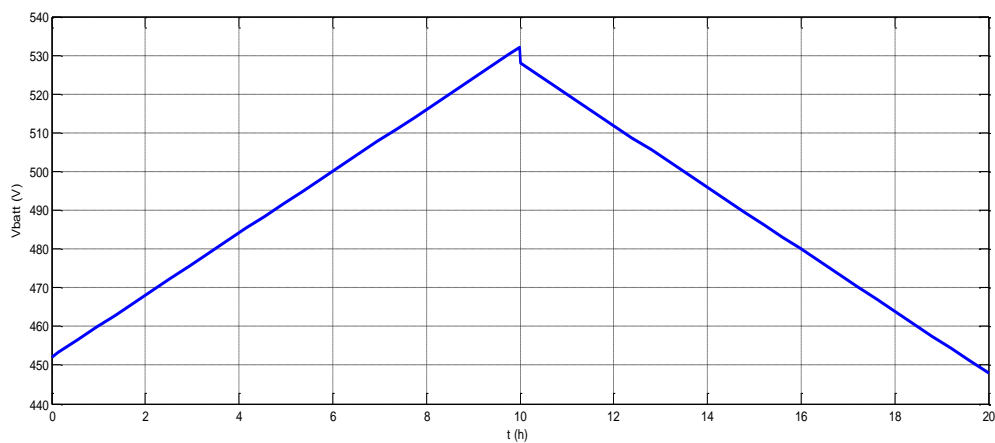


Figure II.4 : Tension des batteries dans le cas d'un changement d'échelle

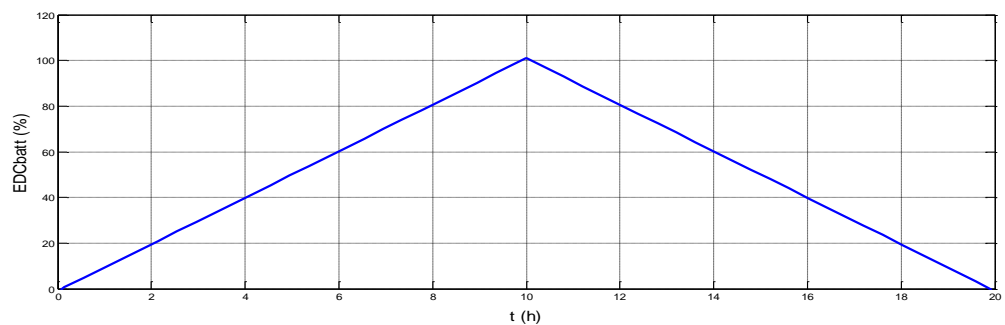


Figure II.5 : Etat de charge des batteries dans le cas d'un changement d'échelle

II.3. Modélisation des Super condensateurs

Face aux dynamiques lentes et aux risques d’usure prématurée des batteries, nous avons décidé d’ajouter une unité de stockage secondaire au système, destinée à absorber ou fournir les pics de puissance. La technologie des super condensateurs a ainsi été choisie ; plusieurs modélisations peuvent les caractériser.

D’autres auteurs se basent sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental. C’est le cas de R. Bonert et L. Zubieta qui exposèrent le premier véritable modèle de super-condensateur de puissance. Ce modèle dit a deux branches, repose sur la répartition de l’énergie électrostatique des super-condensateurs en deux :

- Une énergie rapidement stockée ou disponible.
- Une énergie lentement stockée ou disponible.

II.3.1. Modèle de base RC

Le modèle le plus simple est celui proposé en général par le constructeur, il s’agit d’un circuit RC en série. R représente la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet Joule dans le super condensateur et C la capacité principale du super condensateur. 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 super-condensateur. La résistance série est déterminée à partir de la variation de la tension au début de la charge ou de décharge suite à une application d’un courant de charge/décharge constant

$$R_s = \frac{V_r}{I} \dots\dots\dots (II.14)$$

$$C_1 = C_0 + C_v \cdot V_1 \dots\dots\dots (II.15)$$

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 super-condensateur est assimilé à celui d’un condensateur classique (capacité constante en fonction de la tension). La capacité C est déterminée directement à partir de la caractéristique de la réponse suite à une décharge à courant constant de la cellule (Figure II.6).

Elle vaut :

$$C = \frac{I}{\frac{v_c}{t_d}} \dots\dots\dots (II.16)$$

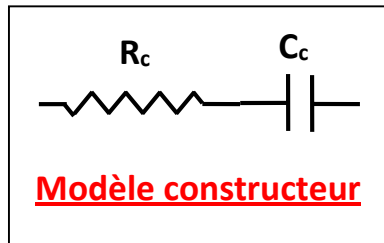


Figure II.6 : Modèle de base de super condensateur – Profil de décharge à courant constant

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

II.3.2. Modèle à deux branches de Zubieta

Dans la référence [42] les auteurs proposent à partir du profil de charge à courant constant d’une cellule de super condensateur un modèle appelé modèle à deux branches. Il s’agit de représenter le comportement du super condensateur à l’aide de deux circuits RC. Le premier circuit R_c représente une énergie rapidement stockée et la deuxième cellule RC correspond à une énergie lentement stockée et représente en principe le phénomène de redistribution des charges à la fin de chaque charge ou décharge du super condensateur (Figure II.7). Durant les opérations de charge/décharge, la branche lente est considérée inactive du fait de la constante de temps R_2C_2 qui est beaucoup plus grande que R_1C_1 .

On obtient donc un modèle à deux cellules R_c qui décrit l’évolution de l’énergie électrostatique stockée dans le super condensateur.

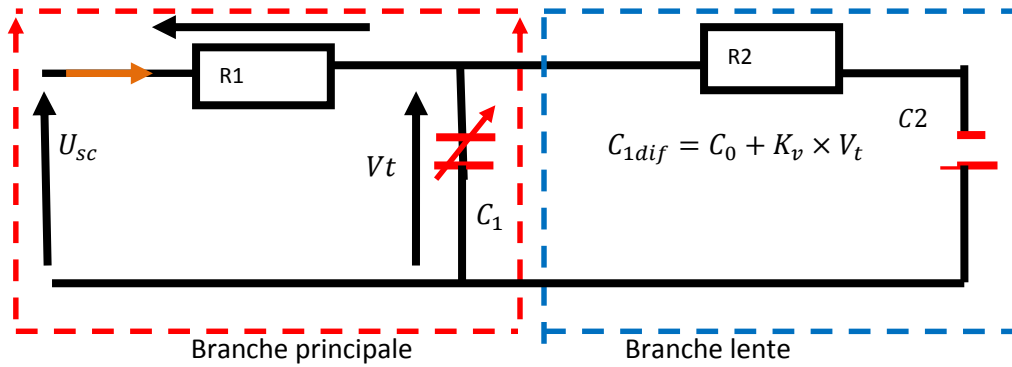


Figure II.7 : Modèle électrique des super condensateurs

La branche R_1C_1 détermine le comportement immédiat du super-condensateur lors de cycles de charge et décharge rapide en quelques secondes, la branche R_2C_2 est la branche lente. Il complète la première cellule longue durée de l'ordre de quelques minutes et décrit la distribution d'énergie interne en fin de charge ou décharge. Durant les opérations de charge/décharge, la branche lente est considérée inactive du fait de la constante de temps R_2C_2 qui est beaucoup plus grande que R_1C_1 .

En négligeant le courant de fuite, le circuit équivalent du super-condensateur donne par l'équation suivante :

$$U_{SC} = N_{SSC} \cdot V_{SC} \dots\dots\dots (II.17)$$

$$U_{SC} = N_{SSC} \cdot V_1 + R_1 \frac{I_{SC}}{N_{PSC}} \dots\dots\dots (II.18)$$

Dont U_{SC} et I_{SC} sont respectivement la tension et le courant du pack SC ; V_{SC} et I_{SC} sont respectivement la tension et le courant élémentaires du SC.

N_{pSC} Et N_{sSC} sont le nombre de connexions parallèles et en série des connexions SC. La tension v_2 est donnée par :

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_1} \int \frac{1}{R_2} (V_1 - V_2) dt \dots\dots\dots (II.19)$$

Le courant i_1 est exprimé en terme de charge instantané Q_1 et C_1 comme :

$$i_1 = C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = (C_0 + C_v \cdot V_1) \frac{dv_1}{dt} \dots\dots\dots (II.20)$$

Dont la charge Q_1 est donné par :

$$Q_1 = C_0 V_1 + \frac{1}{2} (C_v V_1^2) \dots\dots\dots (II.21)$$

Alors ma tension est définie comme suite :

$$V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v Q_1}}{C_v} \dots\dots\dots (II.22)$$

II.4. Les convertisseurs statiques

II.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)

Un hacheur type *boost* est un convertisseur DC-DC, éleveur de tension, dans ce dernier la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [43]. Les systèmes PV utilisent les hacheurs survolteurs dans le but de diminuer le nombre de cellules, vu que ce dernier permet d'atteindre le niveau de tension désiré. La figure (II.8) représente la structure d'un hacheur de type *boost* utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

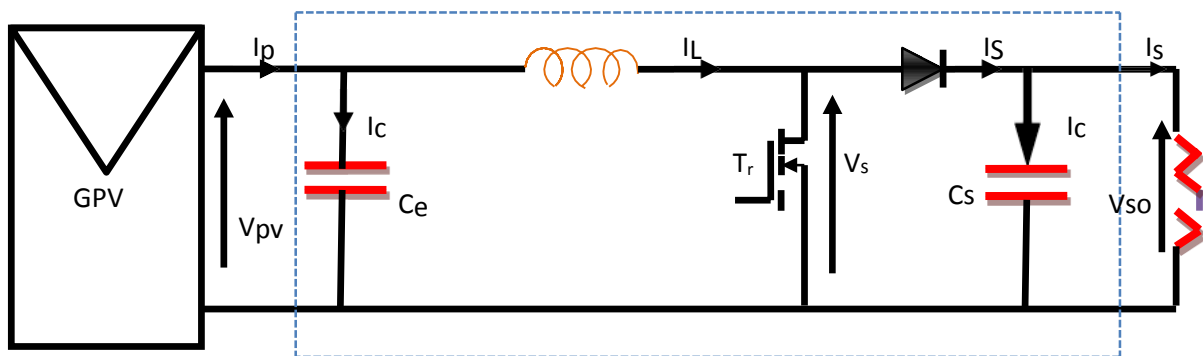


Figure II.8 : Système PV conçu autour d'un hacheur *Boost*

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor T_r

Dans la première phase T_r est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{PV}$ le courant traversant l'inductance augmente linéairement.

Dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{PV} - V_{SO}$. Dans cette phase le condensateur C_s se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations du hacheur Boost sont [44]:

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \dots\dots\dots (II.23).$$

$$(1 - \alpha) I_l = C_s \frac{dv_{dc}}{dt} + I_{dc} \dots\dots\dots (II.24)$$

En valeur moyenne, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est la suivante :

$$V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \dots\dots\dots (II. 25)$$

Et celle du courant :

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_l \dots\dots\dots (II. 26)$$

Dans le fonctionnement continu du hacheur et pour une ondulation de courant et de tension donnée, les valeurs des capacités et de la bobine du hacheur peuvent être déterminées comme suit :

$$L = \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{f \cdot \Delta I_{pv}} \dots\dots\dots (II. 27)$$

$$C_s = \frac{V_{pv} I_{dc} \alpha}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta V_s \cdot (1-\alpha)} \dots\dots\dots (II. 28)$$

$$C_e = \frac{I_{dc} \cdot \alpha \cdot (1-\alpha)}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta I_{pv}} \dots\dots\dots (II. 29)$$

II.4.2. Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [45]. Lorsque le transistor est fermé l'inductance magazine le courant donc l'énergie est stockée, tandis que lors d'ouverture de commutateur une tension aux bornes de l'inductance inversée donc l'énergie stockée se transforme et évacue vers la charge via la diode.

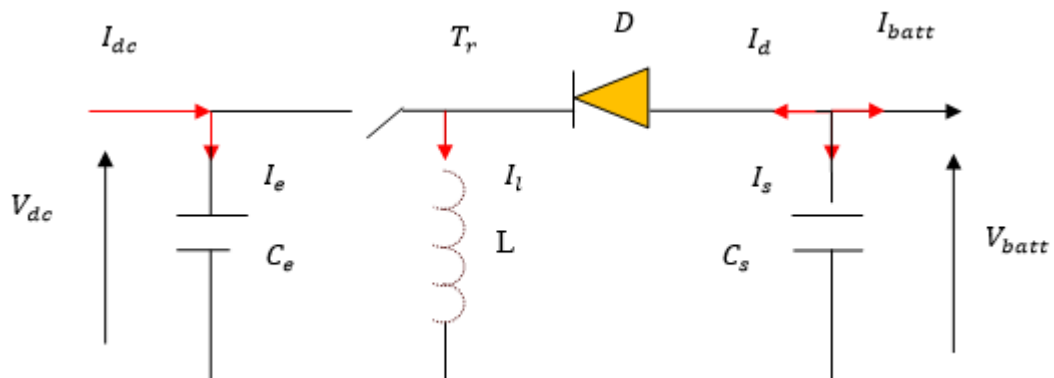


Figure II.9 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{batt} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \cdot V_{dc} \dots\dots\dots (II. 30)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$I_{batt} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot I_{dc} \dots\dots\dots (II. 31)$$

II.4.3. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Pour le site de Bejaia, le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement est le plus Faible, c'est à dire un maximum de 2,2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [46], dans ce Cas la puissance crête (Ppv) du champ photovoltaïque se calculera comme suit :

$$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{h(enseillement) \cdot (1-pertes)} \dots\dots\dots (II. 32)$$

Le nombre de panneaux utilisés peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq ENT \left[\frac{P_{pv}}{P_{pv.u}} \right] \dots\dots\dots (II. 33)$$

Avec :

N_{pv} : Nombre de panneaux photovoltaïques.

P_{pv} : Puissance des panneaux photovoltaïques.

$P_{pv.u}$: Puissance du panneau photovoltaïque unitaire.

ENT: Entier.

II.4.4. Dimensionnement du stockage

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

$$C_{batt} = \frac{E_{ele} \cdot N_j}{u_{batt} \cdot n_{batt} \cdot PDD} \dots\dots\dots (II.34)$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer de la manière suivante :

$$N_b \geq \frac{C_{batt}}{C_{batt.u}} \dots\dots\dots(II.35)$$

Avec :

N_j : Nombre de jour d'autonomie.

PDD: Profondeur de décharge de la batterie.

n_{batt} : Rendement de la batterie

U_{batt} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de batterie.

$C_{batt.u}$: Capacité unitaire.

II.5. Caractéristique du GPV

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement a ensoleillement $G = 1000W/m^2$ et a température $T = 25C^\circ$.

Notre générateur photovoltaïque (GPV) est composé de trois branches en parallèles dont chacune contient onze panneaux en séries. Les caractéristiques du GPV sont données par :

$$I_{pv} = N_p. I \dots\dots\dots(II. 34)$$

$$V_{pv} = N_s. V \dots\dots\dots(II. 35)$$

$$P_{pv} = N_s. N_p. P \dots\dots\dots(II. 36)$$

La figure (II.10) représente l’allure de la variation du courant en fonction de la tension aux bornes du panneau photovoltaïque depuis le courant de court- circuit (tension nulle correspondant au courant maximum aux bornes du PV) jusqu’au courant à circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes du panneau PV). Cette courbe est établie dans des conditions standards de fonctionnement (température =25°C , ensoleillement =1000W/m²).

La figure (II. 11) représente l'allure de la variation de la puissance en fonction de la tension aux bornes du panneau photovoltaïque. On peut constater sur cette allure qu'elle présente un maximum pour un courant et une tension donnée.

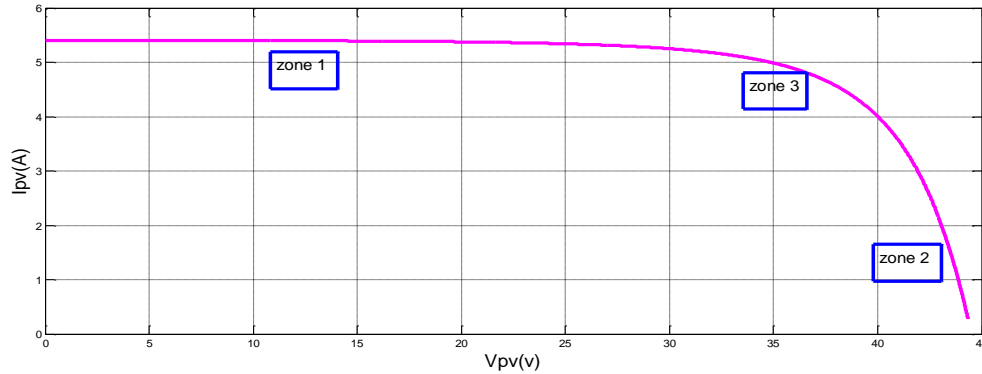


Figure II.10 : Caractéristique : courant-tension $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque

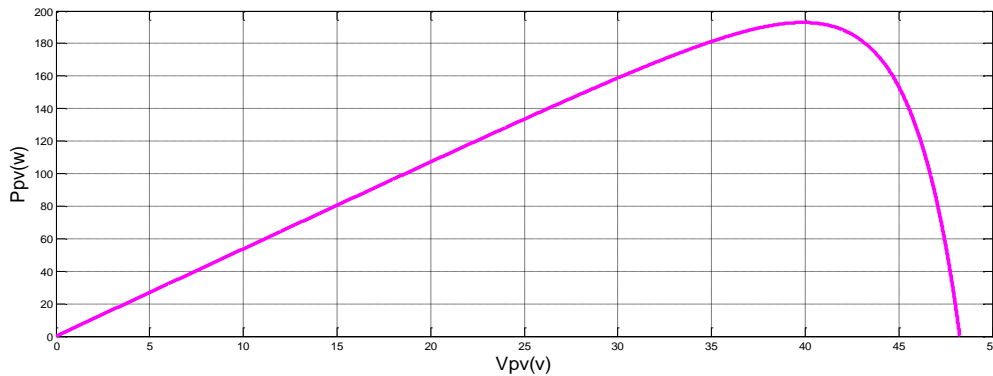


Figure II.11 : Caractéristique : puissance- tension $P(V)$ d'un panneau photovoltaïque

On remarque d'après La caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

➤ **La zone (1) :** Le courant presque constant quelle que ce soit la variation de la tension.

Le module PV fonctionne comme un générateur de courant.

➤ **La zone (2):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

➤ **La zone (3):** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le

fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

II.5.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Pour étudier l'influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV nous avons simulé et déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux d'irradiations à température constante et à différentes températures à irradiation constant. Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque, sans l'application d'un algorithme d'optimisation (MPPT).

II.5.2. Influence de l'ensoleillement

La caractéristique I-V donnée sur la figure (II.12) est obtenue pour l'éclairement de référence 1000 W/m² et a une température de 25°C. L'éclairement et la température de cellule.

Ces résultats, obtenus pour le modèle présenté ci-dessus, montrent que la caractéristique courant-tension dépend de l'éclairement. Il est à noter que la tension en circuit ouvert est peu influencée par la variation de l'éclairement, contrairement au courant du court-circuit qui augmente de manière consistante.

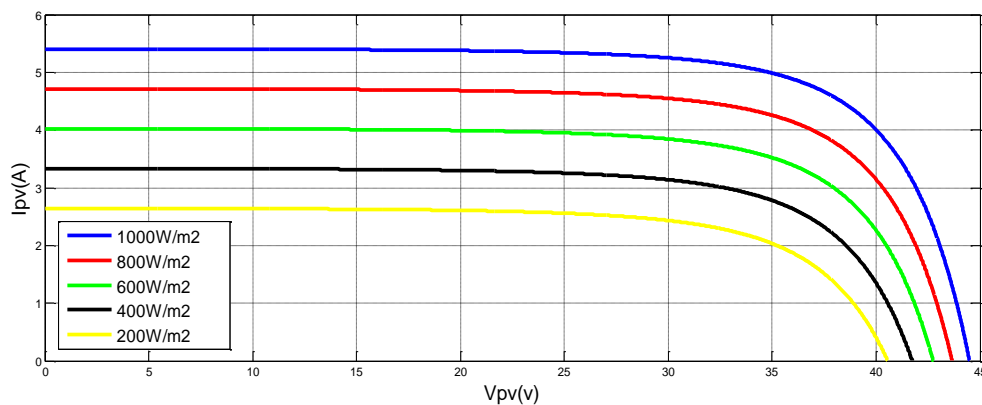


Figure II.12: Caractéristique courant tension d'un panneau photovoltaïque pour irradiation variable et $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure (II.13) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension qui montre que la puissance maximale que peut produire un générateur

PV correspond généralement à une tension plus au moins constante qui représente la tension au point de la puissance maximale.

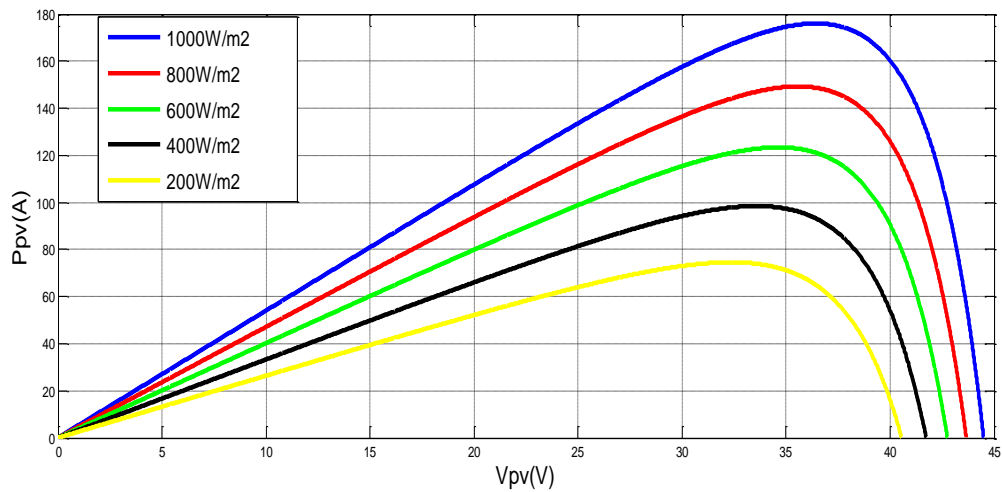


Figure II.13 : Caractéristiques puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour irradiation variable et $T_c=25^\circ\text{C}$

II.5.3 Influence de la température T_c :

Les caractéristiques puissance/tension et courant/tension en fonction de la variation de la température sont représenté sur les figures ci-dessous.

La température a un effet très important sur la tension de circuit ouvert et un effet non remarquable sur le courant de court-circuit de la cellule. Suivant les figures (II.14) et (II.15), on constate que lorsque la température croît à irradiation constante la tension de circuit ouvert V_{co} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{cc} augmente légèrement. L'augmentation de la température se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible.

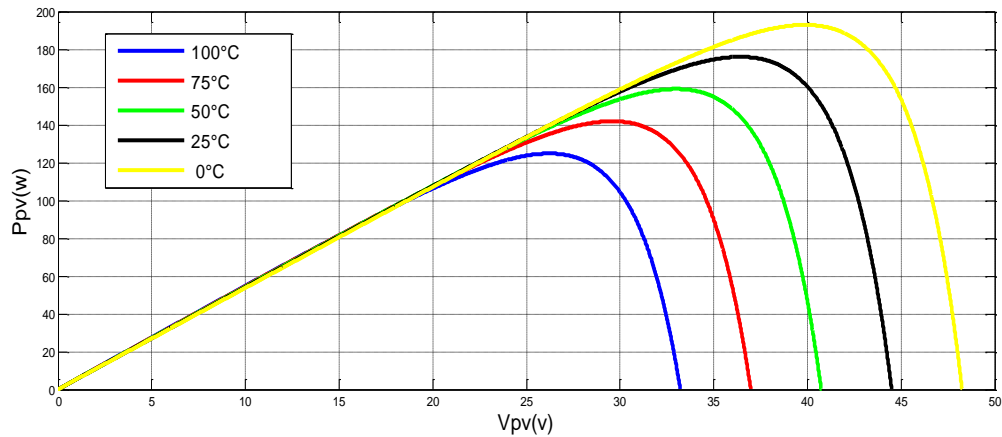


Figure II .14 : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50, 75, 100^\circ\text{C}$) et $G=1000 \text{ w/m}_2$

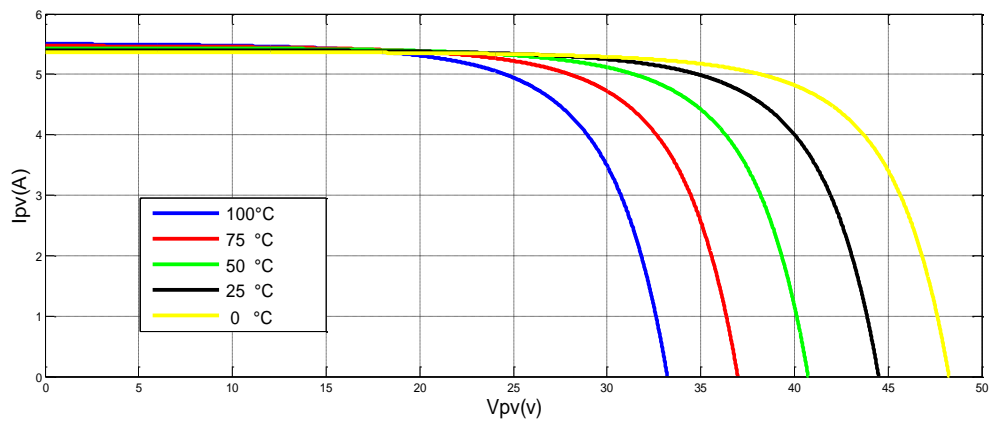


Figure II.15 : Caractéristique courant tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50, 75, 100^\circ\text{C}$) et $G=1000 \text{ w/m}^2$

D'après ces résultats de la simulation on peut dire que les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques, particulièrement l'ensoleillement et la température.

II.6. Maximum Power Point trekking (MPPT)

II.6.1. Introduction

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV. Le suivi de point de puissance maximale (MPPT) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques GPV peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP).

II.6.2. Principe de fonctionnement

Le suiveur de point de puissance maximum (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (MPPT) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes peuvent être utilisées [47] :

- La méthode d'ajustement de courbe
- La méthode de circuit ouvert de générateur
- La méthode de court-circuit
- La méthode perturbation & observation (PO)
- La méthode d'incrément de conducteur
- Les méthodes avancées (logique floue...)
- Les méthodes <Look-up table>.

II.7. Les algorithmes MPPT

II.7.1. Méthode de conductance incrémentale (IncCond)

La méthode de la conductance incrémentielle (IncCond), à l'instar de la méthode P&O, utilise la pente des caractéristiques de puissance du générateur PV pour suivre le MPP. Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle sur le point MPP, positive pour les valeurs de puissance de sortie inférieure à MPP et négative pour les valeurs de puissance supérieure à MPP.

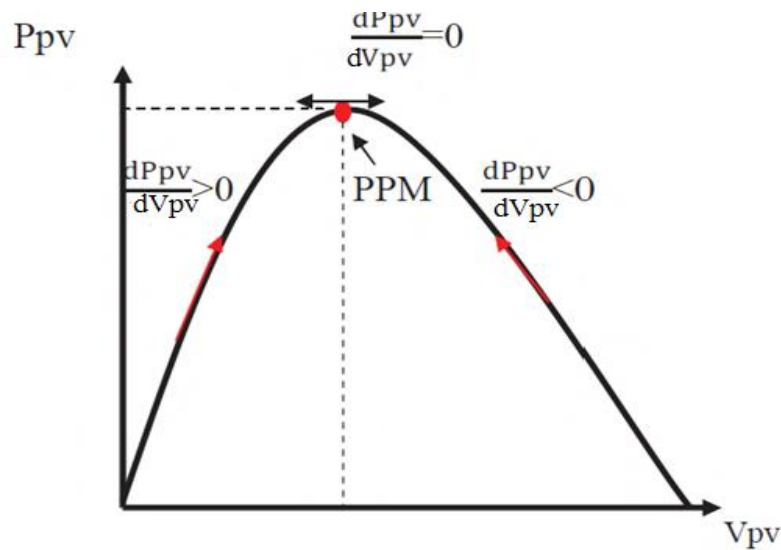


Figure II.16: Incrémentation de Conductance

Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{à gauche du PPM} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{au PPM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{à Droite du PPM} \end{array} \right.$$

Avec :

La variation de la puissance en fonction de la tension est donnée par [48] :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = 1 \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV}$$

Donc :

Au point de puissance maximale la dérivée de la puissance s'annule ($\Delta P = \Delta V = 0$), ce qui donne :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} \dots\dots\dots (II.37)$$

On peut remarquer que la vérification du signe de la pente revient à comparer la conductance

($\frac{1}{V}$) Et son incrément ($\frac{dI}{dV}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} > 0 \implies \frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V} \longrightarrow \text{À gauche du PPM} \longrightarrow \text{Augmenter V.} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \implies \frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V} \longrightarrow \text{À droite du PPM} \longrightarrow \text{Diminuer V.} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \implies \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} \longrightarrow \text{Au voisinage du PPM.} \end{array} \right.$$

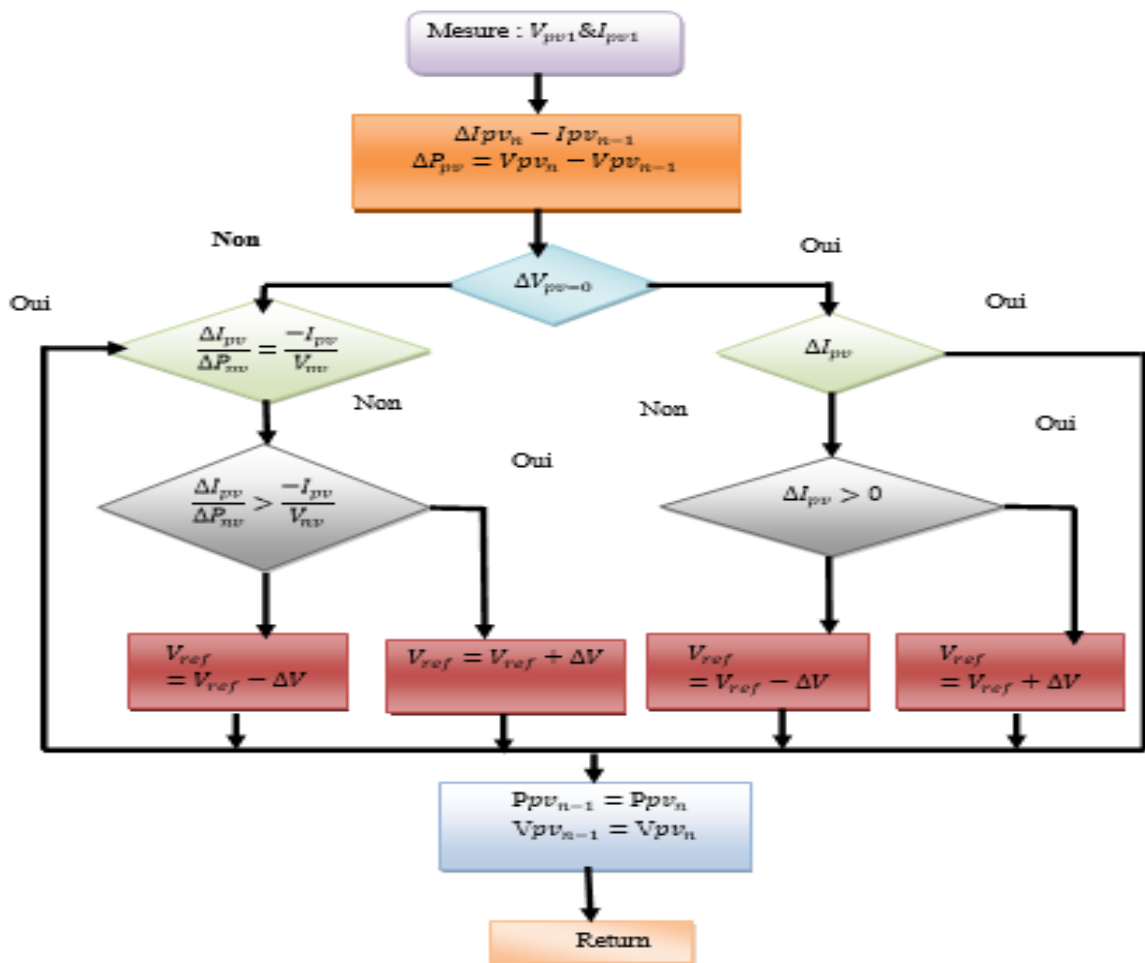


Figure II.17: Algorithme d'incrément de la conductance

II.7.2. La méthode perturbation & Observation (PO)

La méthode Perturbation & observation (PO) est l'une des méthodes les plus utilisées [49,50]. 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.

La figure (II.19) présente le diagramme de l'algorithme PO.

Le principe de commande MPPT de type PO consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.18), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

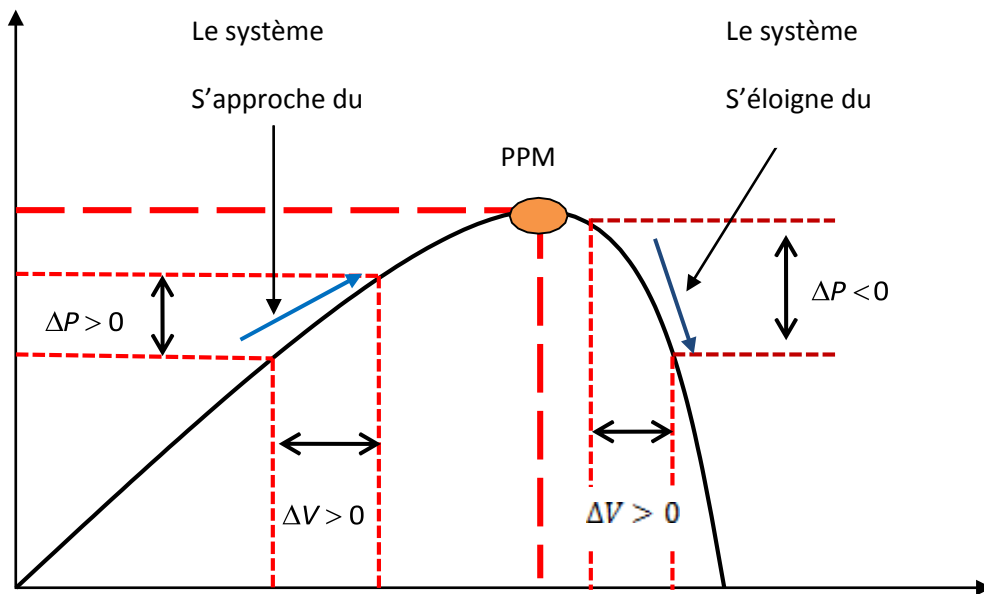


Figure II.18. Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO

La figure (II.19) représente l’algorithme classique à une commande MPPT de type PO, ou l’évolution de la puissance est analysées chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaire

Pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

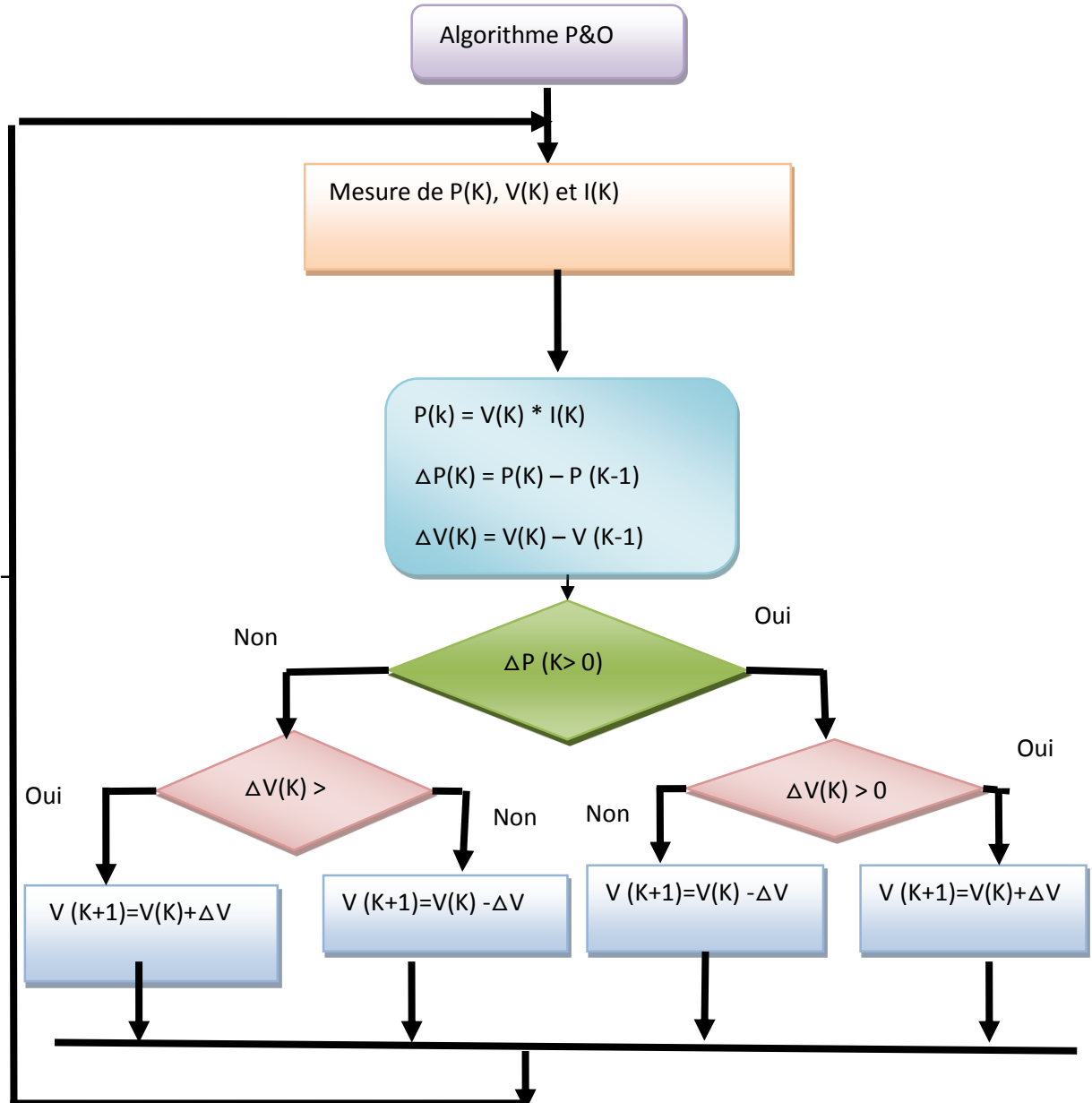


Figure II.19 : Organigramme de l’algorithme P&O

II.7.3. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l’algorithme MPPT P&O

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque avec l’application de l’algorithme d’optimisation MPPT, pour une extraction maximale de la puissance pour toute variation de l’ensoleillement et de la température.

Afin d’évaluer l’efficacité de l’algorithme MPPT utilisé dans le système de conversion photovoltaïque avec stockage, vis-à-vis des perturbations induites par les variations de l’éclairement et de la température nous avons procédé à différents tests.

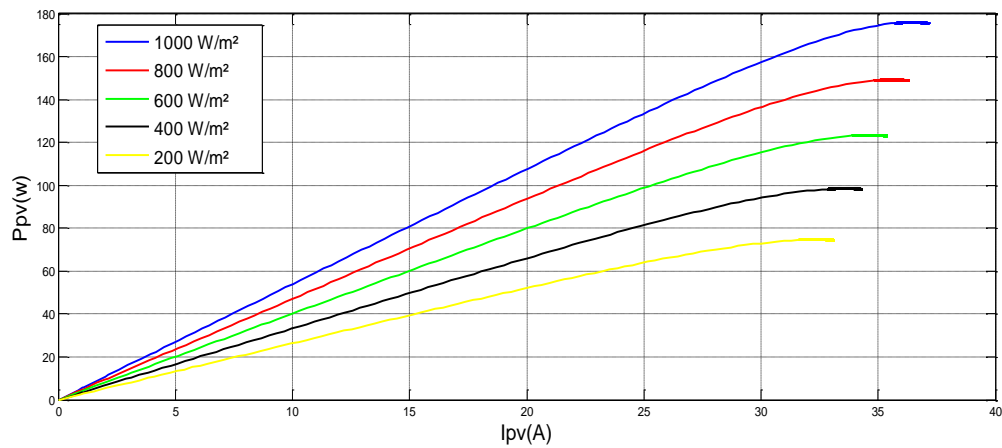


Figure II.20 : Réponse de l’algorithme P&O pour différentes variations de l’ensoleillement à Température constante ($T=25^{\circ}C$)

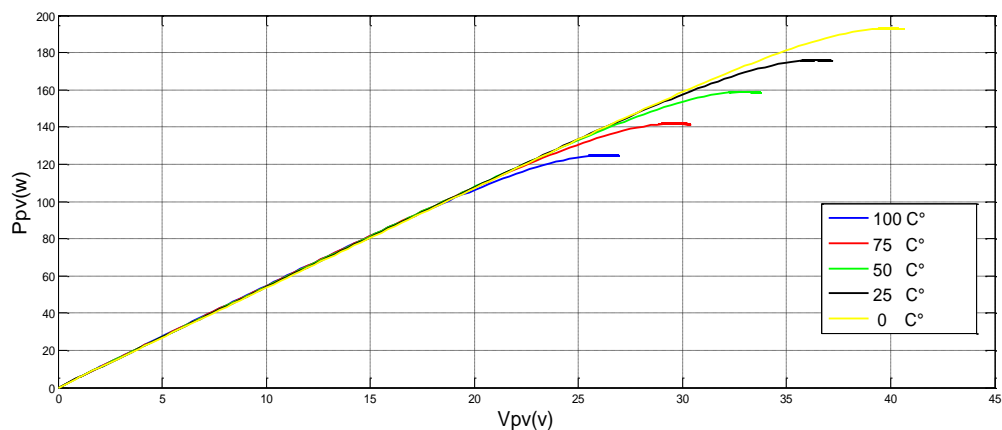


Figure II.21 : Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ($G=1000W/m^2$)

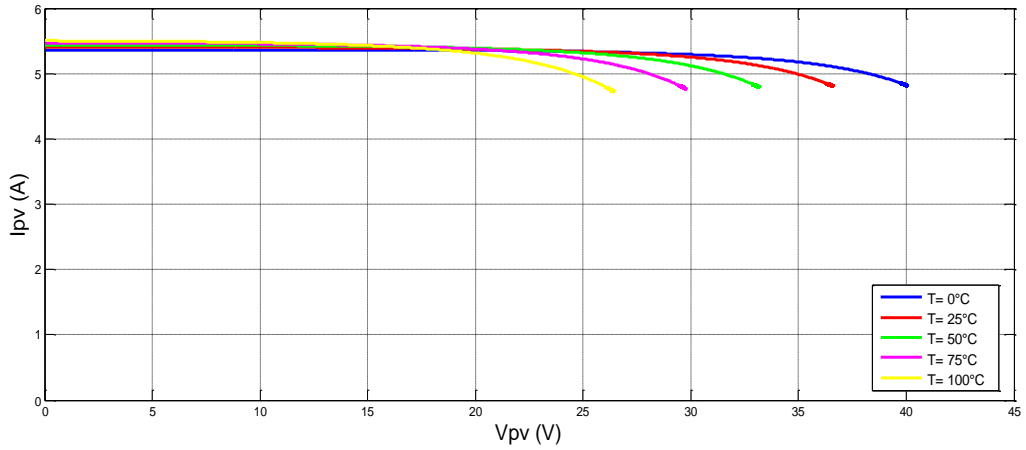


Figure II.22 : Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ($G=1000W/m^2$)

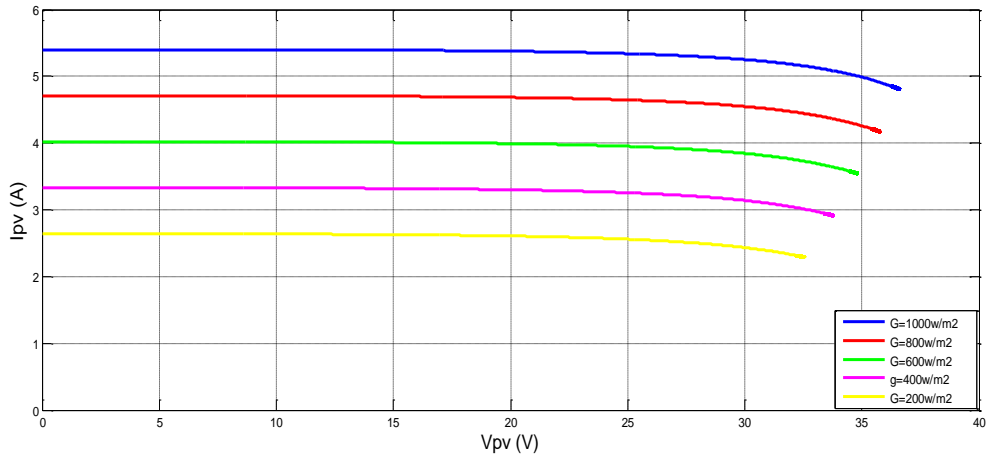


Figure II.23: Réponse de l’algorithme P&O pour différentes variations de l’ensoleillement à Température constante ($T=25^{\circ}C$)

Pour les deux tests on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal (PPM), le courant converge également vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximal.

Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de chaque composant de la chaîne de conversion photovoltaïque a été élaborée à partir de modèles existants dans la littérature (champ PV, convertisseurs, MPPT, les batteries, super-condensateur) ; on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser les pertes en énergie produite. Globalement la simulation a permis d'évaluer le comportement général des composants du système étudié. L'utilisation d'un régulateur MPPT permet de faire fonctionner les GPV à leur meilleur rendement.

On constate que les caractéristiques de générateur photovoltaïque dépendent d'une adaptation d'énergie par des techniques de contrôle adéquates afin de bien l'exploiter

Pour cela nous avons utilisé la commande mppt (P&O).

Chapitre III
Evaluation et control du
systeme étudié

Introduction

L'utilisation des dispositifs de stockage d'énergie électrique est indispensable dans nombreuses applications soit isolées ou embarquées, ces dispositifs sont le plus souvent caractérisés par l'énergie stockée en (Wh) et de puissance maximale en (W) et aussi la durée de vie. Dans n'importe quel système photovoltaïque avec stockage il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

Dans ce chapitre on va présenter l'algorithme de gestion d'énergie à pour rôle 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 d'autre part (protection contre les surcharges et les décharges profondes).

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

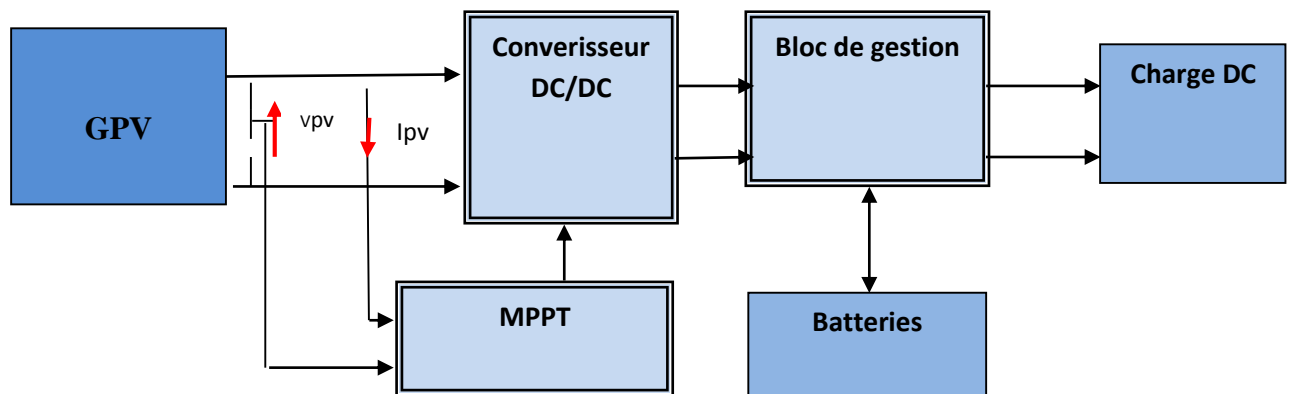


Figure III.1 : schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration de la courante capacité

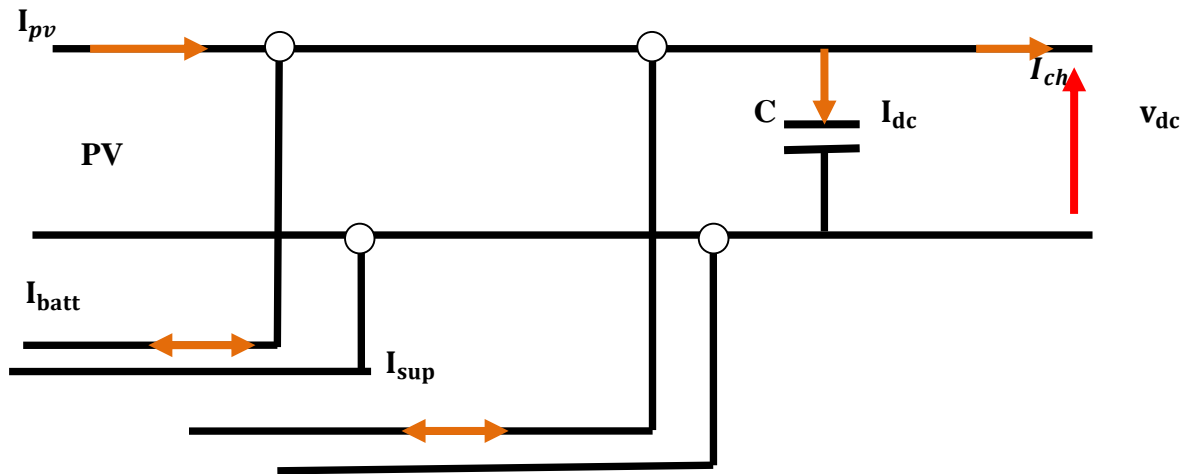


Figure III.2 : Schéma du bus continu

$$I_{ch} = I_{pv} - I_{dc} - I_{sup} \pm I_{batt} \dots\dots\dots(III.1)$$

$$I_c = c \frac{dv_{dc}}{dt} \dots\dots\dots(III.2)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} \cdot I_{dc} \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec :

I_{pv} : Courant fournie par le générateur photovoltaïque [A].

I_{dc} : Courant qui traverse la capacité [A].

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

I_{ch} : Courant de la charge [A].

III.3. Régulation de la tension :

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

Représenté dans la figure ci- dessous [51] :

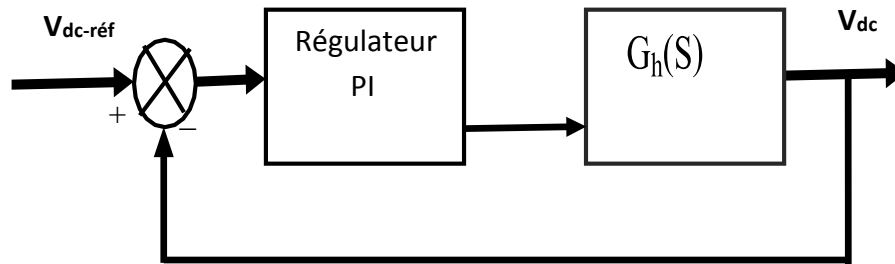


Figure III.3 : Block du diagramme de régulation de la tension de sortie du *Buck-Boost*

La fonction de transfert de ce dernier est écrite comme suit :

$$G_h = \frac{\left(\frac{\alpha L}{R}\right)s + (1-\alpha)^2}{(1-\alpha)^4 \sqrt{\frac{L}{C_s}}s^2 + (1-\alpha)^3 \cdot \frac{L}{R}s + (1-\alpha)^5} \dots\dots\dots (III. 4)$$

Avec :

R, L, C et α représentent respectivement la résistance, inductance, capacité et rapport cyclique du convertisseur Buck-Boost.

III.2. Gestion d'énergie du système photovoltaïque

Les batteries rechargeables sont largement utilisées dans les systèmes photovoltaïques autonomes pour emmagasiner le surplus d'énergie et pour alimenter les charges de faible et moyenne puissance [52].

L'association d'un module de supervision à but de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge et de décharge du stockage.

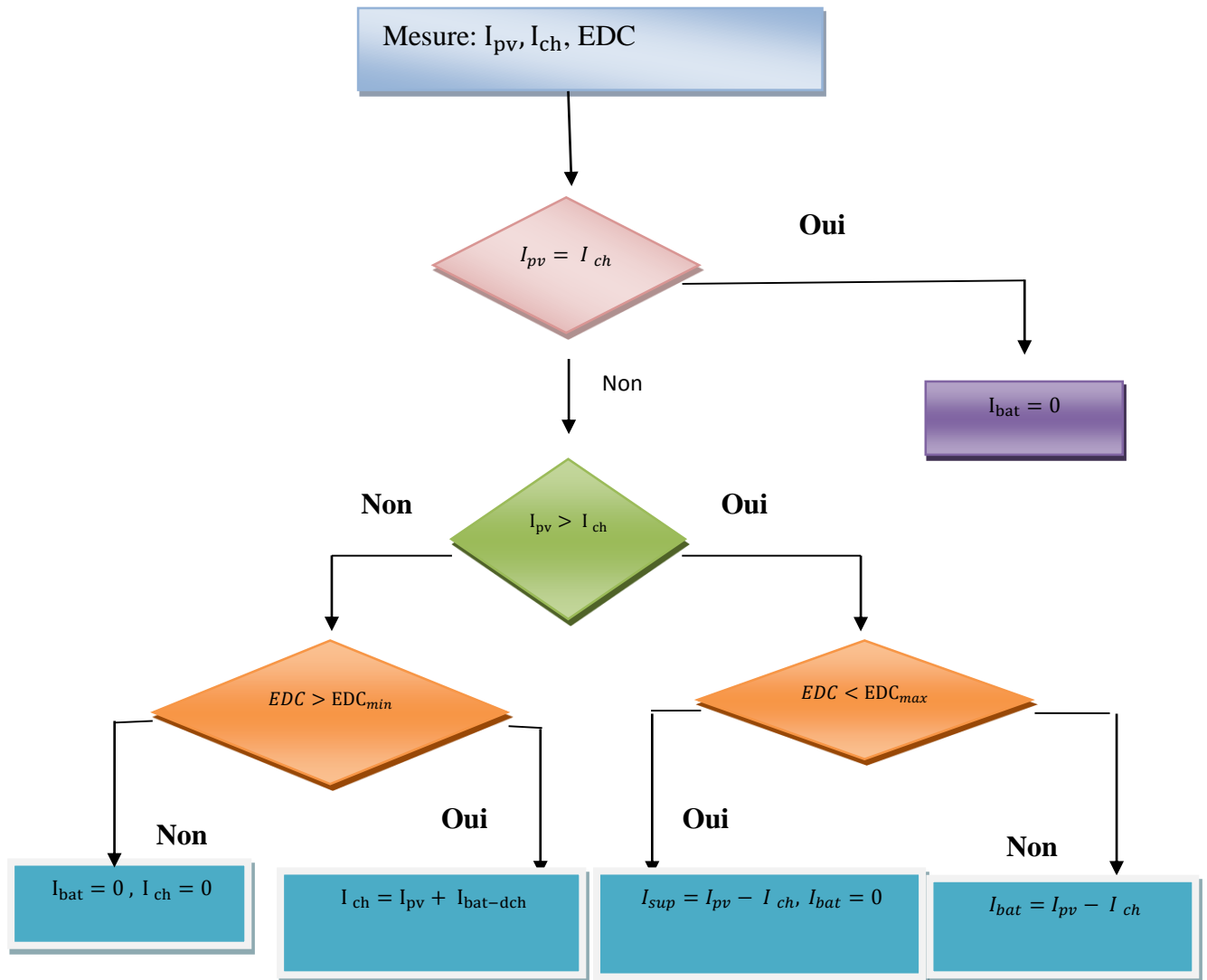


Figure III.4 : Algorithme de gestion d’énergie du système photovoltaïque

Afin de réguler l’énergie provient des panneaux PV et du stockage suivant la demande de la charge l’algorithme de gestion d’énergie assure la supervision et la meilleure gestion dont on prévoit Cinq scénario Alimentation du consommateur uniquement par les panneaux PV si l’énergie solaire provenant des panneaux est égale à la demande de consommateur ;

- Alimentation du consommateur par les panneaux PV et le stockage si l’énergie solaire insuffisante ; - Déconnecter les batteries et le consommateur si l’énergie solaire insuffisante ($P_{pv} < P_{ch}$) et $EDC < EDC_{min}$;

- Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux PV si l’énergie solaire suffisante ;

- Alimentation du consommateur uniquement par les panneaux PV si l'énergie solaire suffisante et $EDC = EDC_{max}$ et le surplus d'énergie sera dirigé vers une charge de délestage.

III.5. Simulation du système photovoltaïque avec stockage par batteries:

Le système photovoltaïque est constitué de 122 panneaux photovoltaïques de 175 W chacun, d'un hacheur parallèle et de 40 batteries plomb acide branchées en série. Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil de consommation. Ce profil tient compte des périodes d'utilisation d'électricité au cours de la journée. Dans notre système PV, nous simulons la consommation de l'utilisateur par des demandes en puissance, ce qui revient à utiliser une charge variable. Dans ce cadre nous avons utilisé un outil informatique Matlab-Simulink qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement et la caractérisation des différents éléments qui constitue le système PV. Nous avons simulé le système PV avec batteries pour une variation de l'éclairement pour une journée d'été et une journée d'hiver.

III.2.1. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'été :

Pour les simulations qui vont suivre nous avons définis un profil d'éclairement dont l'allure est présentée sur la figure (III.5). Pour cet essai, la température est gardée constante à 25°C, seul l'éclairement varie. Comme on peut le voir dans la figure (III.5).

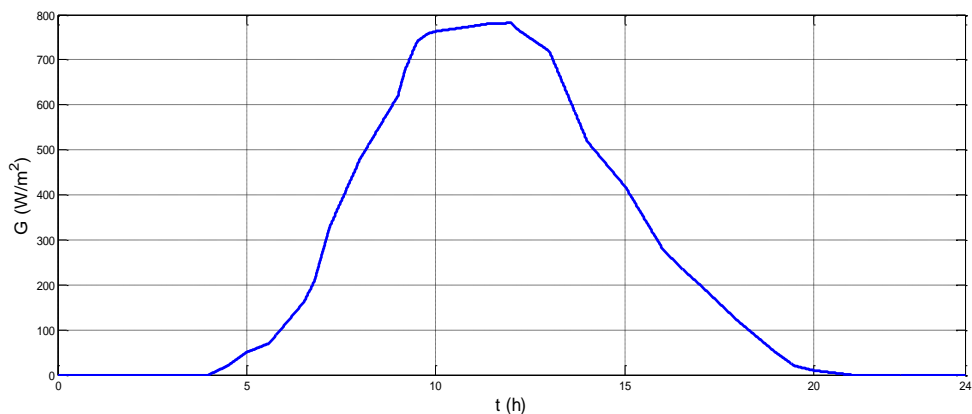


Figure III.5: Profil de l'éclairement pendant une journée d'été

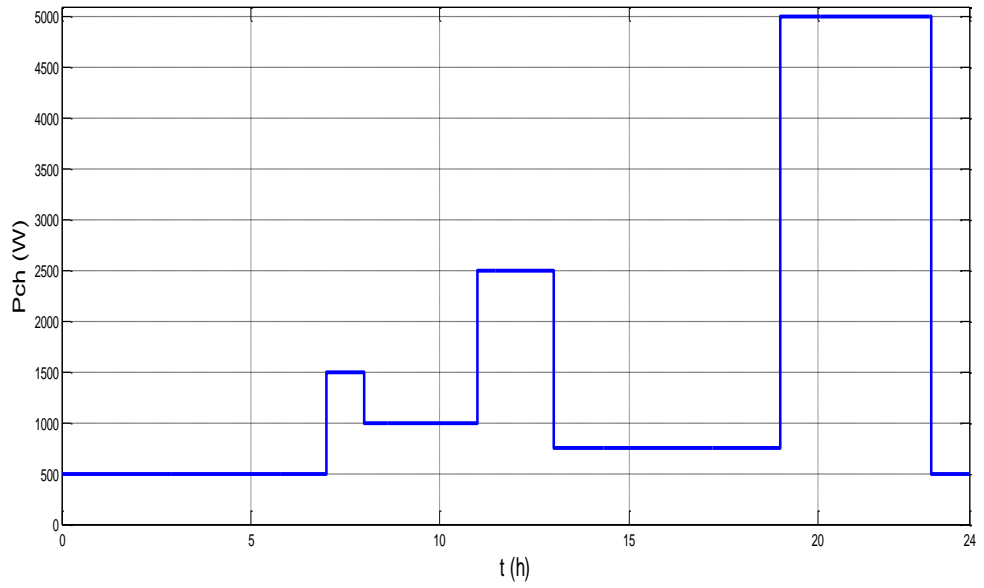


Figure III.6: Profil de consommation

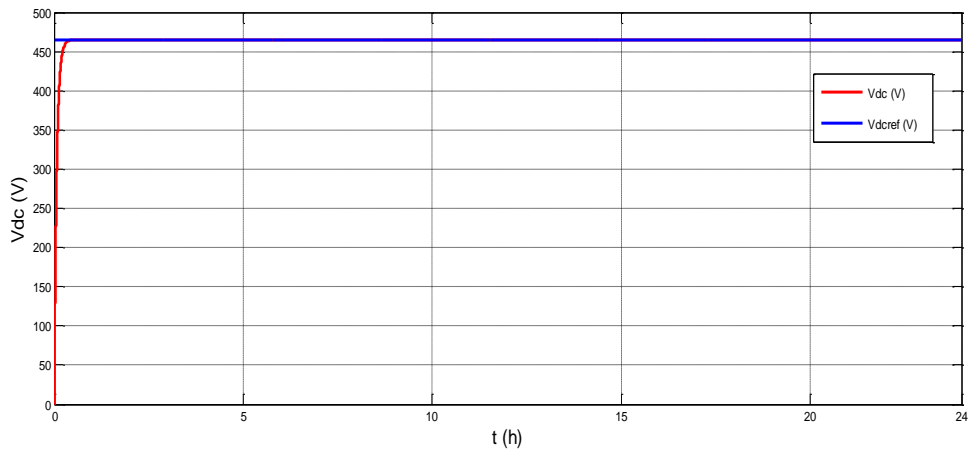


Figure III.7 Allure des tensions du bus continu et sa référence

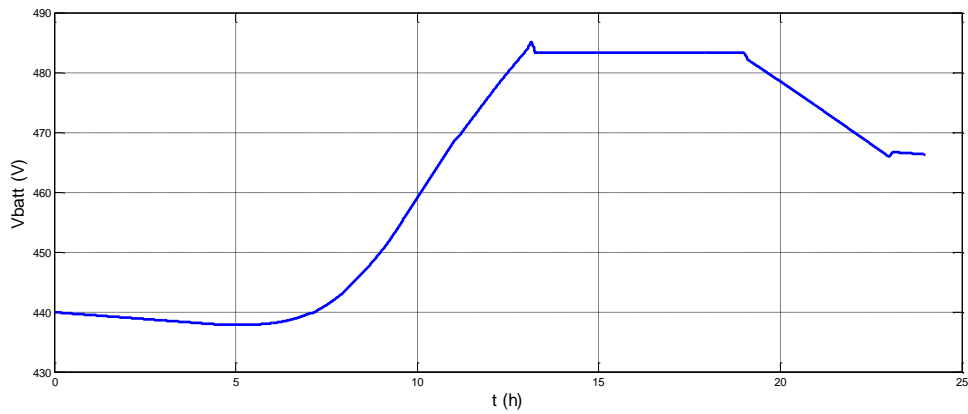


Figure III.8: Tension aux bornes des batteries

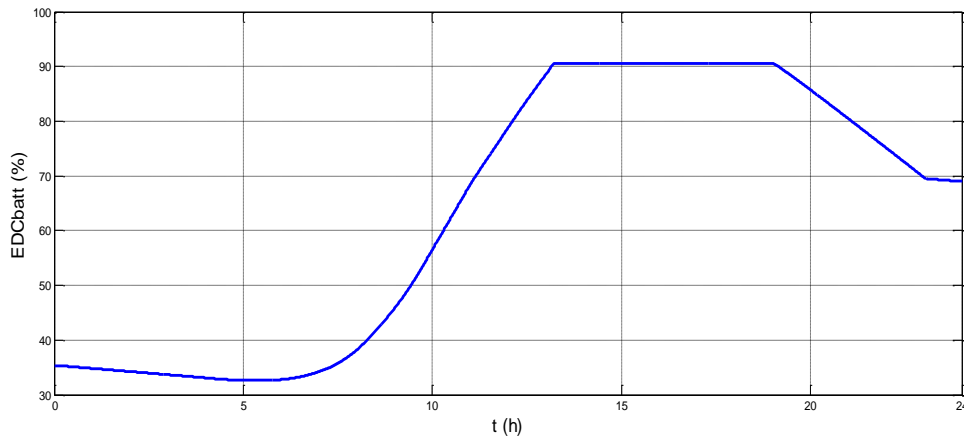


Figure III.9: Etat de charge des batteries

La variation des conditions météorologiques conditionne le mode de fonctionnement du système. Les allures de la tension aux bornes des batteries et leurs états de charge sont représentés sur les figures (III.8) et (III.9) respectivement, on peut voir que l'allure de la tension aux bornes des batteries, ainsi que celle de l'état de charge évoluent de la même manière. Donc, l'état de charge des batteries est l'image de la tension aux bornes des batteries.

A plein ensoleillement ($t = 10h$), les panneaux produisent assez d'énergie permettent d'alimenter le consommateur et de recharger les batteries, la recharge des batteries s'arrête lorsqu'elles sont pleines ($EDC = EDC_{max}$ à $t = 13 h$) et le surplus va dissipée dans une charge dérivative. A ($t = 19 h$) Les batteries débitent à nouveau dans la charge lorsque la production des panneaux devient insuffisante (à la nuit tombée).

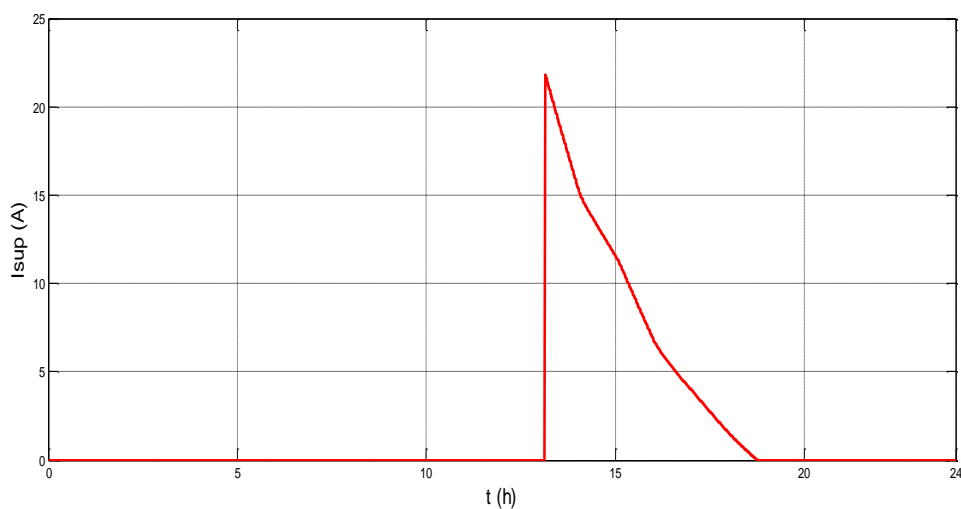
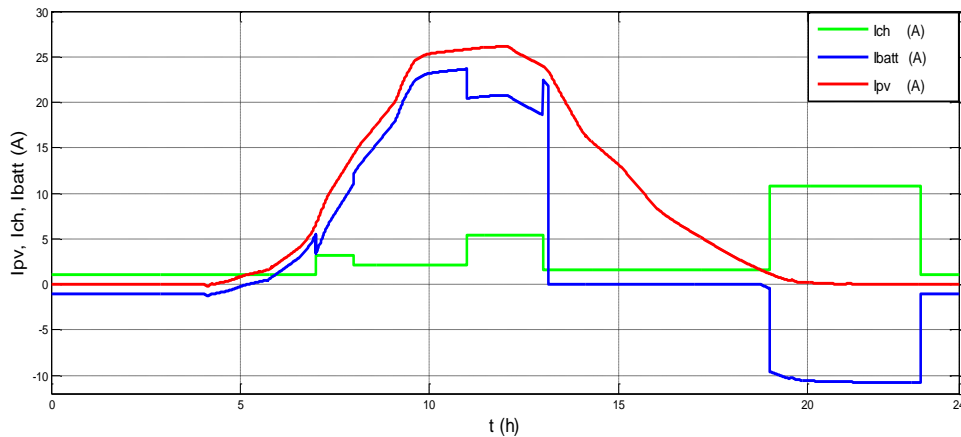


Figure III.10 : Courant à dissiper dans une charge dérivative

Figure III.11: Allure des courants I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}

Quand le courant fourni par les panneaux photovoltaïques est supérieur au courant demandé par la charge et l'état de charge de la batterie est égale à $= EDC_{max}(90\%)$, on déconnecte la batterie ($t=13$ h) et la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une charge de délestage. La figure (II.10) représente le courant de délestage, on déduit à partir de la figure (II.11) que ce courant existe seulement si le courant généré par les panneaux photovoltaïques est supérieur à celui demandé par la charge et $EDC = EDC_{max}$.

On remarque d'après ces résultats, que le programme de gestion est bien respecté avec chargement des batteries lorsque ($EDC < EDC_{min}$) et ($I_{pv} > I_{ch}$) et arrêt de charge lorsque ($EDC = EDC_{max}$) et ($I_{pv} > I_{ch}$) pour éviter les recharges excessifs.

III.3. Description du système

Le système à l'étude est représenté sur la figure (III.12). 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 disposent un stockage d'énergie pour une durée relativement longue. Les super-condensateurs peuvent absorber rapidement un changement de courant pour réduire les contraintes sur les batteries. Le convertisseur connecté au PV est un convertisseur Boost qui permet d'augmenter la tension des panneaux photovoltaïques Pour l'injecter dans le bus DC. Ce convertisseur fournit également la puissance maximale fournie par les panneaux photovoltaïques grâce à l'utilisation d'un algorithme de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Les batteries sont connectées au bus DC par un bidirectionnel convertisseur buck-boost. Il contrôle l'intensité du courant délivrée par la batterie tout en assurant l'adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC. Un deuxième convertisseur buck-boost est utilisé pour connecter les super-condensateurs au courant de bus DC. Il est également réversible en courant.

Les super-condensateurs et les batteries sont connectés à un bus DC. Dans ce bus les condensateurs filtrent les fluctuations de puissance des convertisseurs statiques adoptés. La modélisation de différents sous-systèmes est validée.

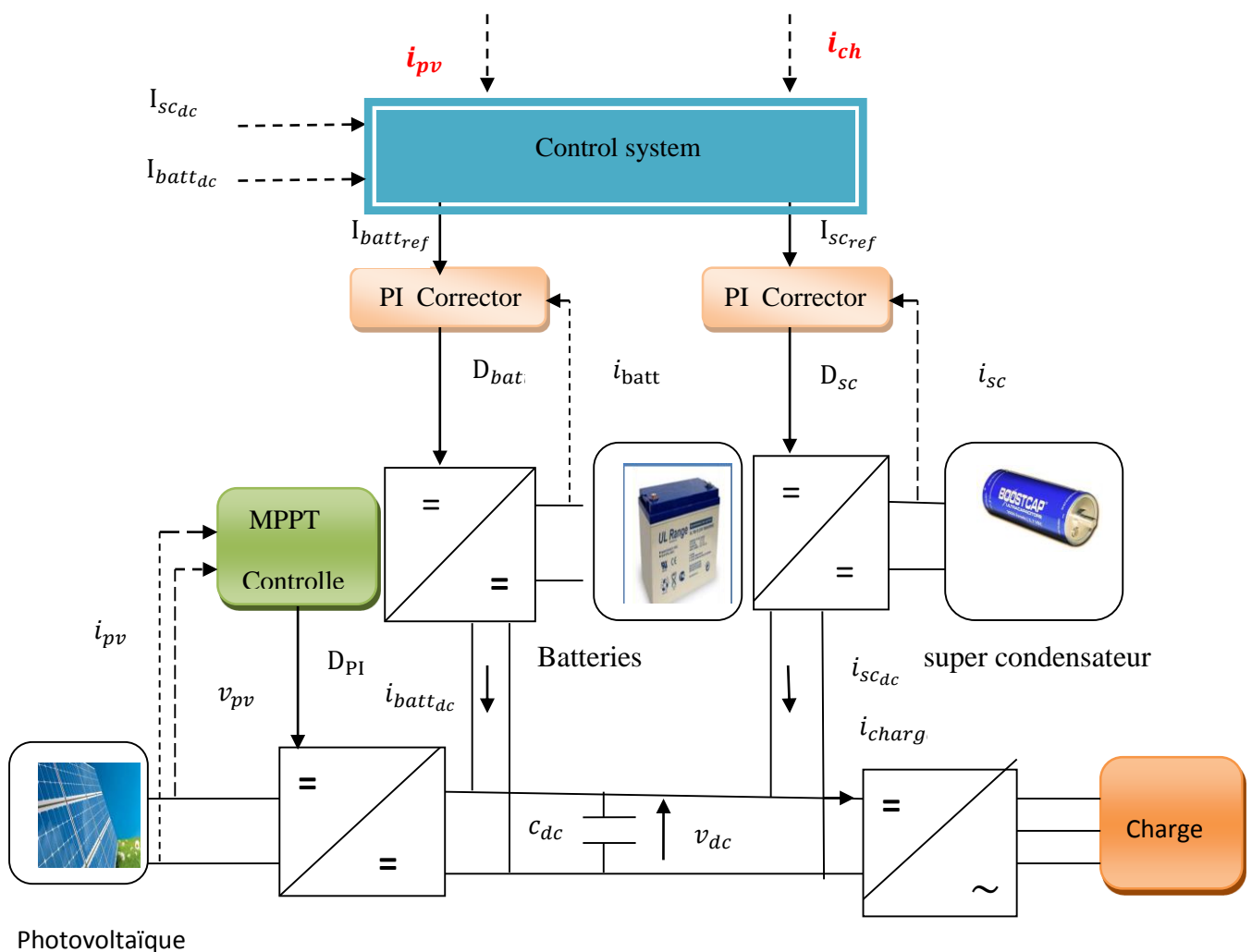


Figure III.12. Schéma de principe du stockage d'énergie photovoltaïque

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration de la courante capacité

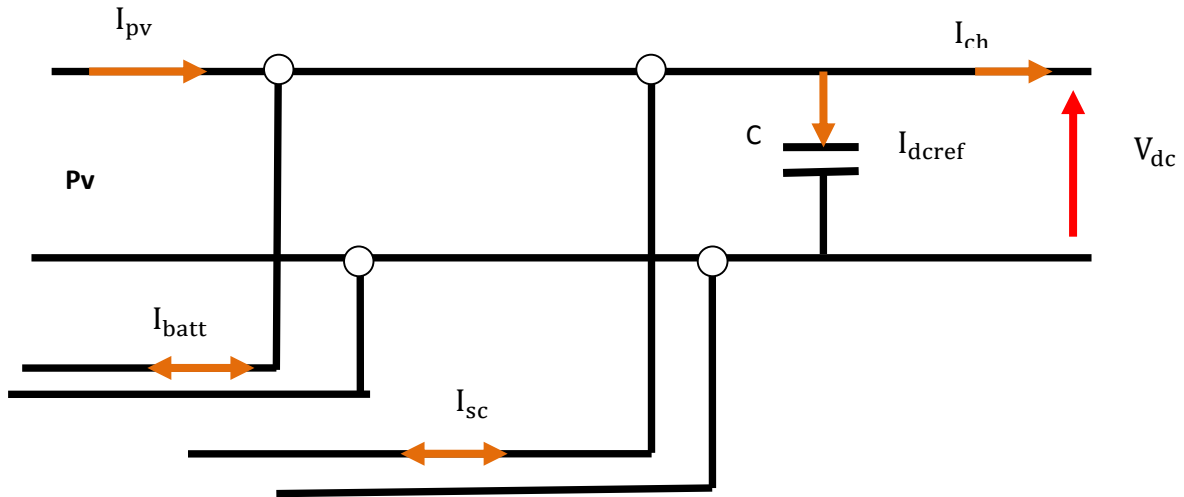


Figure III.13 : Schéma du bus continu

$$I_{ch} = I_{pv} - I_{dc} \pm I_{batt} \pm I_{sc} \dots \dots \dots (III.5)$$

Tension du bus continue DC est contrôlée selon le principe décrit dans la figure (III.14). 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} qui est calculé par la boucle d'asservissement du bus continue.

L'équation qui relie les courants de références des super-condensateurs I_{scref} et les courants de références des batteries $I_{battref}$ est donnée par :

$$I_{dcref} = I_{scref} + I_{battref} \dots \dots \dots (III.6)$$

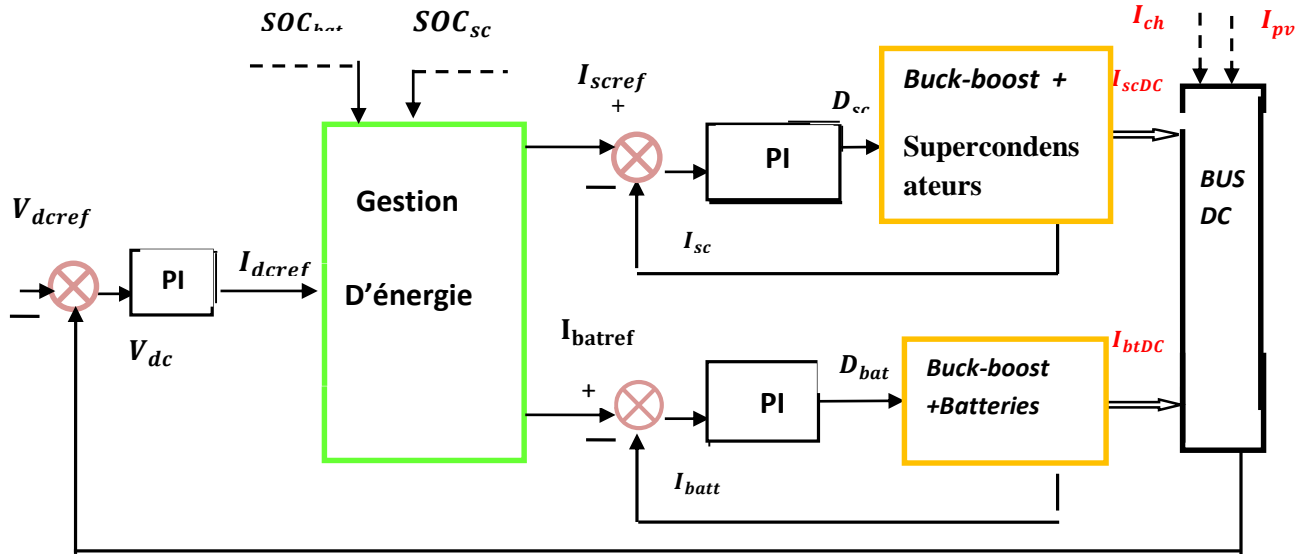


Figure III.14: Schéma fonctionnel de la commande bus DC

III.4. Stratégie de control de l'association batteries et super-condensateurs

Afin de valider l'association batteries et super-condensateurs, on a proposé une combinaison sans stratégie de contrôle des batteries et des super-condensateurs combinées sans système de contrôle d'énergie. L'algorithme de contrôle de la batterie est illustré à la figure (III. 3).

Dans le cas normal d'état de charge des batteries et des super-condensateurs, le soC_{sc} et le soC_{batt} doivent être compris entre 30% et 90%. Le courant de référence des batteries I_{batref} construit à partir du passage du courant de référence du bus continu à travers un filtre passe-bas. Le courant de référence des super-condensateurs I_{scref} est déterminé par la différence entre le courant de référence du bus continu et le courant de référence des batteries.

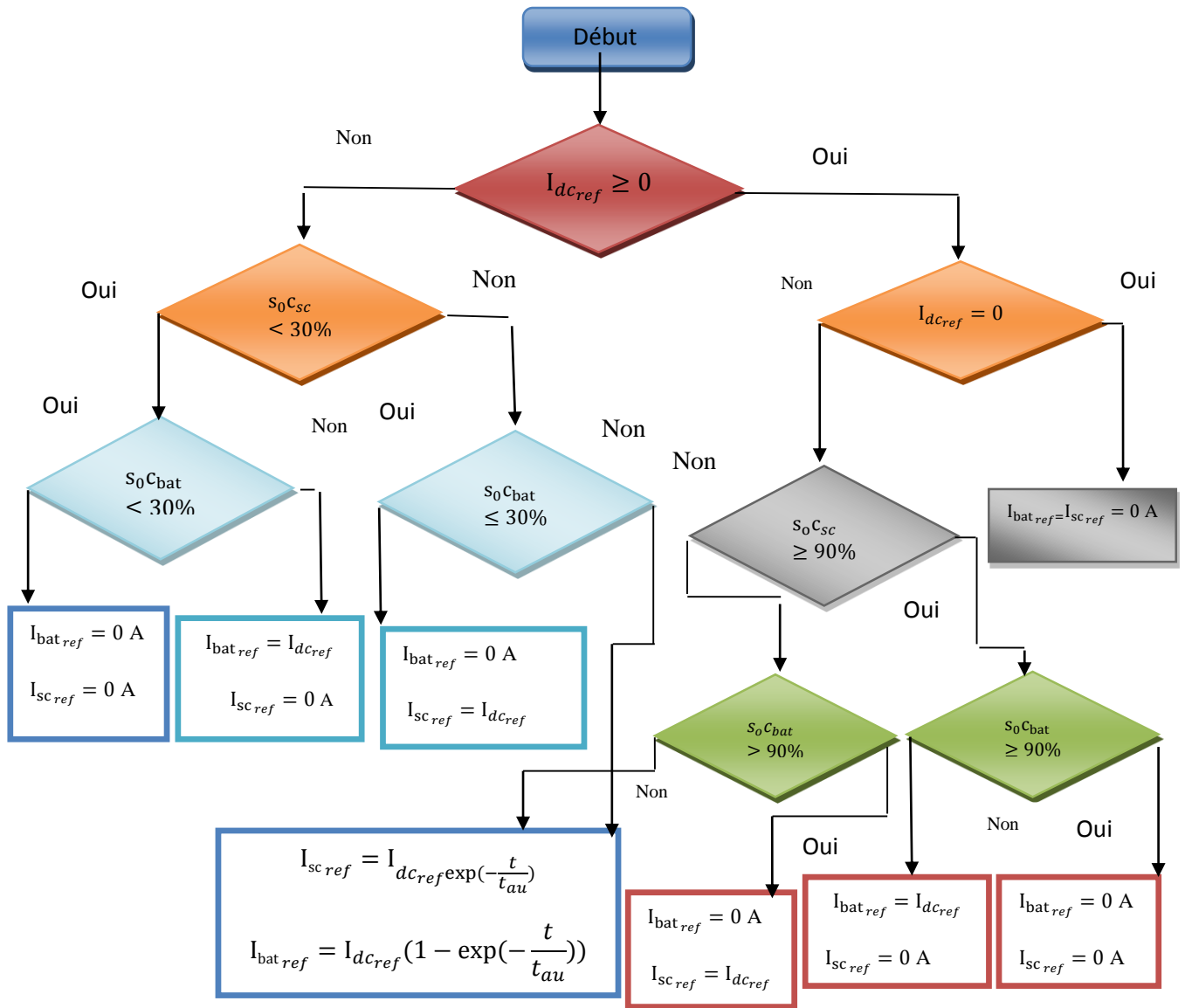


Figure III.15 : Organigramme de la répartition des sources de référence du système de stockage

La méthode de distribution d'énergie utilisant à fois des batteries et des Super-condensateurs est proposée pour le stockage d'énergie photovoltaïque.

La combinaison des super-condensateurs et des batteries pour le système photovoltaïque offre les meilleures caractéristiques des configurations à haute énergie et à haute puissance.

La distribution des constantes de référence des différents éléments stockage est illustrée à la figure (III.17, III.18), les batteries réagissent plus lentement aux demandes de puissance tantes que les super-condensateurs fournissent les courants transitoires nécessaires.

La différence entre le courant de référence du bus DC et le courant de référence des batteries représente le courant de référence des Super-condensateurs pour consentions, si le courant de stockage de référence est positif cela signifie qu'on est en mode charge et s'il est négatif on est en mode décharge.

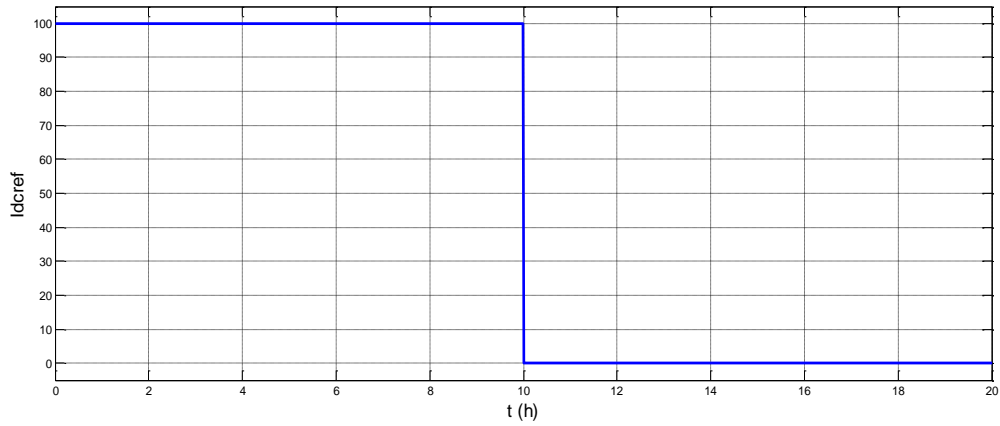


Figure III.16 : I_{dcref} avec différente valeur de constante de temps de filtre

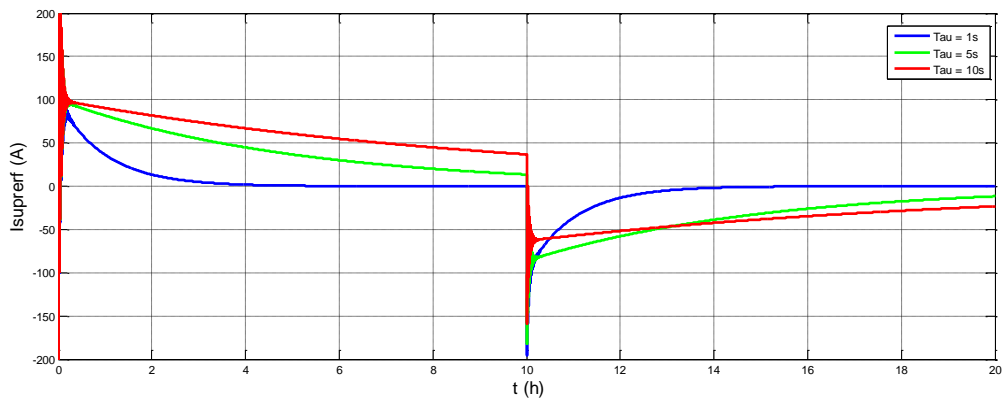


Figure III.17 : I_{scref} avec différente valeur de constante de temps de filtre

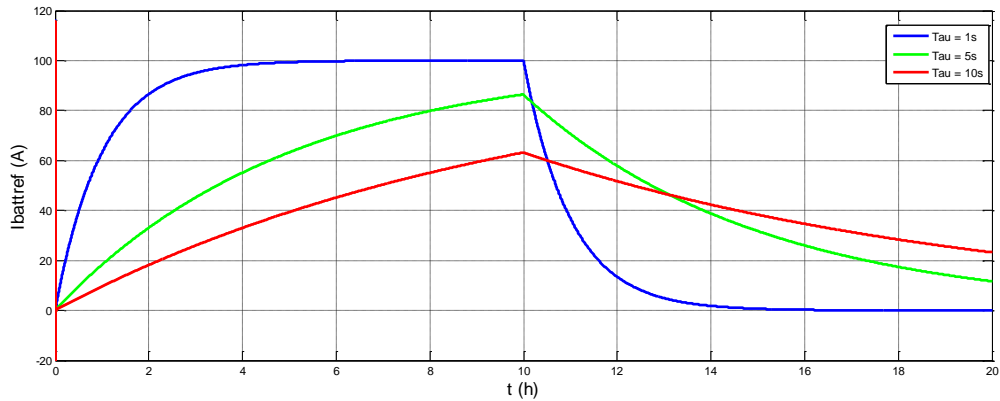


Figure III.18 : $I_{battref}$ avec différente valeur de constante de temps de filtre

III.5. Résultats de simulation

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 ;

Ou fait varier le profil de charge ainsi que l'ensoleillement, mis à part la température à la surface des PV et considérée constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

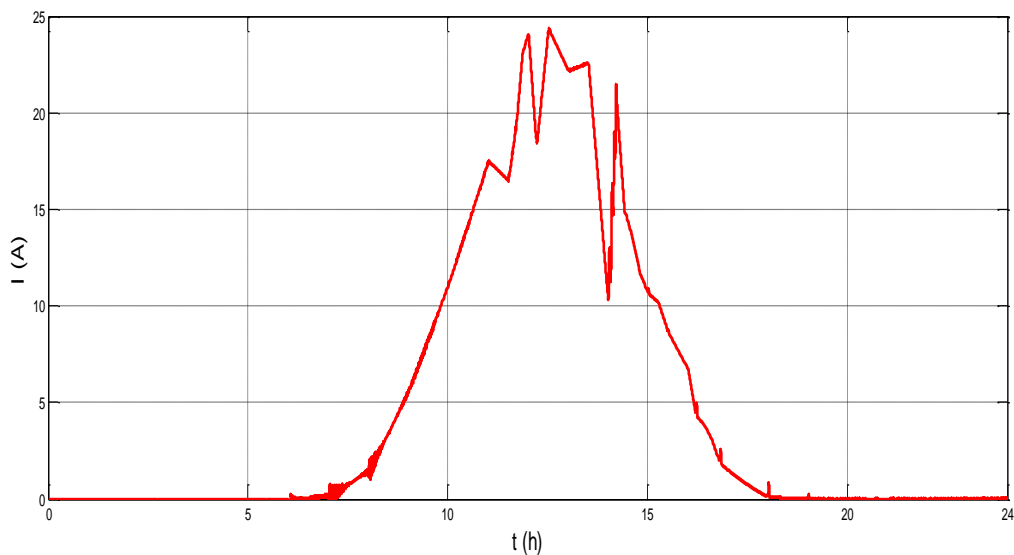


Figure III.19: Le courant I_{pv} .

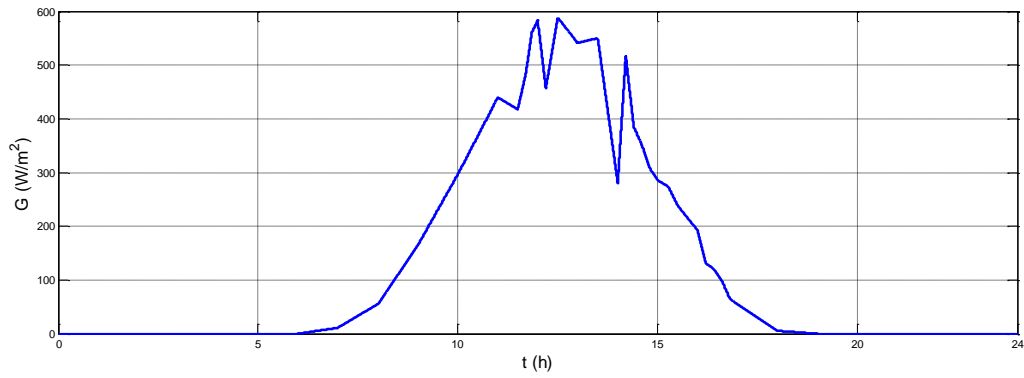


Figure III.20: Profile d'ensoleillement

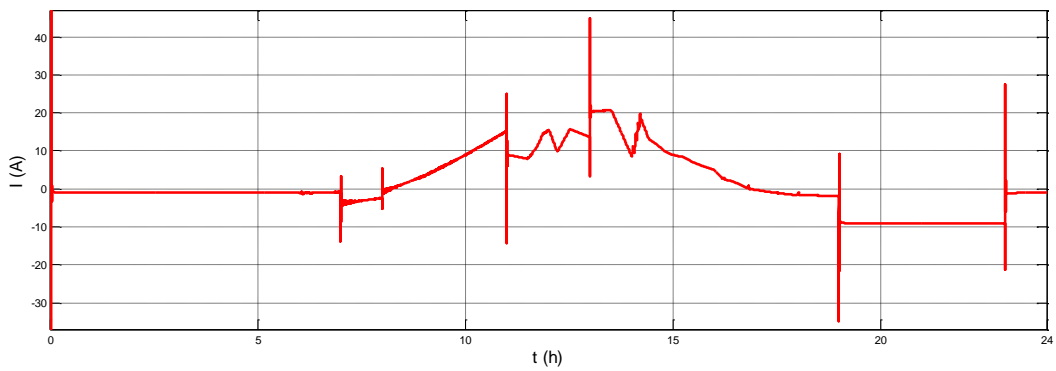


Figure III.21: Le courant I_{dref}

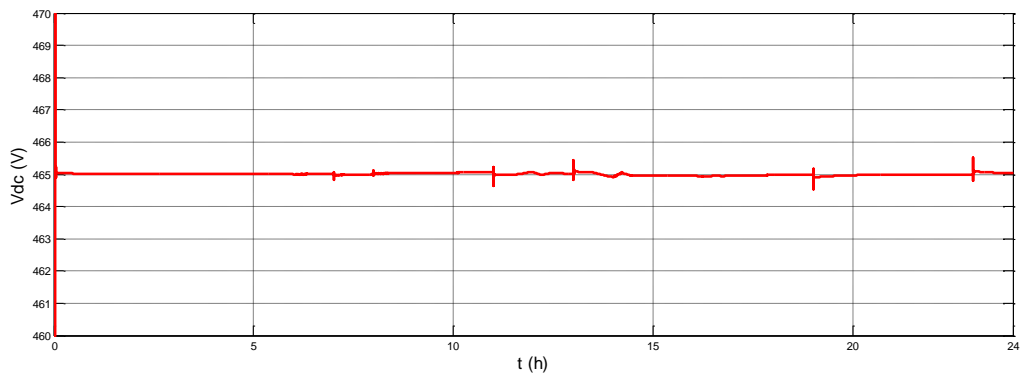


Figure III.22: La tension de Bus-continu V_{dc}

La figure (III.22) représente La tension de Bus-continu. Après un régime transitoire, la tension de Bus est gardée constante.

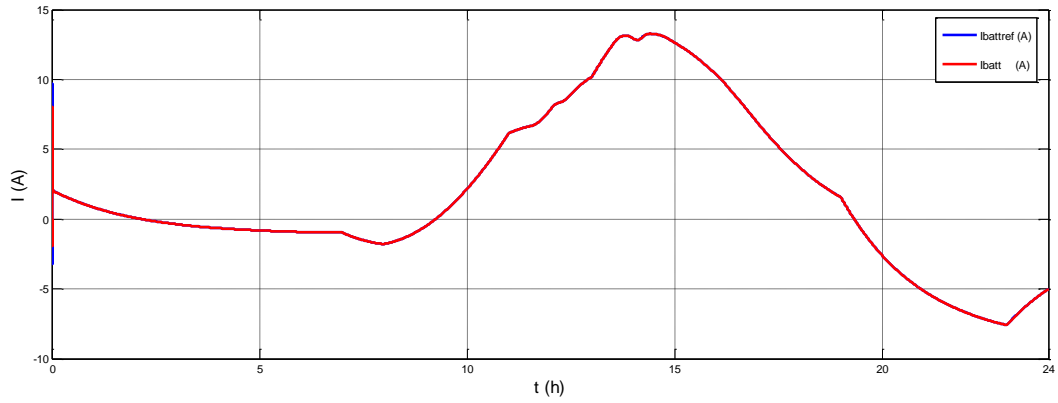


Figure III.23 : Courant de batterie et sa référence

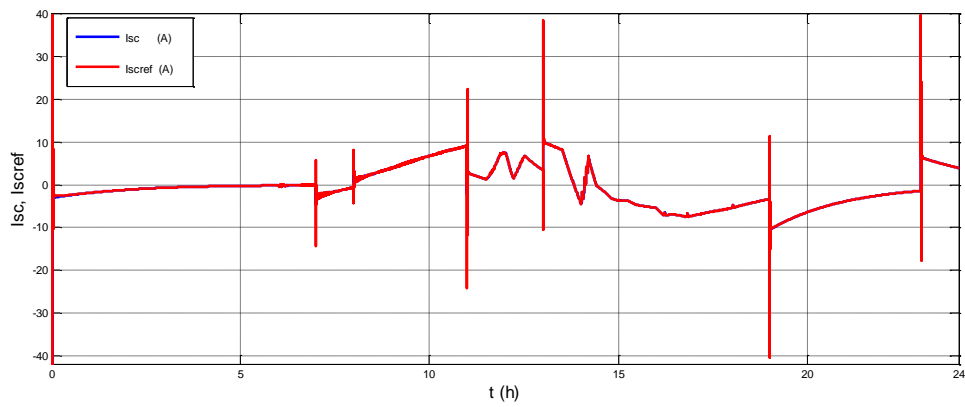


Figure III.24: Courant de super-condensateurs et sa référence

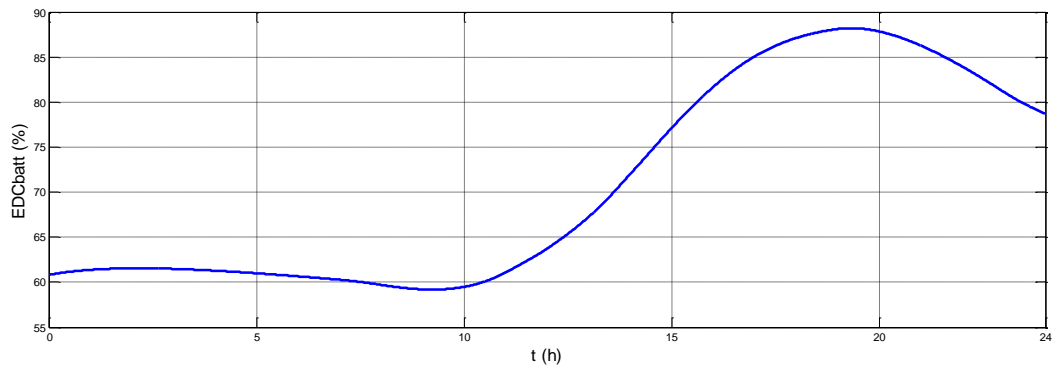


Figure III.25: Etat de charge de batteries

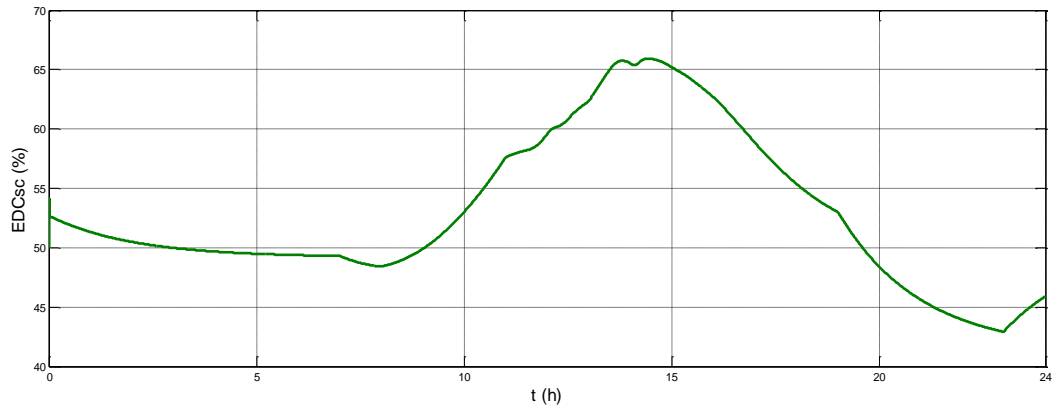


Figure III.26: Etat de charge de super-condensateurs

$$I_{dcref} = I_{scref} + I_{battref} \dots\dots\dots (III.7)$$

Si :

$$P_{pv} = p_{ch}$$

$$I_{dcref} = 0$$

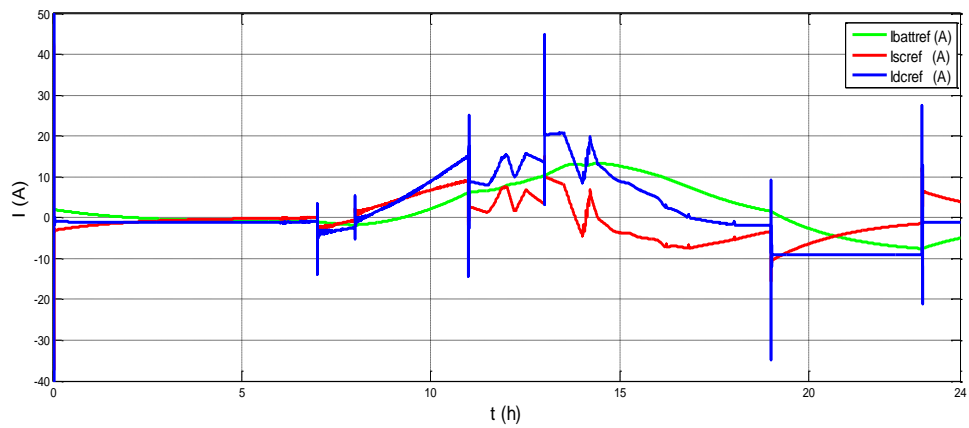


Figure III.27: Les courants I_{dcref} , $I_{battref}$, $I_{scttref}$

Nous remarquons dans la figure (III.27) que le courant I_{screef} est le résultat de la différence entre I_{dcref} et $I_{battref}$, et dans la même figure le mode charge et décharge est illustré par le signe de courant de stockage tel que le signe négatif indique une décharge et le signe positif indique un chargement, par conséquent le courant de référence du bus DC (I_{dcref}) est nul lorsque les panneaux PV produisent la puissance nécessaire à la charge.

Si le courant de référence du bus DC est négatif (lorsque les panneaux photovoltaïques donnent une puissance supérieure à celle souhaitée) et que le EDC des SC est supérieur à 90% (les super-condensateurs étaient saturés) le courant de référence des SC doit être nul si le EDC est inférieur à 90%, les super-condensateurs commencent à se charger, contrairement si le courant de référence du bus DC est positif (lorsque les panneaux photovoltaïques ne parviennent pas à fournir la puissance souhaitée) et que le EDC des SC est inférieur à 30%, le courant Iscref doit être nul.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en œuvre la gestion et le contrôle de flux énergétique dans un système photovoltaïque autonome à l'aide d'un programme de gestion entre le champ PV et la charge modélisé par un profil de consommation et les différents systèmes de stockage. 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.

Les résultats montrent également que la batterie sert à une alimentation de la charge durant les périodes dont la production du champ est nulle ou insuffisante et un bilan d'énergie à leurs bornes s'avérerait bien équilibré, ceci nous permet aussi de montrer l'efficacité de l'algorithme de supervision développé, 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, la présence du stockage hybride (batterie supercondensateurs) permet d'éviter les recharges et les débits excessifs.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est l'évaluation et le contrôle d'une installation photovoltaïque avec un stockage hybride, pour ce but nous avons procédé par étude à tous les composants de notre système auquel on a implanté un algorithme de gestion afin de gérer le flux d'énergie entre l'unité de stockage et de production et la charge.

Ce système fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT ; notre travail a été subdivisé en trois chapitres principaux dont :

Dans la première partie, nous avons étudié les différents types de système photovoltaïque, leur principe de fonctionnement, les avantages et inconvénients de ce type d'énergie et l'influence de chaque composant constituant le système PV.

Dans le deuxième chapitre, un système photovoltaïque autonome est étudié. 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 super-condensateur, 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.

Nous avons conçus sur l'environnement Matlab/Simulink, les modèles de tous les éléments du système étudié, nous remarquons les caractéristiques de générateur photovoltaïque dépendent d'une adaptation d'énergie par des techniques de contrôle adéquates afin de bien l'exploiter.

Dans le dernier chapitre on a procédé à la simulation du système hybride photovoltaïque avec stockage par batteries électrochimique (plomb-Acid). Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la méthode de gestion du flux d'énergie. Nous avons aussi montré les limites des batteries en présence de forte puissance de consommation. Pour remédier à ce problème, on a proposé l'utilisation d'une source hybride de stockage dont les éléments ont une fonction spécifique, soit en énergie (batterie), soit en puissance (super-condensateurs).

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

Conclusion Générale

efficacement aux pics de puissance. Les batteries ne fournissant, ainsi, que la puissance moyenne pour laquelle elles ont été dimensionnées. Ainsi on a proposé une méthodologie de développement de loi de gestion d'énergie pour un système photovoltaïque avec stockage hybride. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.

Comme perspectives, il serait intéressant d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation pour l'extraction du maximum de puissance puis faire une comparaison. Aussi faire des essais sur une installation réelle afin de valider l'algorithme de gestion d'énergie proposé.

Liste bibliographie

Liste bibliographie

- [1] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta et L. Guzzella, « Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle », *Control Engineering Practice*, vol. 13, n° 1, january 2005, pp. 41-53.
- [2] A. M. Razali, M. Rahman, G. George, N. Rahim et al. “Analysis and design of new switching lookup table for virtual flux direct power control of grid connected three-phase pwm ac–dc converter”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 2, pp.1189–1200, 2015.
- [3] M.Orgeret, «*Les piles solaires, le composent et ces applications*» Préface de F.Allest historique photo
- [4] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993
- [5] P.H. Communay, « Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs », Edition, France, 2002
- [6] A. T. Singo, « Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome », thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010
- [7] Mohamed Arrouf, « Optimisation De L’ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branche Sur Un Générateur Photovoltaïque ». , Université Mentouri De Constantine, Thèse De Doctorat Soutenue Le 25/12/2007.
- [8] D.Boukhers, « Optimisation d’un système d’énergie photovoltaïque application au Pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2007.
- [9] Ben djamaa Ibrahim « Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.
- [10] M. Merad-Boudia « Injection de l’électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », mémoire de magister, université de Tlemcen 2010.
- [11] Belakehal « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine 2010.

Liste bibliographie

- [12] Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483
- [13] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magister, université de Bechar, 2008.
- [14] A. Labouret, P. Cumunel, J. Braun et B. Faraggi, « Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque », édition Dunod Paris, 2010.
- [15] Mr Bouzid Allal El Moubarek, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme (Étude de l'onduleur triphasé li à cette application) », mémoire d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2008.
- [16] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.
- [17] AOUIFI Saliha. « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif-1. (2014)
- [18] BENSALÉM Salaheddine. « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques Des cellules solaires ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif. (2011)
- [19] ELSY Mansour. « Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio ». Projet de Fin d'Etudes. Université Libanaise. (2012)
- [20] Bendjellouli Zakaria, « Contribution A La Modélisation D'une Cellule Solaire », Université De Bechar, Mémoire De Magister Soutenue Le 28/06/2009.
- Stéphane VIGHETTI, « Systèmes Photovoltaïques Raccordés Au Réseau : Choix Et Dimensionnement Des Etages De Conversion », Université De Grenoble, Thèse De Doctorat Soutenue Le 24/09/2010.
- [21]. Ai, B. Yang, H. Shen, H. Liao, X, « Computer-aided design of PV/wind hybrid system Renewable Energy », vol. 28, pp. 1491–1512, 2003.
- [22] R. Maouedj « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » mémoire de magister université abou bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005

Liste bibliographie

- [23] A. Belkaid, « Optimisation de la commande des convertisseurs statique dans le cas de la production d'énergie électrique », Mémoire de magister, université de Bejaia, 2004.
- [24] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat. Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Avril 2015.
- [25] M.F. Shraif « Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique ». Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse 2002
- [26] R Kabouche, S .Harrouni et A. Talha, « Etude comparative des différentes technique de stockage de l'énergie solaire photovoltaïque », séminaire sur les énergies nouvelles et renouvelable SIENR'12 Ghardaïa, 2012.
- [27] T.AZIB thèse doctorat « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible Conceptions d'Architectures et de Leurs Commandes » Décembre 2010
- [28] A. NEFFATI THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par : Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride" Avril 2013
- [29] L. Debou et D. Maghribi. « Commande d'un système hybride (photovoltaïque- éolienne) de production d'énergie ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université de bejaia 2008.
- [30] Lassègues, J. C. Super condensateurs. Ed. Techniques Ingénieur. (2001).
- [31] H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon Utilisation des super condensateurs pour les stockages de l'énergie embarquée : applications transport CH-1728 Rossens, Suisse
- [32] N. RIZOUG. « Modélisation électrique et énergétique des super condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de super condensateurs basse tension en grande puissance universite de lille 02/ 2006.
- [33] J. Lachaize , Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des Systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, Thèse de doctorat, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004

Liste bibliographie

- [34] D. BOUQUAIN, A. MIRAOU, « Les supercondensateurs : principe, modélisation et application ». UTBM, Belfort Cedex-France.
- [35] A. NEFFATI THÈSE En vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse Délivré par : Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride" Avril 2013.
- [36] N. Bertrand, « Caractérisation électrique, mise en évidence des phénomènes physicochimiques et modélisation fractionnaire des super-condensateurs à électrodes à base de carbone activé », Université de Bordeaux 1, 2011.
- [37] D. Rekioua, O. Amrani, « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [38] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat. Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Avril 2015.
- [39] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri, 2010.
- [40] I. Hacini, « Etude et gestion d'un système hybride », Mémoire de magister en Electrotechnique. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.
- [41] T. MORIMOTO, K. HIRATSUKA, Y. SANADA, "Development and current status of electric double-layer capacitors", Material for Electrochemical Energy Storage and Conversion – Batteries, capacitors and Fuel cells, pp. 397-411, USA, 1995
- [42] K. Zaouche et A. Talha, Dispositifs de poursuite de puissance maximale pour systèmes photovoltaïques, Laboratoire d'Instrumentation, Faculté d'Electronique et d'Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. B.P.32, El-Alia, 16111 Bab-Ezzouar, Alger, Algérie.
- [43] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat. Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Avril 2015.

Liste bibliographie

- [44] Antonio Luque and Steven Hegedus, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [45] K. Himour, « Optimisation des systèmes photovoltaïques par l'insertion des onduleurs multi niveaux » Thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2015.
- [46] A. Singo. « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome ». Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.
- [47] V.Boitier, P. Maussion, « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », Université de Toulouse, INPT, UPS, CNRS
- [48] C. L. H, J. Wu, M. Zhang, J. M. Yang and J.P. Li. «Application of adaptive algorithm of solar cell battery charger ». Proceeding IEEE International Conference on Electric Utility de regulation Restructuring Power Technologies, pp. 810-813, 2004.
- [49] M. Akbaba, I. Qamber et A. Kamal. « Matching of separately excited DC motors to photovoltaic generators for maximum power output», Solar Energy, Vol. 63(6), pp.375- 385, 1998.
- [50] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Tounzi « Vector Control of Autonomous Induction Generator with Battery Storage System », Université de Bejaia, Universite de Lille, 2017.
- [51] L. Messikh, S. Chikhi, F. Chikhi et T. Chergui, ‘Mise au point d'un régulateur de charge / décharge de batterie avec seuils adaptatifs de tension pour les applications photovoltaïques’ Revue des Energies Renouvelables, 2008.
- [52] T.T. Ha Pham, C. Clastres, F. Wurtz, S. Bacha, S. Ploix, “Mise en œuvre de l'optimisation pour le dimensionnement et les études de faisabilité de systèmes multi sources Électriques dans le bâtiment” IBPSA France, 6 et 7 Novembre 2008, www.ibpsafrance.net

Annexes

Annexes

- **Les paramètres de générateur photovoltaïque**

Les constructeurs des modules photovoltaïques fournissent les paramètres du module « I_{mpp} », « I_{cc} », « V_{mpp} », « V_{co} » sous les conditions standards de fonctionnement, avec un éclairage de 1000 W/m^2 et une température de jonctions 25°C .

P_{pv}	Puissance crête de panneau photovoltaïque (Wc)	175 W
I_{mpp}	Courant maximum au PPM (A)	4.95 A
V_{mpp}	Tension maximum au PPM (V)	35.4 V
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)	5.4 A
V_{co}	Tension de circuit ouvert (V)	44.5 V
α_{sc}	Coefficient de la température de court-circuit (A/°K)	1.4 e-3 mA /°C
β_{oc}	Coefficient de tension (V/°K)	-152 e-4mV/°C

- **Les paramètres de la batterie :**

Le calcul des différentes puissances, le nombre de panneaux et le nombre de batteries à utiliser est présenté sur le tableau ci-dessous :

Le besoin journalier	38700 Wh/j
Puissance du générateur photovoltaïque	17080 W
Nombre de panneaux N_{pv}	122
Capacité de la batterie	255.2 Ah
Nombre de batteries N_{batt}	40

- **Les paramètres de super-condensateur :**

Paramètre	Valeur
R_1	0.8 mΩ
C_0	2170 F
C_v	520 F/v
R_2	1Ω
C_2	150 F

Résumé :

Notre but dans ce mémoire est évalué et contrôlé la production d'une installation photovoltaïque avec stockage hybride (batterie/super-condensateur).

Pour cela, un dimensionnement sur tous les composants a été fait, pour un profil de charge supposé nous avons visualisé à l'aide de simulation Matlab les différents transferts des flux énergétiques entre les différents composants du système en utilisant un algorithme de gestion, à l'aide de programme de gestion les résultats de simulation montrent un bilan énergétique au bornes des batteries s'avèrerait bien équilibrés d'autre part les super-condensateurs permettent d'éviter les décharges profondes et les débits excessifs.

Mots Clés : système d'énergie hybride, photovoltaïque, système de stockage gestion d'énergie, commande, simulation et MPPT