

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Energie et environnement**

Présenté par : **BENRAYA Yamina**
Thème

Gestion d'énergie électrique multi- source d'un site isolé

Soutenu publiquement, le 27 / 10 / 2020, devant le jury composé de :

Mme I. Bousmaha	MCB	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mr M. Mebrouki	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr N.Abouchabana	MCA	Univ. Laghouat	Co- Directeur de mémoire
Mr A. Kerboua	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinateur
Mme. M. Bouchaour	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2019/2020



Abréviations

1. PV : Système photovoltaïque
2. GPV : Générateur photovoltaïque
3. V_{co} : Tension à circuit ouvert
4. I_{cc} : Courant de court circuit
5. DC : Courant continu (Direct Current)
6. AC : Courant Alternatif (Alternating Current)
7. MPPT : Poursuite du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking)
8. FF : Facteur de Forme
9. PAC : Pile à Combustible
10. PEMFC : Pile à combustible de type membrane échangeuse de protons (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
11. D : Rapport cyclique
12. PI : Proportionnel et Intégral

Résumé

Dans ce travail nous avons effectué une étude pour alimenter un site isolé en électricité en utilisant comme source principale l'énergie solaire photovoltaïque (énergie renouvelable) couplée à une autre ressource renouvelable, à savoir, la pile à combustible (PAC), avec un système de stockage pour assurer l'autonomie. En effet, à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK on applique la commande MPPT par la technique *P&O* pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. À l'aide de convertisseurs DC-DC, les tensions des trois sources sont ajustées pour que celles-ci soient reliées à un bus DC. Un convertisseur DC-AC est alors utilisé pour obtenir le signal sinusoïdal désiré.

Abstract

In this work we carried out a study to supply a grid with electricity using as a principal source a solar photovoltaic energy (renewable energy) coupled to another renewable energy source, that is, a fuel cell along with an electricity storage system to ensure autonomy. Indeed, using MATLAB / SIMULINK we used the MPPT control by the *P&O* technique to ensure the pursuit of the maximum power point supplied by the photovoltaic generator. Using a DC-DC converter, we adjust the voltages of three elements of our energy system as to link them to a DC bus. A DC-AC inverter is then used to obtain the desired sinusoidal signal.

Dédicace

À la personne qui a sacrifié sa vie pour sa famille, et qui a relevé le défi d'assurer mes études, à l'homme qui a éclairé le chemin de ma réussite, à toi mon cher père.

À la prunelle de mes yeux, celle qui m'a toujours soutenue pour qu'elle me voit au sommet, à toi ma chère mère.

Au bonheur de ma vie :

*Ma jolie sœur Hasima et mes chers frères Yacine, Salah
et Aïssa*

À toute ma famille sans exception.

À toutes mes très chères amies.

*À tous mes collègues de la promotion électrotechnique
2017/2020*

Je dédie mon modeste travail pour vous tous...

Remerciements

En premier lieu, j'adresse le droit de reconnaissance et de remerciement à notre bienfaiteur Allah le miséricordieux de m'avoir inclus parmi les constants ayant reçu leur entière rétribution et de m'avoir également aidé à atteindre ce niveau de la science et de la technologie tout au long de mon cursus et le prix d'être mon protecteur dans le monde du travail tout en m'assurant santé, réussite et bonheur dans la vie.

Mes plus sincères remerciements à mon encadreur M.ABOUCHABANA Nabil; je lui exprime toute ma reconnaissance pour le temps qu'il m'a donné, sa patience et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.

Je voudrais présenter mes remerciements à mon co-encadreur Dr.MEBROUKI Mohamed pour le soutien, l'encouragement et surtout sa confiance en ma personne.

Je remercie également messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Mes remerciements à tous les enseignants de L'ESSA-TLEMCEN. Merci pour toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce que je suis aujourd'hui.

Table des matières

Abréviations	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	ix
Table des matières	xi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xv
Introduction	1
1 L'énergie solaire photovoltaïque, généralités et fonctionnement	3
1 Introduction	3
2 L'énergie renouvelable dans le monde	3
3 Changement du rayonnement solaire	4
4 Énergie solaire photovoltaïque	4
5 Différents types de technologies des cellules photovoltaïques	5
6 Conversion photovoltaïque	6
6.1 Définition et principe de fonctionnement	6
6.2 Modèle électrique de la cellule photovoltaïque	8
6.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule (module) photovoltaïque	9
6.4 Association des cellules photovoltaïques	11
6.5 Influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
7 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque (GPV)	14
8 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	15
8.1 Avantages	15
8.2 Inconvénients	15
9 Problème de stockage	15
10 Pile à combustible	16
11 Hybridation	17
12 Conclusion	18
Bibliographie	19
2 Dimensionnement d'une installation, convertisseurs statiques et gestion d'énergie	21
1 Introduction	21
2 Dimensionnement d'une installation hybride	21
2.1 Évaluation des besoins en énergie	21
2.2 Dimensionnement des modules photovoltaïques	21

2.3	Dimensionnement des batteries	23
2.4	Dimensionnement de la pile à combustible	24
3	Convertisseurs	24
3.1	Hacheur	24
3.2	Hacheur parallèle (Boost converter)	24
3.3	Hacheur série (Buck converter)	27
3.4	Hacheur bidirectionnel	30
4	Commande MPPT	30
5	Structure asservie d'un hacheur parallèle en utilisant le régulateur PI	32
6	Onduleur	35
6.1	Fonctionnement	35
7	Gestion d'énergie	36
7.1	Modes de fonctionnement	37
8	Conclusion :	38
Bibliographie		39
3 Simulation et interprétation des résultats		41
1	Introduction :	41
2	Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT	41
2.1	Fonctionnement sous les conditions standards	42
2.2	Comportement du système sous conditions d'ensoleillement variables	43
2.3	Bloc batterie et pile à combustible	45
3	Tension du bus DC	46
4	Conversion DC/AC en utilisant un onduleur monophasé	47
5	Gestion d'énergie	49
5.1	Mode 1	49
5.2	Mode 2	50
5.3	Mode 3	50
5.4	Mode 4	50
6	Conclusion	51
Bibliographie		53
Conclusion générale et perspectives		55
Annexe		57

Liste des figures

Figure (1.3) Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

Figure (1.4) a) Silicium pur, b) Silicium de type n et c) Silicium de type p

Figure (1.5) Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin

Figure (1.6) Caractéristique typique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

Figure (1.7) Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle

Figure (1.8) Caractéristiques résultant d'un groupement de n_s cellules en série

Figure (1.9) Exemple d'une installation domestique de panneaux photovoltaïques

Figure (1.10) Les courbes $I(V)$ (en haut) et $P(V)$ (en bas) sous diverses intensités d'éclairement à une température fixe $T_c = 25^\circ C$

Figure (1.11) Les courbes $I(V)$ (en haut) et $P(V)$ (en bas) pour différentes valeurs de température de fonctionnement à un niveau d'éclairement égal à $1000 W/m^2$

Figure (1.12) Principe de fonctionnement d'un accumulateur

Figure (1.13) Schéma de fonctionnement de la pile à combustible

Figure (2.1) Caractéristiques $I - V$ de la pile à combustible de type PEMFC $1.26 kW$, $24 V$ sous Matlab /Simulink

Figure (2.2) Symbole du Hacheur

Figure (2.3) Schéma principal d'un hacheur Boost

Figure (2.4) Formes d'ondes du hacheur Boost

Figure (2.5) Résultats d'un montage d'un hacheur Boost avec Matlab/Simulink

Figure (2.6) Schéma principal d'un hacheur Buck

Figure (2.7) Ondulation de tension aux bornes de condensateur

Figure (2.8) Formes d'ondes d'un hacheur Buck

Figure (2.9) Résultats d'un montage d'un hacheur Buck à l'aide Matlab/Simulink

Figure (2.10) Implémentation de la commande MPPT dans un système énergétique (GPV+charge)

Figure (2.11) Convergence vers le point de puissance maximale (PPM) avec la méthode $P\&O$

Figure (2.12) Organigramme de l'algorithme $P\&O$

Figure (2.13) Les formes d'onde de la puissance, rapport cyclique et tension d'un panneau photovoltaïque avec et sans MPPT et ce pour un éclairement de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$ obtenues par Matlab/Simulink

Figure (2.14) Les formes d'onde de la puissance, rapport cyclique et tension d'un panneau photovoltaïque avec et sans MPPT et ce pour un éclairement de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$ obtenues par Matlab/Simulink

- Figure (2.15) Abaque du temps de réponse réduit
- Figure (2.16) Symbole de l'onduleur
- Figure (2.17) Exemple d'une commande MLI (à interaction sinus triangulaire) d'un onduleur monophasé de tension en pont complet
- Figure (2.18) Onduleur de tension en pont
- Figure (2.19) Système de puissance avec un bus continu
- Figure (2.20) Algorithme de gestion d'énergie
- Figure (3.1) Schéma bloc du système complet à l'aide de MATLAB/SUMILINK
- Figure (3.2) Bloc de la commande MPPT simulé par MATLAB/SUMILINK
- Figure (3.2) Les différentes formes des signaux de tension, de courant, de puissance du générateur photovoltaïque ainsi que le rapport cyclique, pour des conditions d'ensoleillement standards.
- Figure (3.4) Variation dans le temps de la température des panneaux
- Figure (3.5) Variation dans le temps de la tension a) et du courant b) pour un éclairage fixe $1000 W/m^2$ et une température variable.
- Figure (3.6) Variation dans le temps de la puissance a) et du rapport cyclique b) pour un éclairage fixe $1000 W/m^2$ et une température variable.
- Figure (3.7) Signal de variation de l'éclairage
- Figure (3.8) La variation de la tension a) et du courant b) en fonction de l'éclairage pour une température de $25^{\circ}C$.
- Figure (3.9) La variation du point de puissance maximum a) et du rapport cyclique b) en fonction de l'éclairage pour une température de $25^{\circ}C$.
- Figure (3.10) Batterie avec convertisseur bidirectionnel
- Figure (3.11) Pile à combustible avec un hacheur Boost
- Figure (3.12) Bloc de régulateur PI implanté sur un hacheur Boost
- Figure (3.13) Tension du bus DC
- Figure (3.14) Bloc d'onduleur monophasé
- Figure (3.15) Signal de la tension alternative avant filtrage
- Figure (3.16) Signal de la tension alternative qui alimente la charge AC avec filtre
- Figure (3.17) Mode 1
- Figure (3.18) Mode 2
- Figure (3.19) Mode 3
- Figure (3.20) Mode 4
- Figure (??) Mode 4

Liste des tableaux

Tableau (1.1) Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Tableau (2.1) Dimensionnement des besoins domestiques.

Tableau (2.2) Dimensionnement du générateur photovoltaïque (GPV)

Tableau (2.3) Dimensionnement des batteries

Introduction

D'après les statistiques de l'agence internationale de l'énergie, plus de trois-quarts de la consommation énergétique mondiale pendant les dernières années étaient d'origine fossile (gaz, pétrole, charbon ou nucléaire...). Ces ressources classiques de stockage naturel limité sont épuisables surtout avec l'augmentation de la consommation mondiale. En plus de l'aspect économique, l'impact négatif des ces ressources fossiles sur l'environnement soit au niveau local (pollution), soit au niveau global (l'effet de serre) est perceptible. Aucune source d'énergie sur terre n'est parfaite même celles de nature renouvelable. En effet, si les énergies renouvelables ne sont pas polluantes (pas d'émission de gaz à effet de serre) et contribuent à préserver notre environnement ; en revanche, leur nature intermittente les rend moins fiables que les ressources fossiles.

La tendance mondiale est d'utiliser les énergies renouvelables : énergies solaire, éolienne ou hydraulique. Ce sont des énergies propres et inépuisables et représentent une meilleure solution pour produire de l'électricité. Le but de ce travail est d'étudier l'implantation des énergies renouvelables dans un site isolé pour un usage domestique ; et plus particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque associée à une pile à combustible avec des batteries pour assurer l'autonomie énergétique du site. Ces trois éléments d'énergie forment une multi-source assurant un fonctionnement économiquement fiable et écologiquement durable.

Ce mémoire contient trois chapitres. Le premier chapitre présente l'état d'art sur l'énergie solaire photovoltaïque et explique le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, les avantages et les inconvénients de cette énergie en passant par le problème de stockage et les solutions proposées telle que l'hybridation des sources énergétiques. Le dimensionnement de l'installation, les convertisseurs statiques utilisés (DC-DC et DC-AC), et la commande MPPT à base de la technique *P&O* font l'objet du deuxième chapitre. Enfin, le troisième chapitre présentera les résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK avec une discussion. Le mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre 1

L'énergie solaire photovoltaïque, généralités et fonctionnement

1 Introduction

Face à la croissance mondiale de la demande énergétique et à la décroissance des énergies fossiles, mais également au réchauffement climatique, le développement et l'utilisation des énergies propres devient une nécessité, surtout pour les sites isolés de consommation énergétique. Dans les sites isolés, les systèmes de production doivent être rentables économiquement et écologiquement et assurent l'autonomie d'énergie afin de faire un choix pour l'architecture, le dimensionnement et la stratégie de contrôle.

Ce chapitre présente l'état de l'art sur une des ressources renouvelables, particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque. Nous présenterons également le fonctionnement d'une cellule solaire, les différentes formes de stockage. Nous citerons aussi les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.

2 L'énergie renouvelable dans le monde

Les énergies renouvelables sont les énergies qui se renouvellent à une proportion (rythme) plus grande que celle à laquelle est consommée par les humains. Par conséquent, les énergies hydraulique, éolienne ou solaire sont des énergies renouvelables, alors que les autres formes d'énergie ne le sont pas car elles ne sont pas reproduites au même rythme que leur production. Ainsi, leur utilisation protège des risques de rupture d'approvisionnement et de volatilité des prix résultant des aléas des marchés internationaux des matières premières énergétiques [1, 2].

D'autre part, les énergies renouvelables permettent une maîtrise à long terme des prix de l'énergie rejoignant les coûts de production de l'hydroélectricité. Certaines technologies comme l'éolien terrestre a aujourd'hui pratiquement atteint la parité avec les coûts de l'électricité thermique, tandis que d'autres filières (solaire photovoltaïque, biomasse) réduisent leur écart initial de compétitivité. Bénéficiant d'un marché mondial, d'un flux d'innovations technologiques régulier et de dispositifs d'incitation financiers variés, l'investissement dans les équipements de production d'énergies renouvelables (turbines éoliennes, modules solaires, chaudières biomasse...) est stimulé par la perspective de produire, dans un proche avenir, de l'énergie à des conditions compétitives, avec des coûts d'exploitation très réduits par rapport aux autres sources d'énergie [3].

Il est important de rappeler que les énergies renouvelables contribuent à limiter les impacts de la production d'énergie sur l'environnement : diminution des émissions de gaz à effet de serre,

réduction des effets sur l'air et sur l'eau, absence de production de déchets, etc . Les installations de production d'énergies renouvelables affectent faiblement l'environnement, la biodiversité et le climat et sont par conséquent bénéfiques pour la santé humaine et animale [4].

3 Changement du rayonnement solaire

L'atmosphère du rayonnement solaire dépend de phénomènes assez complexes et surtout en grande partie aléatoires. L'état de notre ciel et donc le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres, parmi lesquels on cite [5] :

- Le gaz présent dans l'atmosphère
- Les nuages
- L'albédo (réflectivité du sol)
- La température ambiante
- Le vent
- L'humidité relative

Ces paramètres, eux-mêmes, dépendent du lieu géographique, de la saison, de l'heure de la journée et des conditions météorologiques. Les scientifiques, en particulier les climatologues, ont élaboré des modèles pour décrire et prédire ces phénomènes atmosphériques, bien que le moyen le plus sûr pour disposer de données fiables est encore de recourir à des statistiques accumulées sur des années antérieures grâce à des instruments de mesure. Parmi les instruments de mesure, on trouve le pyranomètre (voir figure (1.1)). Le pyranomètre est un capteur qui sert à évaluer,

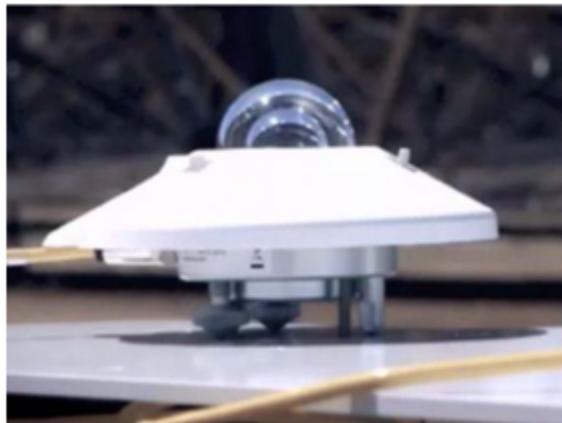


FIGURE 1.1 – Pyranomètre [1]

à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct + diffus) sur une surface donnée sur un très large spectre de 0.3 à $3 \mu m$ de longueur d'onde. Par exemple, le pyranomètre CMP21 mesure des longueurs d'onde de $0.285 \mu m$ à $2.8 \mu m$.

4 Énergie solaire photovoltaïque

Ce type d'énergie est utilisé pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques. La notion photovoltaïque provient du mot grec (phos) qui veut dire lumière et du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (inventeur de la pile

électrique en 1800). Mais c'est au chercheur français Antoine Becquerel que revient le mérite d'être le premier à mettre en évidence, en 1839, la conversion de la lumière en électricité. Le fonctionnement de la première cellule montée par Edmond Becquerel est illustré sur la figure (1.2).

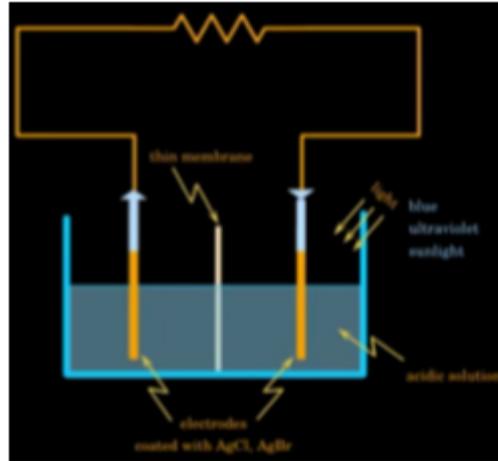


FIGURE 1.2 – Schéma de la première cellule photovoltaïque montée par Edmond Becquerel [4].

Il fallait attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent l'exploitation de ce phénomène. Parmi ces chercheurs, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules appelées photons, et dont l'énergie est donnée par la relation [5] :

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte a valu à Albert Einstein le prix Nobel en 1905. Ainsi, une cellule photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique.

D'autre part, la production électrique d'une installation photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer :

- Dimensionnement des panneaux photovoltaïques
- Technologie utilisée dans la fabrication des panneaux
- Intensité du rayonnement reçu
- Durée d'exposition des panneaux

5 Différents types de technologies des cellules photovoltaïques

Il existe une large variété de technologies d'exploitation de l'énergie photovoltaïque que l'on peut classer selon le matériau utilisé et la génération. Le tableau (1.1) passe en revue les différentes générations et leurs performances :

	Technologie	Rendement	Avantages	Inconvénients	Durée de vie
1ère Génération	Silicium monocristallin	14-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium polycristallin	12-15%	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
2ème Génération	Silicium amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	<10 ans
	CdTe (Tellure de Cadmium)	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée
	CIS/CIGS (Indium de cuivre et Sélénium de Gallium)	10-12%	Énergie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3ème Génération	Cellules organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas	Faible actuellement

TABLE 1.1 – Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [2]

6 Conversion photovoltaïque

6.1 Définition et principe de fonctionnement

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie des photons (rayonnement) en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par le matériau de base de la cellule photovoltaïque.

Les photopiles (les cellules) sont des composants électroniques à semi-conducteur qui, lorsqu'ils sont éclairés par le rayonnement solaire (absorbent les photons), développent une force électromotrice capable de débiter un courant dans le circuit extérieur (voir figure (1.3)).

Cette force se traduit d'un point de vue électrique par la création d'un pair électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges, créant ainsi une différence de potentiel électrique : c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de récupérer les charges avant que ces dernières ne soient recombinaisons dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction *pn* permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électrons-trous créées par la collision des photons dans le matériau. Il est à rappeler que chaque matériau semiconducteur possède un gap d'énergie caractéristique (zone interdite de niveaux énergétiques). Dans un

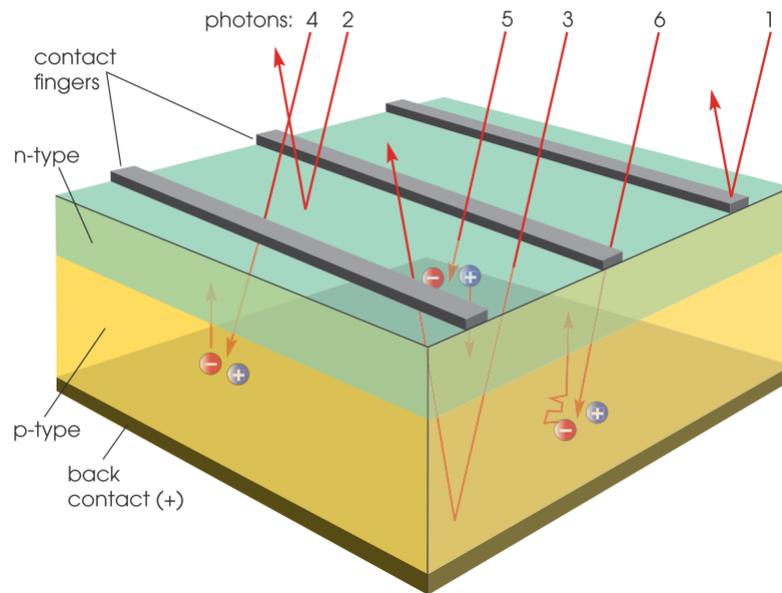


FIGURE 1.3 – Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [4].

semi-conducteur pur où nombre de porteurs est faible à température ordinaire, la conductivité électrique est médiocre.

Le silicium(Si) est le matériau le plus utilisé dans les cellules photovoltaïque. Il représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur terre, avec une stabilité parfaite et ne présentant aucune toxicité. L'élément de silicium possède quatre électrons sur sa couche de valence (périphérique). Ainsi, dans une structure solide de silicium, chaque atome Si est lié à quatre atomes voisins de même type, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons [4].

- Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 5 électrons périphériques (phosphore P par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit dopé du type *n*.
- Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons périphériques (bore B par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi-conducteur est dit dopé du type *p*.

On dit que les éléments comme le Bore et le Phosphore sont des dopants du silicium. La figure (1.4) explique le dopage de silicium.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction *pn* soumise à un éclairage sont également mesurables entre les bornes de la cellule photovoltaïque. Typiquement, la tension maximale d'une cellule *pn* est d'environ 0.5 à 0.8 V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension à circuit ouvert V_{oc} . Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule photovoltaïque et on le nomme communément courant de court-circuit I_{cc} [5].

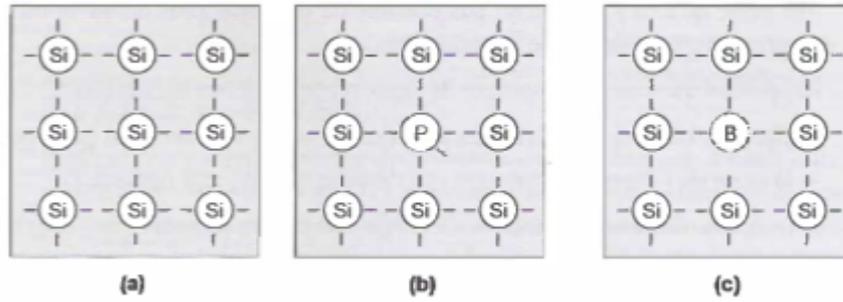


FIGURE 1.4 – a) Silicium pur, b) Silicium de type N et c) Silicium de type P [4].

6.2 Modèle électrique de la cellule photovoltaïque

La jonction *pn* présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie une fois illuminée. On peut modéliser ce comportement statique par un schéma équivalent de la cellule (voir figure (1.5)), en tenant compte des pertes ohmiques [6].

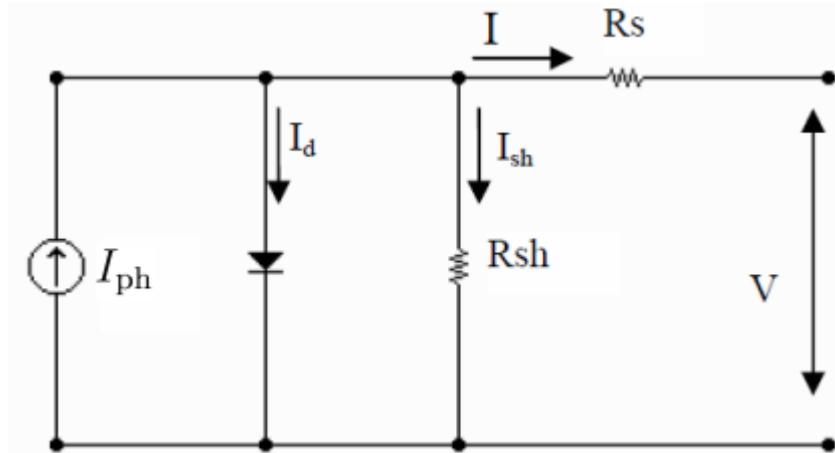


FIGURE 1.5 – Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin [6].

L'expression du courant électrique délivré par une cellule photovoltaïque (loi de Kirchoff) est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{e(V + R_s I)}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

avec

I_{ph} : photocourant directement lié à l'éclairement solaire

I_{sat} : courant de saturation de la jonction (très faible)

$V_T = k_B T_c$: potentiel thermodynamique où $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin}$ est la constante de Boltzmann et T_c la température de la cellule mesurée en Kelvin.

e : charge électrique élémentaire

V : tension aux bornes de la cellule photovoltaïque

n : facteur de non-idéalité de la jonction

R_s : résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

R_{sh} : résistance en parallèle (résistance de shunt) rajoutée afin de tenir compte des défauts macroscopiques dans la cellule solaire, lesquels peuvent fournir un chemin alternatif pour le photo-courant produit par la cellule.

6.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule (module) photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par son rendement de conversion η , sa tension à circuit ouvert V_{co} , son courant de court-circuit I_{cc} et son facteur de forme FF (Fill Factor). Ces caractéristiques permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Les caractéristiques courant-tension $I - V$ sont utilisés pour déterminer ces paramètres.

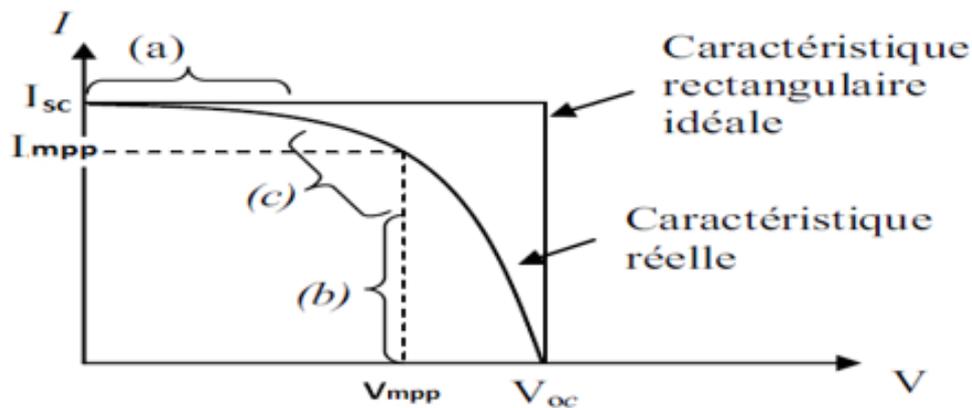


FIGURE 1.6 – Caractéristique typique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [6].

La figure (1.6) illustre la caractéristique I-V typique d'une cellule photovoltaïque avec quatre paramètres caractéristiques :

- V_{co} (en anglais V_{oc}) : tension à circuit ouvert.
- I_{cc} (en anglais I_{sc}) : courant à court-circuit.
- V_{mpp} : tension au point maximum de puissance.
- I_{mpp} : courant au point maximum de puissance.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant $\simeq I_{cc}$.
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension $\simeq V_{co}$
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

1. Courant de court-circuit

On court-circuite les deux électrodes de la cellule photovoltaïque à travers un ampèremètre (tension nulle $V = 0$). Les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photo-courant I_{ph} généré par le rayonnement, tel que :

$$I_{cc} \simeq I_{ph} \quad (1.3)$$

Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant I_{ph} est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation de rayonnement solaire :

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (1.4)$$

où q est la charge élémentaire, G la quantité de paires électron-trou générée qui traverse la jonction et L_n, L_p longueurs de diffusion des charges p et n dans la jonction, respectivement.

2. Tension à circuit ouvert

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs de charge générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension à circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant. La tension à circuit ouvert V_{co} correspond à un courant nul $I = 0$:

$$V_{co} = \frac{nk_B T_c}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (1.5)$$

La tension à circuit ouvert d'une cellule solaire varie de manière logarithmique avec l'éclairement (photocourant I_{ph}), contrairement au courant de court circuit I_{cc} qui, lui, est relié à I_{ph} de manière linéaire, et décroît avec la température. Dans les cellules photovoltaïques à base de silicium, la tension V_{co} est de l'ordre de 0,4 à 0,6 et le courant I_{cc} est de l'ordre de 12 mA.

3. Puissance maximum

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V , telle que :

$$P = V \times I \quad (1.6)$$

Pour une courbe caractéristique $I - V$ idéale (rectangulaire), la puissance maximum $P_{idéale}$ est égale à :

$$P_{idéale} = V_{co} \times I_{cc} \quad (1.7)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V(P_{idéale})$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni $I(P_{idéale})$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc} . Ainsi, une cellule photovoltaïque a un point de puissance maximum telle que :

$$P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (1.8)$$

où V_{mpp} est la tension au point maximum de puissance et I_{mpp} le courant au point maximum de puissance (voir figure(1.6)).

4. Facteur de forme

Le facteur de forme (FF : en anglais fill factor) représente l'efficacité de la cellule dont la valeur nous renseigne sur l'état de vieillissement de la cellule. Le facteur de forme est défini comme le rapport entre la puissance maximale débitée P_{\max} et la puissance idéale $P_{\text{idéale}}$:

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_{\text{idéale}}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (1.9)$$

5. Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie η d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance générée P_{gen} et la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} mesurée en W/m^2 . On appelle rendement maximal η_m , le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente, telle que [1] :

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{co} \times I_{cc}}{P_{\text{in}}} FF \quad (1.10)$$

6.4 Association des cellules photovoltaïques

1. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, celles-ci sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à une tension donnée (voir figure (1.7)).

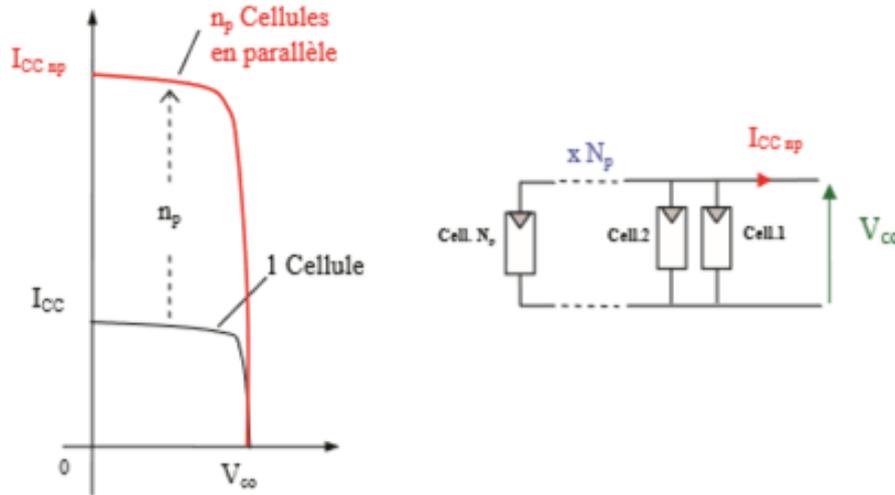


FIGURE 1.7 – Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle [7].

Ainsi, le courant de court-circuit I_{cc}^{np} d'un groupement de n_p cellules photovoltaïques similaires (mêmes caractéristiques) mises en parallèles est donné par [7] :

$$I_{cc}^{np} = n_p I_{cc} \quad (1.11)$$

où I_{cc} est le courant de court-circuit d'une seule cellule photovoltaïque. Dans ce cas, la tension à circuit ouvert du groupement est la même que celle d'une seule cellule photovoltaïque :

$$V_{co}^{np} = V_{co} \quad (1.12)$$

2. Association en série

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. 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 (voir figure(1.8)), tels que :

$$I_{cc}^{ns} = I_{cc} \quad (1.13)$$

et

$$V_{co}^{ns} = n_s V_{co} \quad (1.14)$$

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires

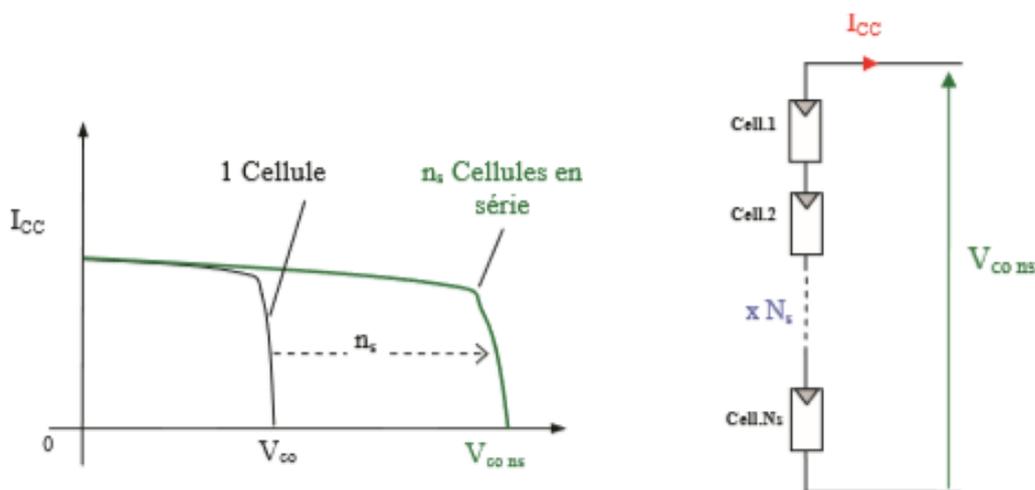


FIGURE 1.8 – Caractéristique résultant d'un groupement de n_s cellules en série [7].



FIGURE 1.9 – Exemple d'une installation domestique de panneaux photovoltaïques.

montées en série et/ou parallèle (voir figure (1.9)) afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension à circuit ouvert.

6.5 Influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Parmi les paramètres externes qui influencent sur le bon fonctionnement d'une cellule (module) photovoltaïque on peut citer la température de la cellule et le niveau d'éclairement reçu par celle-ci. Pour voir l'effet des ces deux paramètres sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques, nous avons utilisé Matlab/Simulink pour tracer les caractéristiques d'un panneau de type (1 Soltech 1STH-215-P) avec une puissance maximum $P_{max} = 213.15 W_c$.

1. Influence de l'éclairement

L'éclairement est l'un des paramètres d'influence majeurs sur le courant, la tension et la puissance d'une cellule photovoltaïque. La figure (1.10), obtenue à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, illustre les courbes $I(V)$ (courant-tension) en haut et $P(V)$ (puissance-tension) en bas, et ce pour des valeurs (1000, 800, 600, 400 W/m^2) d'intensité d'éclairement solaire à une température fixe $T_c = 25^\circ C$.

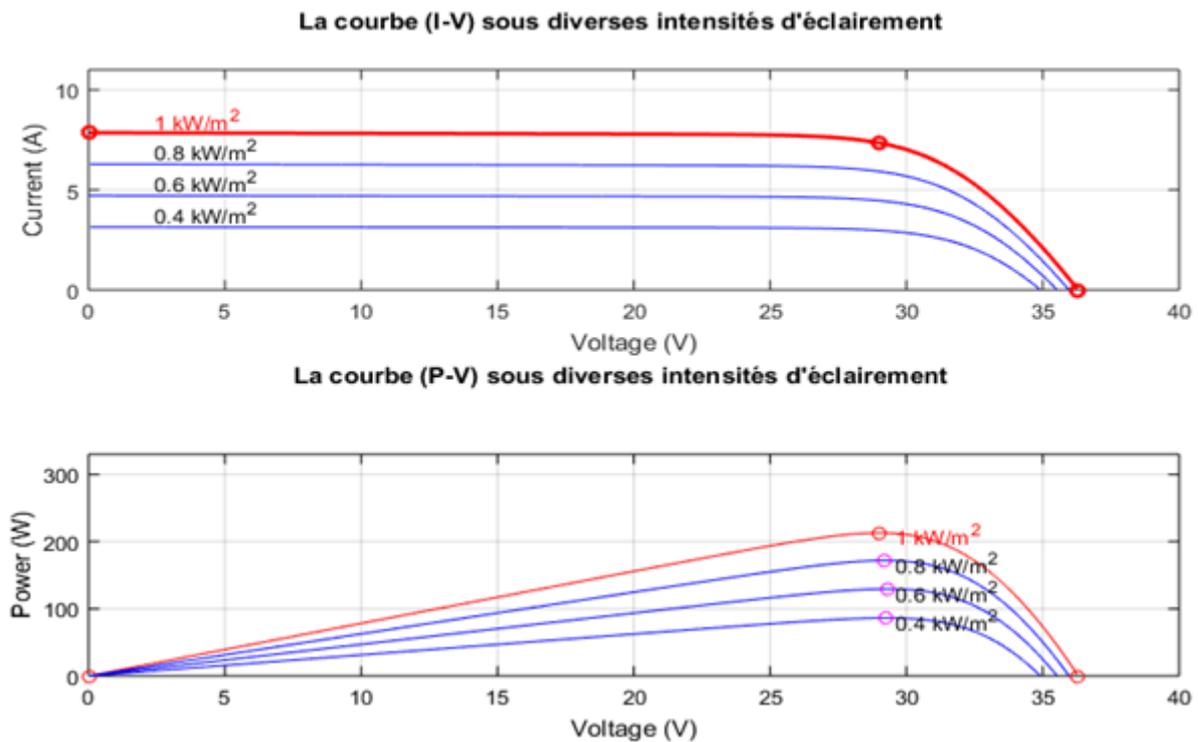


FIGURE 1.10 – Les courbes $I(V)$ (en haut) et $P(V)$ (en bas) sous diverses intensités d'éclairement à une température fixe $T_c = 25^\circ C$.

L'examen de ces courbes montre que le courant de court-circuit I_{cc} est linéairement proportionnel au niveau d'éclairement. Toutefois, la tension à circuit ouvert V_{co} ne se dégrade pas trop lorsque l'intensité d'éclairement baisse. Par conséquent, la puissance maximum augmente avec l'augmentation de l'éclairement.

2. Influence de température

La figure (1.11) illustre l'effet de la température sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Les caractéristiques $I(V)$ (courant-tension) en haut et $P(V)$ (puissance-tension) en

bas y sont tracées pour des valeurs de température (50, 40, 25, 10 °C) à une valeur d'éclairement fixe (1000 W/m^2).

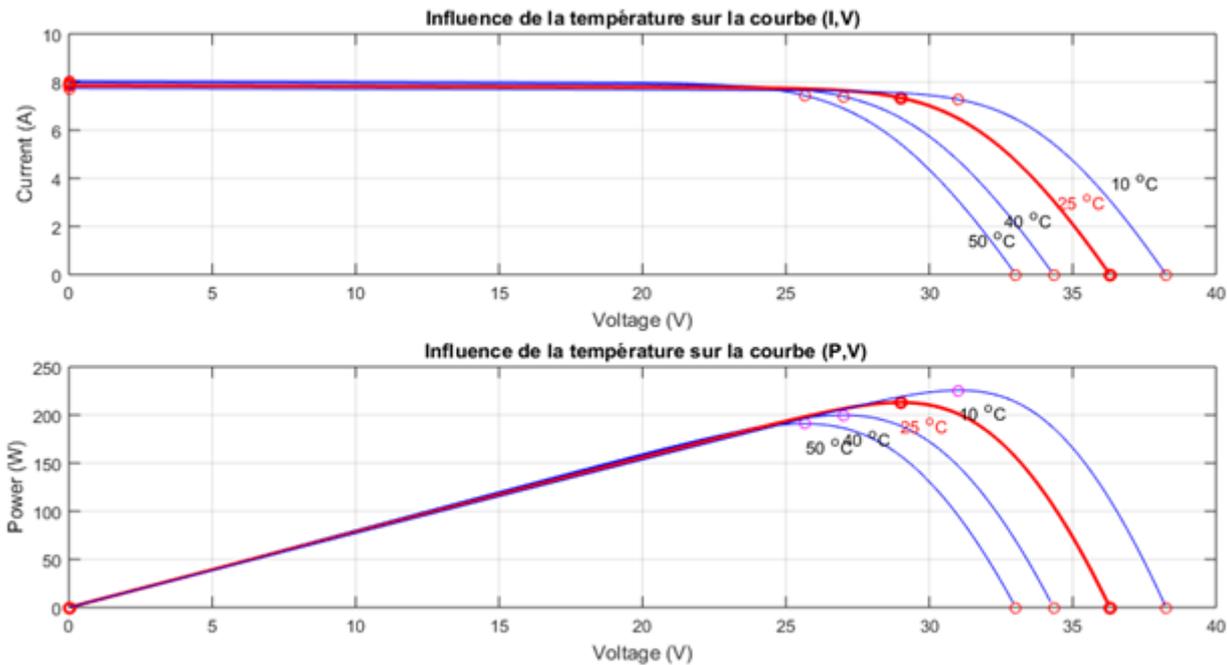


FIGURE 1.11 – Les courbes $I(V)$ (en haut) et $P(V)$ (en bas) pour différentes valeurs de température de fonctionnement à un niveau d'éclairement égal à 1000 W/m^2 .

L'examen de ces courbes montre un effet minime de l'augmentation de la température sur la valeur du courant de court circuit I_{cc} , alors que la tension à circuit ouvert V_{co} diminue avec la température de manière considérable. On peut expliquer cela par le fait que d'un côté l'augmentation de la température fait passer plus d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction (effet thermique) mais de l'autre côté elle fait augmenter le courant de saturation (de fuite) dans le sens de polarisation inverse de la diode ; ce qui diminue la tension à circuit ouvert. Le concours de ces deux effets opposés dégrade la puissance à un rapport de 0,4 à 0,5% par degré.

7 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles :

- Les diodes anti-retour empêchant un courant négatif dans les générateurs photovoltaïques. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur ; par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds (en anglais : hot spots) et la destruction des cellules mal éclairées.

8 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

8.1 Avantages

Il existe plusieurs avantages écologique, économique et technique de l'énergie solaire photovoltaïque ; on cite parmi eux :

- C'est une énergie propre n'émettant aucun gaz à effet de serre, inépuisable à l'échelle humaine.
 - Elle permet la réduction des émissions de CO_2 due à la réduction des rejets polluants et à la préservation des ressources naturelles.
 - Le panneau solaire photovoltaïque contribue à l'évolution des consciences vers la préservation de la nature.
 - Les panneaux solaires photovoltaïques sont recyclables.
 - Elle a une très bonne rentabilité et un amortissement rapide (du fait de la baisse de prix des installations photovoltaïques divisé par 2 en 5 ans)
 - La valeur d'une maison (bâtiment) augmente grâce à la mise en place d'une installation photovoltaïque.
 - Les systèmes photovoltaïques sont simples, rapides à installer, robustes et nécessitant très peu de maintenance.
- Une évolution technique importante depuis plus de 5 ans (micro-onduleur, domotique, suivi de production, système de batterie...)

8.2 Inconvénients

Parmi les inconvénients des systèmes exploitant l'énergie solaire photovoltaïque, on cite :

- L'énergie solaire est une source d'énergie intermittente.
- L'installation nécessite beaucoup d'espace.
- Cout élevé des installations.
- Le rendement électrique diminue avec le temps 20% pendant 20 ans.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, 10–15% avec une limite théorique pour une cellule de 28%
- Production plus faible à l'hiver, alors que la consommation est plus forte.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent sous tension 220 V alternative.

9 Problème de stockage

L'énergie solaire étant de caractère intermittent et aléatoire, il y a une nécessité de stockage pour compenser les passages nuageux, les nuits et les journées sans soleil. L'énergie solaire, tout comme l'énergie éolienne et la plupart des énergies nouvelles et renouvelables ne peut, que très rarement, être utilisée au moment où elle est produite. De cette simple constatation, il découle que l'énergie produite doit être stockée. Il existe plusieurs formes pour stocker l'énergie ; mais aucune n'est parfaite [8].

Ci-dessous, on cite les quatre principales formes de stockage :

- **Stockages mécanique** : Hydraulique, sous forme d'énergie de pression, de vapeur et stockage inertiel.
- **Stockage électrique** : Les condensateurs, super-condensateurs, les inductances supra-conductrices et les dispositifs à énergie.
- **Stockage chimique** : Les piles sont de petits générateurs électrochimiques permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une réaction chimique. Toutes sont constituées de deux électrodes entourées de réactifs et baignant dans un électrolyte. Il existe de très nombreux types de piles.
- **Accumulateurs électrochimiques (batteries)** : Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique, utilisé comme cellule secondaire, est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique (voir figure(1.12)). Toute réaction chimique d'oxydo-réduction spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées [8]. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système

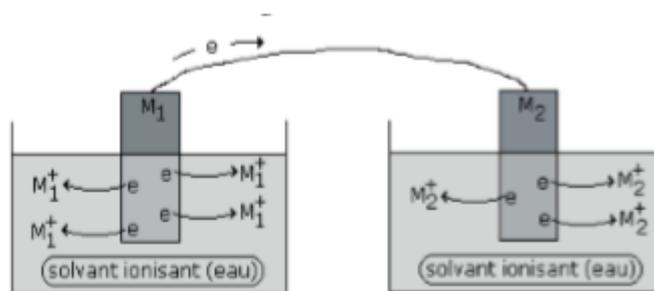


FIGURE 1.12 – Principe de fonctionnement d'un accumulateur [8]

Les accumulateurs présentent un grand intérêt dans les études actuelles de stockage d'énergie électrique pour une gamme des moyennes puissances et de durées de stockage limitées. Ils présentent le triple avantage d'exister industriellement, d'être parfaitement modulaires et d'entrer immédiatement en action. D'autre part, ils peuvent être installés chez l'utilisateur, ce qui résout le problème de l'encombrement des lignes de transport en période de pointe et réduit le coût de transport et les pertes en lignes.

10 Pile à combustible

La pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'hydrogène en énergie électrique en chaleur et en eau (vapeur), par une oxydation catalytique d'un combustible avec un très bon rendement, où le combustible est fréquemment l'hydrogène et l'oxydant est généralement l'oxygène dans l'air. Lorsque l'hydrogène est introduit à l'anode, le catalyseur le décompose en électrons et en protons ; donc une oxydation. Ensuite, les protons passent à travers l'électrolyte (solution aqueuse, saturée ou non, membrane céramique etc..), et réduisent l'oxygène à la cathode en formant de l'eau alors que les électrons transitent par le circuit externe créant une source d'électricité purement propre.

À la différence d'une batterie, les électrodes dans une pile à combustible ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe et, aussi longtemps qu'ils sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler.

Les piles à combustibles existent sous plusieurs types classés selon la nature de la membrane (solide/liquide) et la température de fonctionnement (basse/haute).

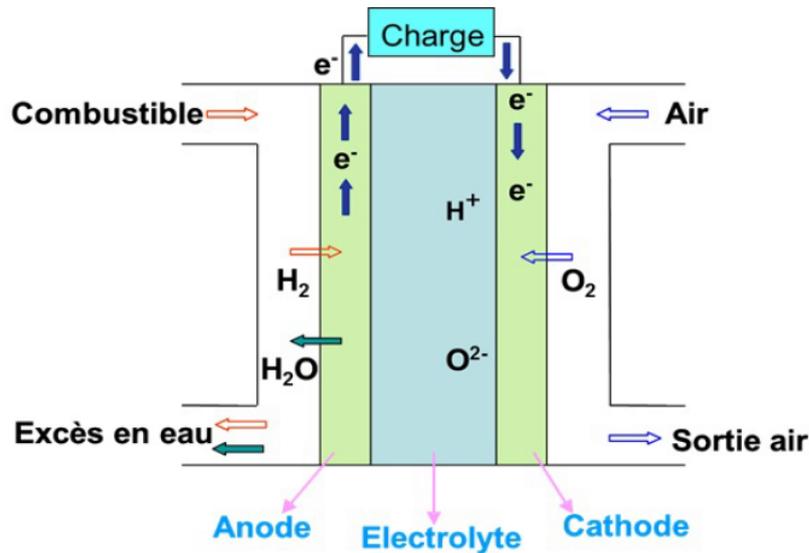


FIGURE 1.13 – Schéma de fonctionnement de la pile à combustible [9]

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau (voir figure(1.13)). En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, et ce selon la réaction chimique simple suivante :



La réaction chimique (1.17) est obtenue des réactions OX-RED suivantes :

Oxydation



Réduction



11 Hybridation

Selon la diversité de sources d'énergie et d'unités de stockage on sélectionne notre choix d'architecture. De ce fait, les systèmes hybrides sont, en général, constitués de sources d'énergie classiques (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (solaire, éolienne) et peut-être d'autres sources d'énergie (par exemple le réseau) et un système de stockage (batterie) [10].

Pour le choix de la source on utilise l'énergie solaire photovoltaïque, et la pile à combustible. La présence d'unités de stockage est très importante, surtout pour le site isolé, afin d'assurer l'autonomie à moyen terme et aussi pour faire l'équilibre énergétique. Ce genre de système appelé " multi-source" est souvent utilisé à cause de la gratuité de la source de l'énergie photovoltaïque (rayonnement solaire), mais aussi parce que la deuxième source (pile) est très intéressante à cause de ses résidus (température, vapeur d'eau). Aussi, ce système multi-source a l'avantage de protéger l'environnement contre l'effet de serre.

12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement des systèmes exploitant l'énergie solaire photovoltaïque, leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que les technologies mises en service. Ce type d'énergie étant de nature intermittente, l'utilisation d'une multi-source est devenue une nécessité pour l'alimentation des sites isolés déconnectés du réseau électrique. Notre choix s'est porté sur l'utilisation des piles à combustible comme source secondaire appuyée par un système de stockage d'électricité afin d'assurer l'autonomie du site. Le dimensionnement du besoin, le type d'installation et les techniques utilisées pour le fonctionnement de chaque source est l'objectif du chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] Arno H.M. Smets et al., "Solar energy : The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies" UIT Cambridge, England, 2016.
- [2] Assia Halouane , "Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque" mémoire de Master, Université M'hamed Bougera Boumerdes, 2018.
- [3] Emanuelle Riolet "L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier", Eyrolles, 2010.
- [4] Paul A. Lynn, " Electricity from Sunlight : An Introduction to Photovoltaics", Wiley, 2010.
- [5] A. Labouret et M. Viloz, "Énergie solaire photovoltaïque", 2 ème édition, Dunod, Paris, 2003.
- [6] L. Bentouati, "Étude d'un convertisseur DC/DC pour application PV", Mémoire de Master, Université Amar thelidji, Laghouat, 2015.
- [7] S. Petibon, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [8] N. Achabou, "Stockage des énergies renouvelables", Bulletin des Énergies Renouvelables ,CDER Bouzareah, N5, 2004.
- [9] Aicha Saadi , "Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2014.
- [10] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-source photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supra condensateurs", Thèse de doctorat, École nationale supérieur d'ingénieur de Poitiers, 2013

Chapitre 2

Dimensionnement d'une installation, convertisseurs statiques et gestion d'énergie

1 Introduction

Parmi les soucis majeurs concernant la généralisation de l'utilisation des énergies renouvelables est de réduire encore plus le coût des systèmes énergétiques tout en augmentant leur rendement. L'évaluation de notre besoin est très important pour dimensionner l'installation dédiée à l'exploitation de ce type d'énergie. Cependant, il existe un autre problème qui concerne les systèmes d'adaptation de cette énergie.

Le dimensionnement est très important pour notre installation. Il s'agit en particulier de dispositifs de régulation et de conversion de l'énergie tels que les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et DC/AC (onduleurs) dont le rendement influence directement sur le rendement global de l'alimentation dans son ensemble.

2 Dimensionnement d'une installation hybride

2.1 Évaluation des besoins en énergie

Nous avons choisi une installation pour un site isolé (non connecté au réseau) dont le cahier de charges est cité dans le tableau (2.1). L'énergie journalière moyenne totale consommée est égale à $E_c = 3147 Wh$.

2.2 Dimensionnement des modules photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque produit de l'électricité d'une manière intermittente. De ce fait, la puissance fournie varie en fonction du niveau d'éclairement, mais aussi en fonction du changement des heures de la journée pendant toute l'année. Concernant le nombre de panneaux, nous utilisons deux paramètres ; à savoir, l'irradiation incidente moyenne journalière reçue (mesurée en $kWh/m^2/jour$) et la consommation moyenne journalière. Nous effectuons ce calcul sur la période la plus défavorable avec une inclinaison optimale, en tenant compte des pertes d'énergie. Pour une énergie consommée E_c , nous devons produire une énergie E_p

Appareils électriques	Période de fonctionnement Par jour (h)	Puissance moyenne consommée(W)	Énergie journalière moyenne consommée (Wh)	L'énergie annuelle moyenne consommée (kWh)
PC	2	150	300	109.5
3 Ampoules de type LED classe A++	7	21	147	53.655
1 Télévision écran LED	4	75	300	109.5
Réfrigérateur 50L	24	100	2400	876

TABLE 2.1 – Dimensionnement des besoins domestiques.

suffisante dont l'expression est donnée par [1] :

$$E_p = \frac{E_c}{k} \quad (2.1)$$

où k est le coefficient d'incertitude météorologique dont la valeur est, en général, comprise entre 0.55 et 0.65. Dans notre étude, nous fixons sa valeur à $k = 0.65$.

La puissance consommée crête P_c qui correspond à l'énergie consommée E_c est déterminée en fonction de l'irradiation par :

$$P_c = 1000 \frac{E_c}{I_r} \quad (2.2)$$

où I_r est l'irradiation (exprimée en $kWh/m^2/jour$) à $1000 W/m^2$. On prendra une irradiation de $E_c = 6 kWh/m^2/jour$ avec une orientation plein sud. Le facteur 1000 vient des conditions standards (température $25 C$, éclairement $1000 W/m^2$) qui est le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90°) (gisement solaire). Ainsi, pour connaître le nombre de modules, il suffit de diviser cette puissance par la puissance du module, le tout multiplié par 1000. Le nombre N_m de panneaux est alors donné par la relation suivante :

$$N_m = 1000 \frac{E_u}{E_m} \quad (2.3)$$

avec E_u est l'énergie utile et E_m l'énergie d'un module (selon le modèle utilisé).

Une fois le nombre de modules déterminé, nous passons à l'architecture série et parallèle par les relations suivantes :

$$N_{ms} = \frac{T_{fr}}{V_{\max}} \quad (2.4)$$

où N_{ms} est le nombre de modules en série, T_{fr} la tension du régulateur utilisé et V_{\max} la tension maximale du module. D'autre part, le nombre de branches en parallèle N_{bp} est donné par :

$$N_{bp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (2.5)$$

Application numérique

Le tableau (2.2) illustre les résultats d'une simulation de dimensionnement effectuée sur MATLAB/Simulink.

Modèle du module PV	1 Soltech 1STH-215-P $P_{\max} = 213.15 W_c$
Nombre des modules	6
Nombre du module en série	3
Nombre des branches en parallèles	2

TABLE 2.2 – Dimensionnement du générateur photovoltaïque (GPV).

Remarque

Il faut que le nombre de panneaux dans chaque branche (string) soit le même, sinon, si jamais une branche contiendrait plus de panneaux d'une autre, l'une de ces branches fonctionnera comme génératrice et l'autre comme réceptrice. En pratique, cette situation est évitée par le montage de diodes anti-retour dans chaque branche.

2.3 Dimensionnement des batteries

Le contrôle des batteries, leur qualité et l'entretien sont autant de paramètres qui influencent sur leur durée de vie et font d'eux des éléments les plus fragiles dans une installation photovoltaïque [1].

La capacité totale des batteries C_{ap} est donnée par :

$$C_{ap} = N_{bp} = \frac{E_c \times Aut}{D \times U} \quad (2.6)$$

où E_c est l'énergie consommée, Aut l'autonomie du système qui varie généralement entre 3 et 15 jours (pour notre cas nous choisissons 3 jours), D la profondeur de décharge (fixée à 0.5) et U la différence de potentiel aux bornes des batteries.

Le nombre total N_{bp} de batteries est obtenu par le rapport suivant :

$$N_{bp} = \frac{C_{ap}}{C_{bat}} \quad (2.7)$$

où C_{bat} est la capacité d'une batterie.

Application numérique

La batterie utilisée est de capacité $C_{ap} = 393.375 Ah$. Le tableau (2.3) illustre un calcul de dimensionnement de nombre de batteries pour cet exemple.

Tension de la batterie	48 V
Capacité à stocker	110 Ah
Nombre de batteries	4

TABLE 2.3 – Dimensionnement des batteries.

2.4 Dimensionnement de la pile à combustible

Le dimensionnement d'une pile à combustible (PAC) prend en considération le fait qu'elle est une source d'urgence pour notre système hybride. Elle fonctionne dans le cas où les systèmes photovoltaïques et de stockage sont insuffisants pour les besoins du site. Nous avons choisi une pile à combustible de type PEM (PEMFC proton exchange membrane fuel cell), pour son avantage de fonctionnement simple sous une basse température et aussi pour son démarrage rapide [2].

Nous avons utilisé un modèle de simulation sur MATLAB SIMULINK : Une pile de type PEMFC de puissance nominale de 1.26 kW fonctionnant sous une tension 24 V avec les caractéristiques ($I - V$) illustrées sur la figure (2.1).

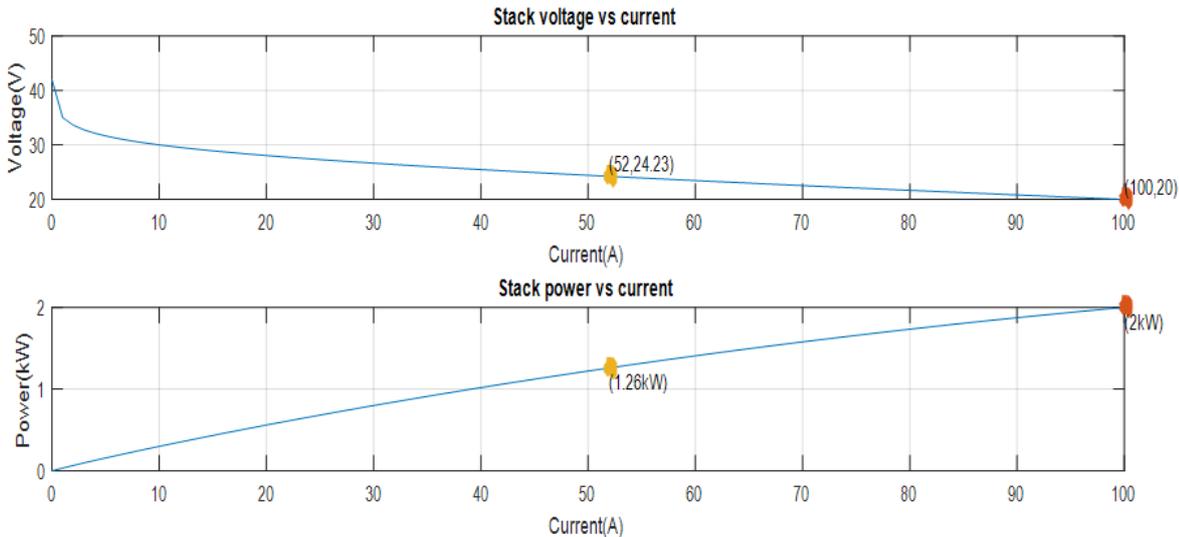


FIGURE 2.1 – Caractéristiques $I - V$ de la pile à combustible de type PEMFC 1.26 kW , 24 V sous Matlab /Simulink.

3 Convertisseurs

3.1 Hacheur

La tension de sortie d'un système photovoltaïque multi-source, de batteries ou même d'une pile à combustible est de nature fluctuante autour de la valeur de besoin. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur DC-DC (voir figure (2.2)) qui transforme une tension continue à une tension continue réglable. Un convertisseur DC-DC, placé entre le générateur et le récepteur, a aussi pour rôle de contrôler et stabiliser la tension d'alimentation de la charge avec un rendement élevé. En effet, contrairement aux alimentations classiques (linéaires) utilisant un transistor ballast qui dissipe une puissance $((V_e - V_s)I_s)$, les alimentations à découplage travaillent avec un commutateur qui fonctionne en mode tout ou rien [3].

Nous nous intéressons à deux types d'hacheurs : le hacheur série et le hacheur parallèle [4].

3.2 Hacheur parallèle (Boost converter)

Dans un convertisseur Boost, la tension moyenne de sortie est supérieure à celle d'entrée (c'est un survolteur). La structure demande un commutateur commandé à l'amorçage et au



FIGURE 2.2 – Symbole d'un Hacheur [3]

blocage (fermeture et ouverture) (T). Pour cela, nous utilisons un transistor MOSFET /IGBT et une diode d'amorçage et de blocage spontanés. La figure (2.3) illustre le circuit électrique correspondant.

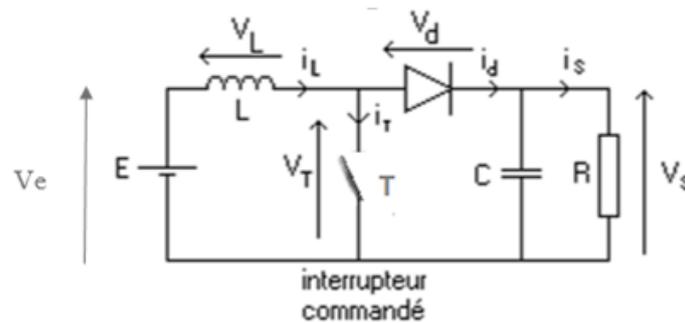


FIGURE 2.3 – Schéma principal d'un hacheur Boost

Fonctionnement

- Pour $0 \leq t \leq \alpha T$: Le transistor est fermé donc passant et la diode est alors bloquée.
- Pour $\alpha T \leq t \leq T$: Le transistor est ouvert donc bloqué et la diode est passante.

Relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_e(t) dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T [V_e(t) - V_s(t)] dt = 0 \quad (2.8)$$

d'où

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (2.9)$$

avec $\alpha < 1$.

Ondulation de courant

On a

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.10)$$

d'où

$$\Delta V_L = L \Delta I_L \quad (2.11)$$

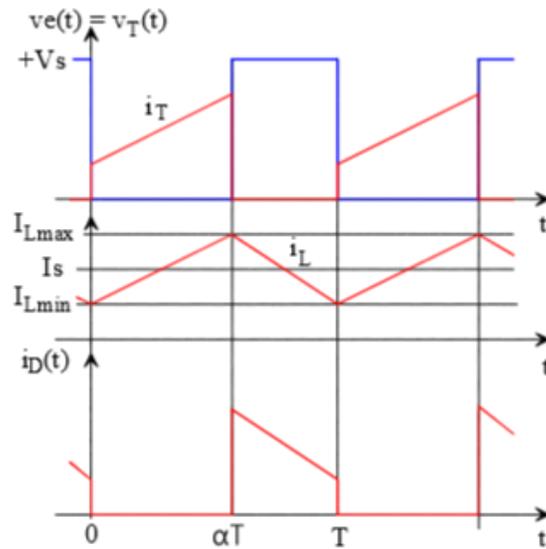


FIGURE 2.4 – Formes d'ondes du hacheur Boost [4]

Ondulation de tension

On sait que

$$V_e I_e = V_s I_e \quad (2.12)$$

et

$$I_s = I_e(1 - \alpha) \quad (2.13)$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s \alpha T}{C} \quad (2.14)$$

ou encore

$$\Delta V_s = \frac{I_e(1 - \alpha)\alpha T}{C} \quad (2.15)$$

La figure (2.4) montre les différentes formes d'ondes du hacheur Boost.

Calcul de l'inductance

À partir des équations précédentes, on calcule l'inductance pour une ondulation de courant :

$$L = \frac{V_e \alpha}{\Delta I_L f} \quad (2.16)$$

Calcul de la capacité du condensateur

À partir des équations précédentes, on calcule la valeur de la capacité pour une ondulation de tension :

$$C = \frac{I_s \alpha}{\Delta V_e f} \quad (2.17)$$

La figure (2.5) montre l'exemple d'un hacheur Boost avec une tension d'entrée $V_e = 100 V$ et une tension de sortie $V_s = 200 V$ avec $\alpha = 0.5$, $C = 100 \mu F$ et $L = 30 mH$.

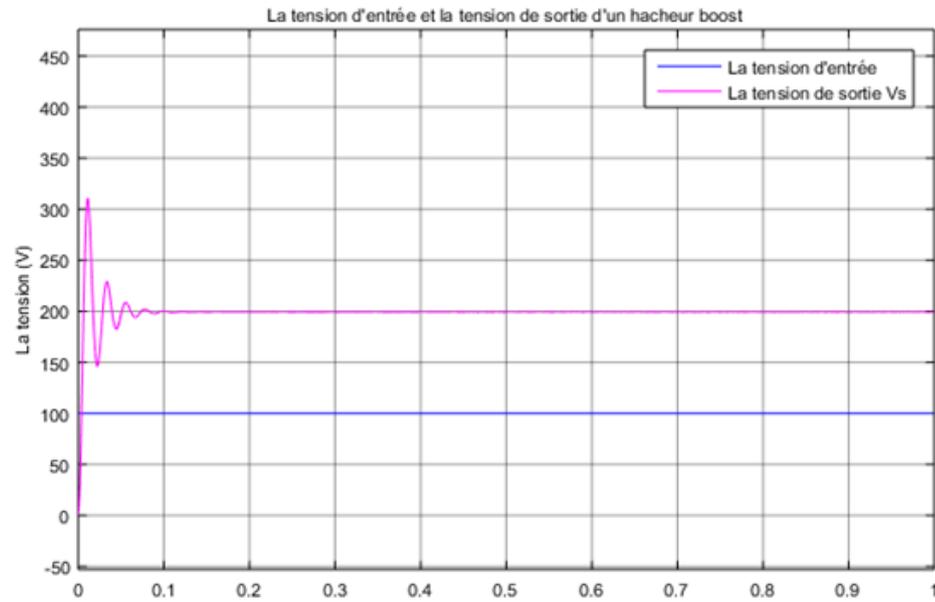


FIGURE 2.5 – Résultats d'un montage d'un hacheur Boost avec Matlab/Simulink

3.3 Hacheur série (Buck converter)

Le hacheur série est un abaisseur de tension (dévolteur) à base d'un transistor (MOSFET/IGBT) qui fonctionne comme interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture, avec un rapport cyclique α telle que $0 \leq \alpha \leq 1$.

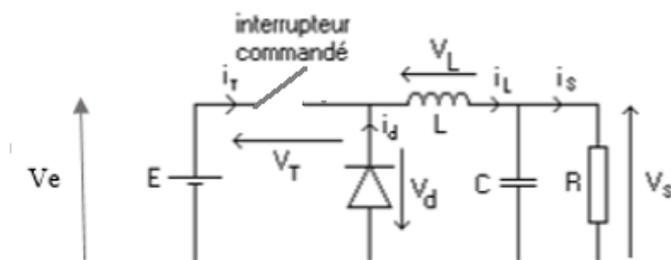


FIGURE 2.6 – Schéma principal d'un hacheur Buck [4]

Les éléments L et C dans le schéma du hacheur (voir figure (2.6)) forment un filtre pour limiter l'ondulation du courant et de la tension résultants du découplage.

Fonctionnement

- Pour $0 \leq t \leq \alpha T$: Le transistor est passant et la diode est bloquée.
- Pour $\alpha T \leq t \leq T$: Le transistor est bloqué et la diode est passante.

Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

On sait que :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt = \alpha E \quad (2.18)$$

avec

$$V_s = \alpha V_e \quad (2.19)$$

et

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}$$

Ondulation du courant

On a :

$$V_L = V_e - V_s = V_e(1 - \alpha) \quad (2.20)$$

et

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.21)$$

L'intégration suivante

$$\int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt \quad (2.22)$$

donne

$$\Delta I_L = \alpha T \frac{V_L}{L} = \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{L f} \quad (2.23)$$

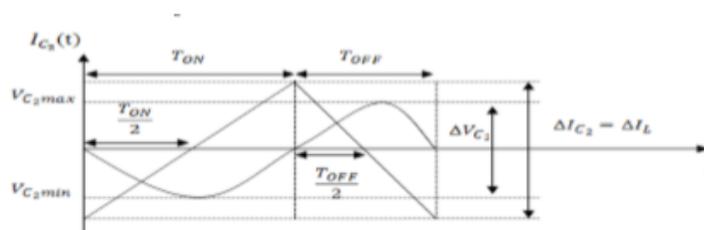


FIGURE 2.7 – Ondulation de tension aux bornes de condensateur [4]

Ondulation de la tension

L'ondulation de la tension ΔV_C est définie comme la différence entre la valeur maximale et minimale :

$$\Delta V_C = V_{Cmax} - V_{Cmin} \quad (2.24)$$

avec comme référence pour le calcul la figure (2.7).

On a

$$V_{Cmin} = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{\alpha T}{2}} \left(\frac{\Delta I_L}{T} t - \frac{\Delta I_L}{2} \right) dt \quad (2.25)$$

et

$$V_{Cmax} = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{T_{off}}{2}} \left(\frac{\Delta I_L}{T_{off}} t' - \frac{\Delta I_L}{2} \right) dt' \quad (2.26)$$

Ce qui nous donne :

$$\Delta V_C = \Delta V_s \frac{\Delta I_L}{8 C f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8 L C f^2} \quad (2.27)$$

La figure (2.8) montre les différentes formes d'ondes du hacheur Buck.

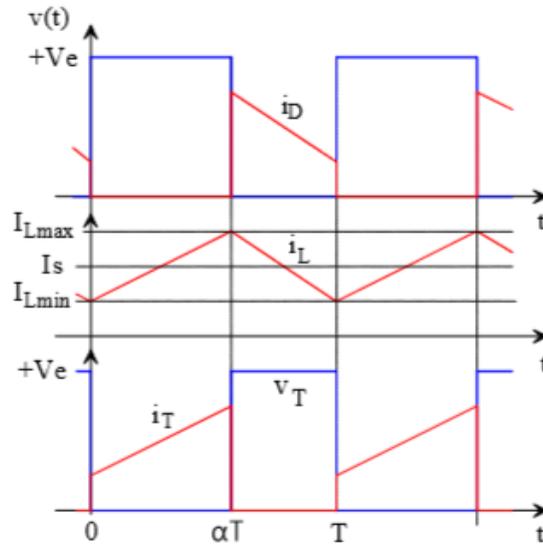


FIGURE 2.8 – Formes d'ondes d'un hacheur Buck [4]

Calcul de l'inductance

Selon l'équation précédente et pour une ondulation de courant donnée, l'expression de l'inductance est donnée par :

$$L = \alpha(1-\alpha) \frac{V_e}{f \Delta I_L} \quad (2.28)$$

La valeur de l'inductance L est définie telle que le changement de courant dans l'inductance ne dépasse pas 10% [4].

Calcul de la capacité du condensateur

De l'équation précédente on peut calculer la capacité de condensateur pour une ondulation de tension donnée, telle que :

$$C = \frac{\Delta I_L}{8f\Delta V_s} \quad (2.29)$$

La figure (2.9) montre l'exemple d'un hacheur Boost avec une tension d'entrée $V_e = 100 V$ et une tension de sortie $V_s = 50 V$ avec $\alpha = 0.5$, $C = 0.5 \mu F$ et $L = 10 mH$.

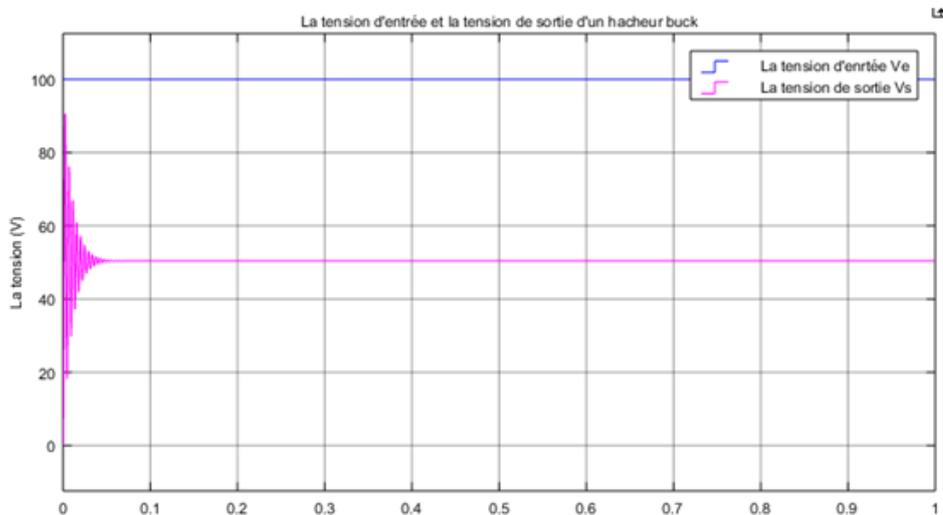


FIGURE 2.9 – Résultats d'un montage d'un hacheur Buck à l'aide Matlab/Simulink

La tension de sortie se stabilise à une valeur égale à $50 V$ après une oscillation dans le régime transitoire.

3.4 Hacheur bidirectionnel

Ce type de hacheur appelé aussi hacheur à stockage inductif peut fonctionner en type Buck comme il peut fonctionner en type Boost. Il résulte de l'association des deux structures précédentes. En effet, ce hacheur fonctionne en Boost dans le sens direct et en Buck dans le sens opposé, avec un rapport cyclique fixe pour chaque type de fonctionnement [4].

4 Commande MPPT

L'objectif principal pour réaliser un système énergétique est de maximiser la puissance des ressources et de minimiser les pertes à même d'assurer l'autonomie énergétique [5]. La commande de poursuite du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Traking) est une commande d'optimisation qui sert à suivre continuellement le point de la puissance maximum que peut produire le système en question, et assurer, ainsi, à tout instant la meilleure adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge pour des conditions climatiques imprévisibles [6]. Cet algorithme est implémenté au niveau du convertisseur assurant l'interface de puissance (étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge électrique) (voir figure (2.10)).

Parmi les algorithmes de la commande MPPT qui existent, on peut citer entre autres l'algorithme appelée "perturbation et observation" ($P\&O$), l'incrémentation de la conductance,

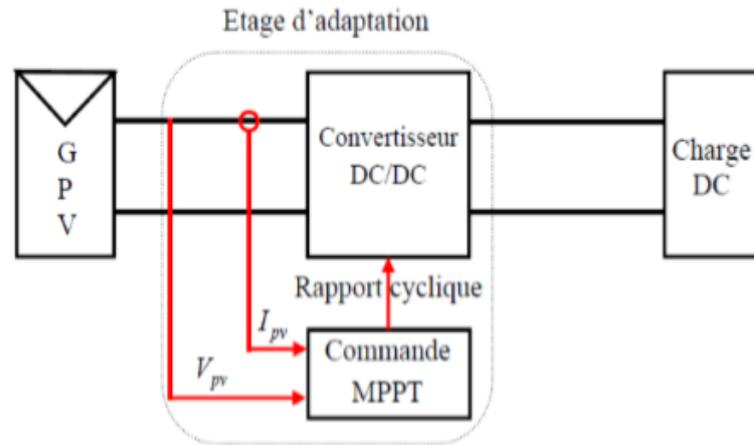


FIGURE 2.10 – Implémentation de la commande MPPT dans un système énergétique (GPV+charge)

l'algorithme MPPT par contre-réaction de tension ou encore par contre-réaction de courant et enfin la méthode de la capacité parasite.

Dans notre étude nous utiliserons la méthode dite de perturbation et observation (*P&O*) à cause de sa simplicité. Cette méthode exige des mesures à l'aide de capteurs de la tension et du courant de sortie du générateur photovoltaïque. La poursuite du point de puissance maximum démarre par la génération d'une tension V_{ref} qui perturbe la tension du générateur photovoltaïque, tout en observant l'impact de cette variation de la tension sur la réaction de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. La figure (2.11) illustre le fonctionnement de la commande MPPT dans le cadre de la méthode de perturbation et observation.

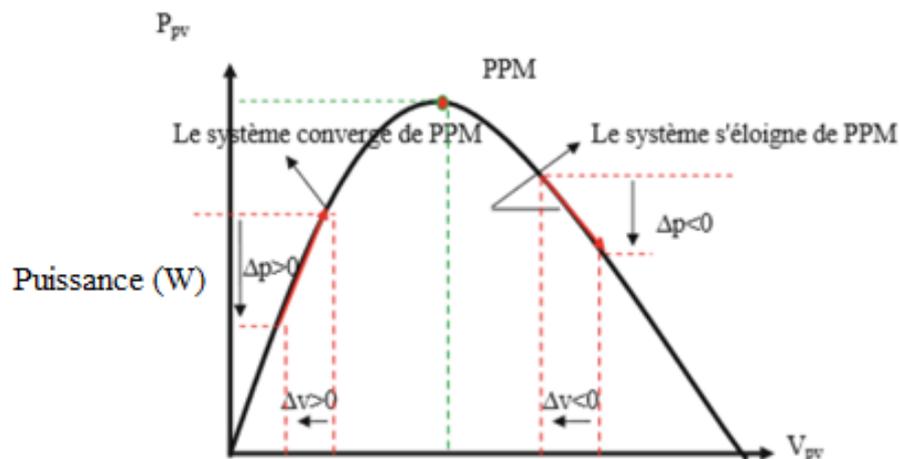


FIGURE 2.11 – Convergence vers le point de puissance maximale (PPM) avec la méthode *P&O* [6]

En effet, si la perturbation de la tension ($\Delta V > 0$) fait augmenter la puissance ; le système serait alors convergent vers le point de puissance maximum (on est à gauche de celui-ci). Par contre, si la perturbation de la tension ($\Delta V > 0$) fait diminuer la puissance ; le système serait en train de s'éloigner du point de puissance maximum (on est à droite de celui-ci) (voir figure (2.11)). L'organigramme de l'algorithme est donné sur la figure (2.12). Dans l'organigramme,

C_p représente la largeur du pas de perturbation (tension), dont la valeur doit être prise petite afin de minimiser les pertes en puissance, ce qui, en revanche, ralentit la réponse du système [7].

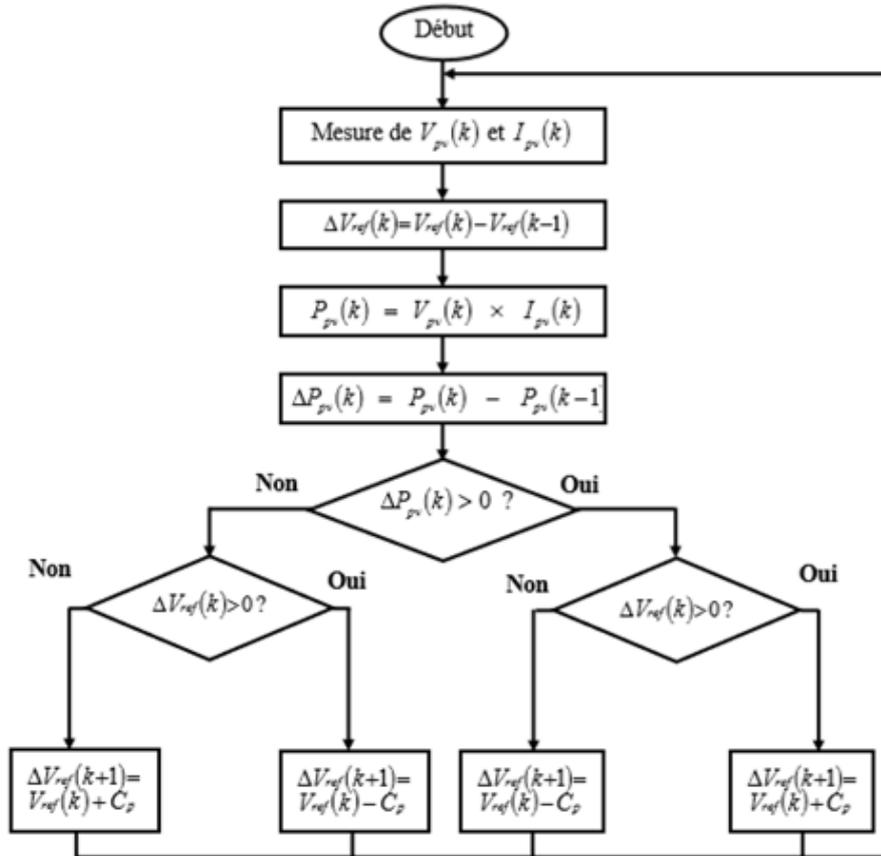


FIGURE 2.12 – Organigramme de l'algorithme $P&O$ [7]

La figure (2.13) explique la différence entre les formes d'onde de puissance, la tension du panneau et le rapport cyclique avec et sans la commande MPPT (méthode $P&O$) intégrée dans un hacheur parallèle pour les conditions standards de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque (température de fonctionnement $25^{\circ}C$ et un éclairage de $1000 W/m^2$).

5 Structure asservie d'un hacheur parallèle en utilisant le régulateur PI

Le comportement d'un système de commande sera analysé en étudiant sa dynamique et sa stabilité à partir de sa fonction de transfert. La commande idéale serait une commande telle que la grandeur commandée est à chaque instant égale à la grandeur de référence quelles que soient les perturbations.

Notre convertisseur en boucle ouverte peut présenter une précision insuffisante et une grande sensibilité aux perturbations, d'où la nécessité d'un régulateur PI (proportionnel et intégral) qui permet d'obtenir une réponse plus rapide et plus précise (l'action proportionnelle pour la rapidité et action intégrale pour la précision).

Généralement, il existe deux méthodes de régulation des convertisseurs à découplage : La première concerne la régulation en tension (VMC : voltage mode control) qui consiste à un

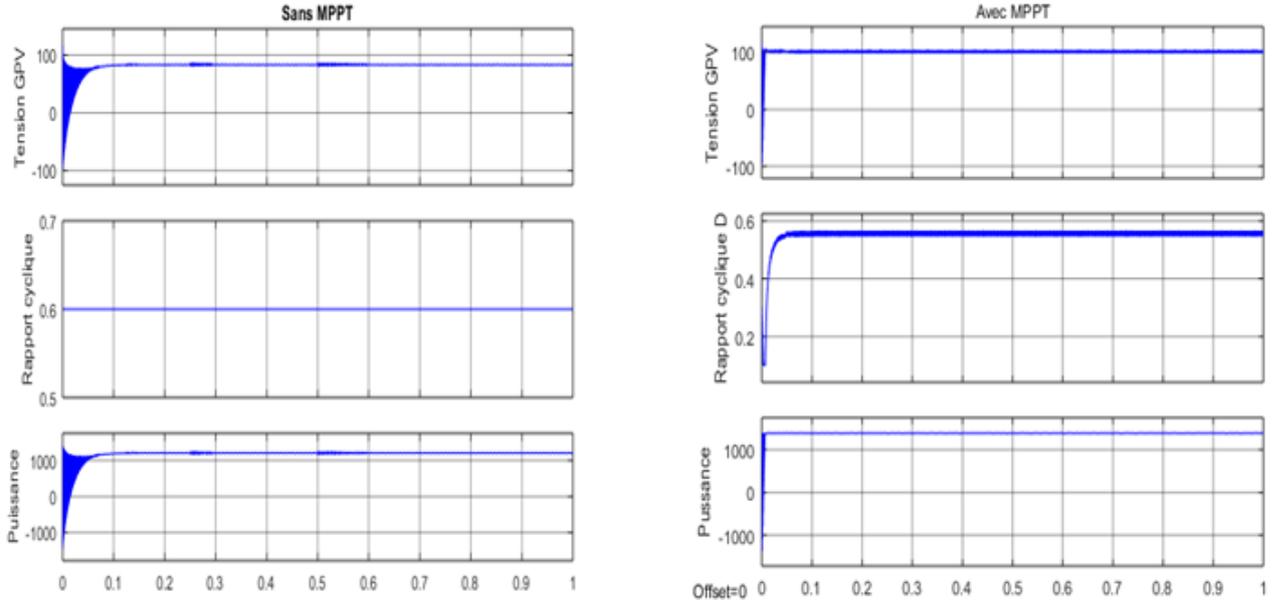


FIGURE 2.13 – Les formes d’onde de la puissance, rapport cyclique et tension d’un panneau photovoltaïque avec et sans MPPT et ce pour un éclairement de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$ obtenues par Matlab/Simulink

contrôle direct du rapport cyclique et contient une seule boucle ; et la deuxième concerne la régulation en courant (CMC : current mode control). Cette dernière méthode de contrôle multi-boucle contient deux boucles en cascade, une boucle de courant interne et une boucle de tension externe, dont la fonction de transfert est donnée par l’expression suivante :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{1 + K_p p}{T_i p} \quad (2.30)$$

où $U(p)$ est la sortie de correcteur. On cherche les paramètres (K_p, T_i) de régulateur PI.

La fonction de transfert du hacheur Boost est une fonction du second ordre donnée par [3] :

$$H(p) = \frac{V_s}{1 - \alpha} \frac{1 - \frac{L}{R(1 - \alpha)^2} p}{1 + \frac{L}{R(1 - \alpha)^2} p + \frac{LC}{(1 - \alpha)^2} p^2} \quad (2.31)$$

La structure de la commande en boucle fermée est illustrée sur la figure (2.14).

La fonction de transfert du deuxième ordre est semblable à celle du modèle du second ordre standard suivant :

$$H(p) = \frac{K\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (2.32)$$

d’où $\omega_0 = \frac{1 - \alpha}{\sqrt{LC}} = 233.33 \text{ rad/s}^{-1}$ est la pulsation propre et $\xi = \frac{\sqrt{LC}}{2RC(1 - \alpha)}$ le coefficient d’amortissement avec $0.7 < \xi < 1$. Dans notre cas le coefficient d’amortissement est pris égal à $\xi = 0.714 \text{ s}^{-1}$. L’équation du système régulé en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF = \frac{C(p)H(p)}{1 + C(p)H(p)} \quad (2.33)$$

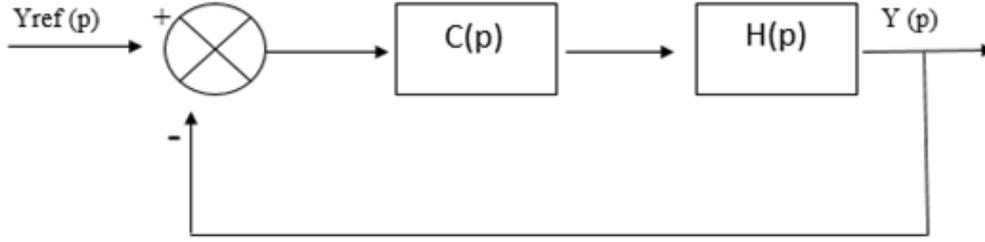


FIGURE 2.14 – Les formes d'onde de la puissance, rapport cyclique et tension d'un panneau photovoltaïque avec et sans MPPPT et ce pour un éclairement de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$ obtenues par Matlab/Simulink

ou encore

$$FTBF = \frac{\frac{K}{K_i} \omega_0^2 (1 + K_p p)}{p^3 + 2\xi \omega_0 p^2 + \left(\omega_0^2 + \frac{K \omega_0^2}{K_i} K_p \right) p + \frac{K}{K_i} \omega_0^2} \quad (2.34)$$

Le dénominateur étant d'ordre 3, il est possible de l'écrire sous la forme suivante :

$$p^3 + 2\xi \omega_0 p^2 + \left(\omega_0^2 + \frac{K \omega_0^2}{K_i} K_p \right) p + \frac{K}{K_i} \omega_0^2 = (p^2 + 2\xi_1 \omega_1 p + \omega_1^2) (p - p_0) \quad (2.35)$$

On suppose que p_0 est un pôle réel (le plus négatif possible) pour que les deux autres pôles seront les pôles dominants. Par identification on trouve :

$$p_0 + 2\xi_1 \omega_1 = 2\xi \omega_0, \quad (2.36)$$

$$p_0 \omega_1^2 = \frac{K}{K_i} \omega_0^2 \quad (2.37)$$

et

$$2p_0 \xi_1 \omega_1 + \omega_1^2 = \omega_0^2 + \frac{K \omega_0^2}{K_i} K_p \quad (2.38)$$

A l'aide de l'abaque du temps de réponse réduit $\tau_r \omega_1$ en fonction de l'amortissement ξ (voir figure (2.15)) et en fixant $\xi_1 = 0.7$, on trouve :

$$\tau_r \omega_0 = 3 \quad (2.39)$$

Pour un temps de réponse $\tau_r = 6.2 ms$, on trouve $\omega_1 = 483 rad/s$. Ces valeurs nous permettent de déduire les paramètres suivants :

$$K_i = \frac{K}{p_0 \omega_1^2} \omega_0^2 = 0.109 \quad (2.40)$$

et

$$K_p = (2p_0 \xi_1 \omega_1 + \omega_1^2 - \omega_0^2) \frac{K_i}{K \omega_0^2} = 0.025 \quad (2.41)$$

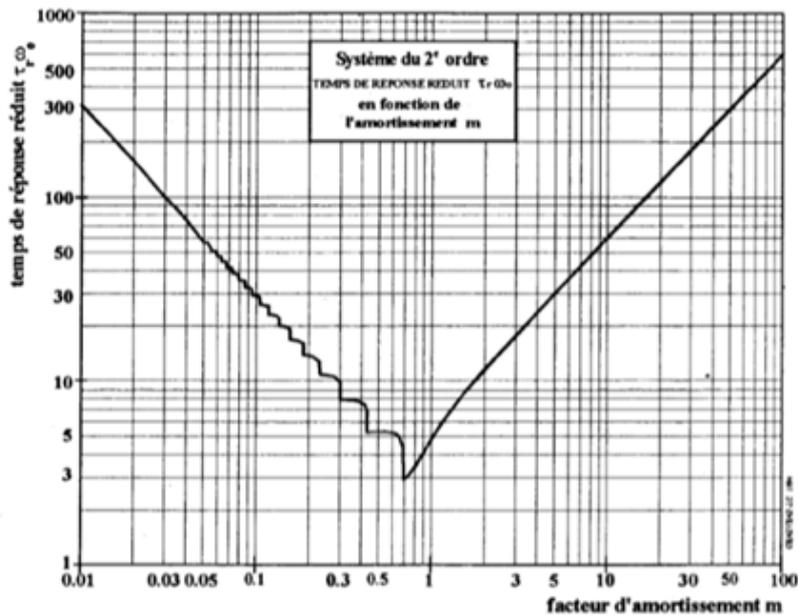


FIGURE 2.15 – Abaque du temps de réponse réduit [8]

6 Onduleur

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance, appelé aussi convertisseur statique continu-alternatif, permettant de générer une tension alternative réglable à partir d'une source d'énergie électrique continue (voir figure (2.16)). L'onduleur autonome est utilisé dans un site isolé, et dont la fonction principale est de convertir une tension continue en tension alternative sinusoïdale semblable à celle du réseau électrique.



FIGURE 2.16 – Symbole de l'onduleur [8]

6.1 Fonctionnement

La création d'une sinusoïde à partir d'une tension continue s'obtient grâce à des impulsions de tension de largeur bien déterminée. Cette technique fait appel à la modulation de largeur d'impulsion (MLI) (en anglais : PWM (Pulse width Modulation)) (voir figure(2.17)) où l'onde de sortie est superposée à un train d'impulsion de largeur et d'espacement variables.

Le résultat de la comparaison entre les deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs (transistors bipolaires) utilisés. Les diodes antiparallèles sont utilisées en série avec le transistor pour éviter la conduction inverse (voir figure(2.18)). La relation de la valeur efficace est la suivante :

$$V_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T V dt \quad (2.42)$$

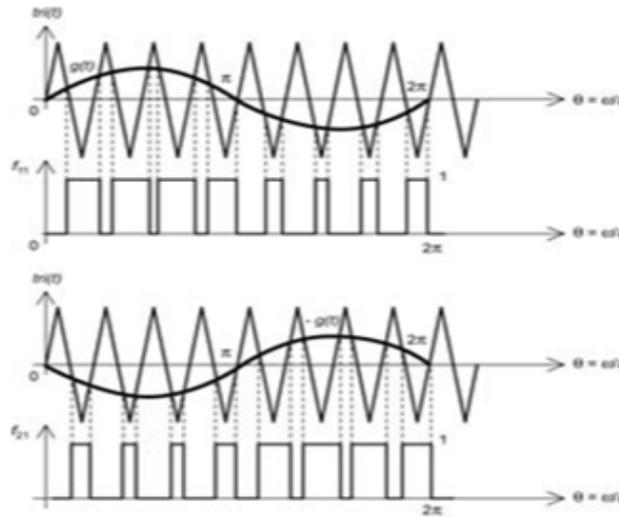


FIGURE 2.17 – Exemple d’une commande MLI (à interaction sinus triangulaire) d’un onduleur monophasé de tension en pont complet [8]

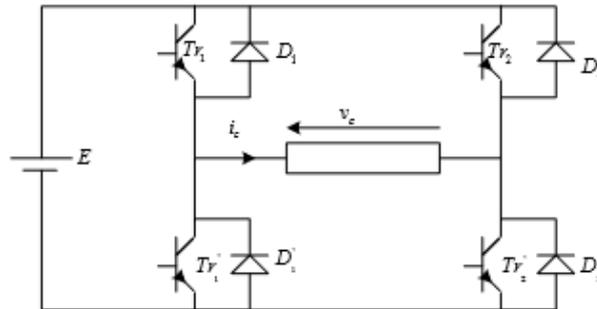


FIGURE 2.18 – Onduleur de tension en pont [8]

La qualité de la sinusoïde de sortie est importante car elle influe directement sur les alimentations des récepteurs. Cette onde de sortie est définie par le taux d’harmonique (THD) qui exprime la qualité de cette onde. La relation de THD en calculant le spectre de signal généré [8] est donnée par :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{neff}^2}}{V_{1eff}} \quad (2.43)$$

Le filtrage est très important pour obtenir un signal sinusoïdal. Dans le cas d’un circuit RLC, la résonance apparaît pour une fréquence propre $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. La puissance nominale d’un onduleur en général est exprimée en Volt.Ampère (VA) (puissance apparente) ou en Watt (W) et la valeur optimale du THD est d’ordre 5%.

7 Gestion d’énergie

Le système hybride qu’on a choisi se compose de trois sous-systèmes :

- Un générateur photovoltaïque

- Une pile à combustible
- Un système de stockage (batteries)

Le générateur photovoltaïque est la source principale de notre système de nature intermittente, laquelle est combinée à un parc de batteries pour assurer la tension du bus continu et à une pile à combustible (PAC) comme une source d'urgence.

On note aussi que ces sources d'énergie sont connectées à un bus commun continu simple DC via les convertisseurs DC-DC . Puisque la charge est alternative, nous utilisons un convertisseur DC-AC direct pour l'alimenter (voir figure (2.19)).

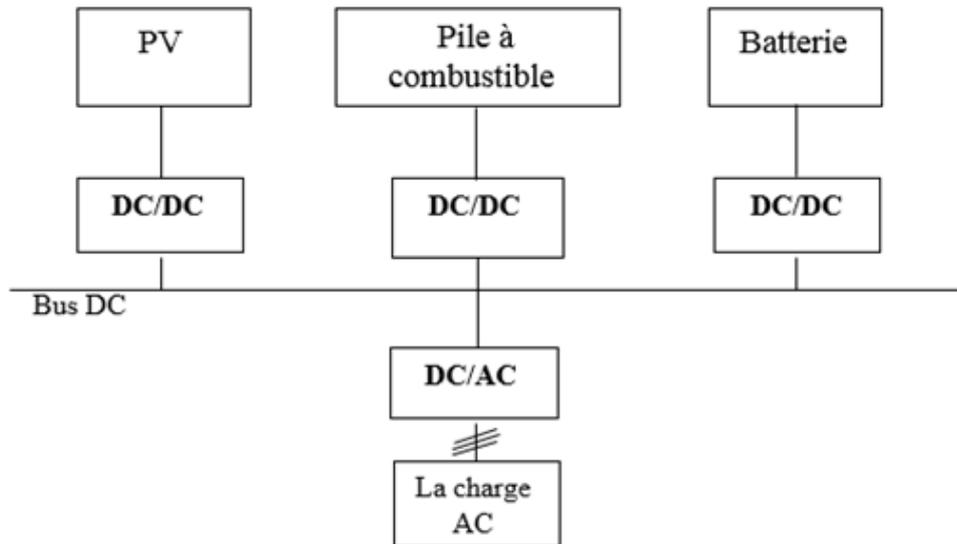


FIGURE 2.19 – Système de puissance avec un bus continu [6]

Le but de ce travail est la gestion de l'énergie produite par les trois sous-systèmes pour répondre à la demande de puissance globale au niveau du bus continu tout en gardant une tension fixe en respectant l'état de charge des batteries (éviter les surcharges et les décharges profondes). Pour cela on doit définir quatre modes. L'algorithme de gestion est donné sur la figure (2.20).

7.1 Modes de fonctionnement

Mode 1

C'est le mode normal où le générateur photovoltaïque fonctionne avec la présence de l'éclairage et exploite le maximum de puissance à l'aide de la commande MPPT. La production satisfait les besoins et les batteries peuvent recevoir le surplus à l'aide de convertisseurs bidirectionnels en mode Buck tout en respectant l'état de charge des batteries.

Mode 2

Dans ce mode, le générateur photovoltaïque fonctionne toujours avec MPPT mais la puissance est insuffisante ; ce manque de puissance sera délivré par les batteries à l'aide de convertisseurs bidirectionnels en mode Boost, tout en évitant la décharge profonde.

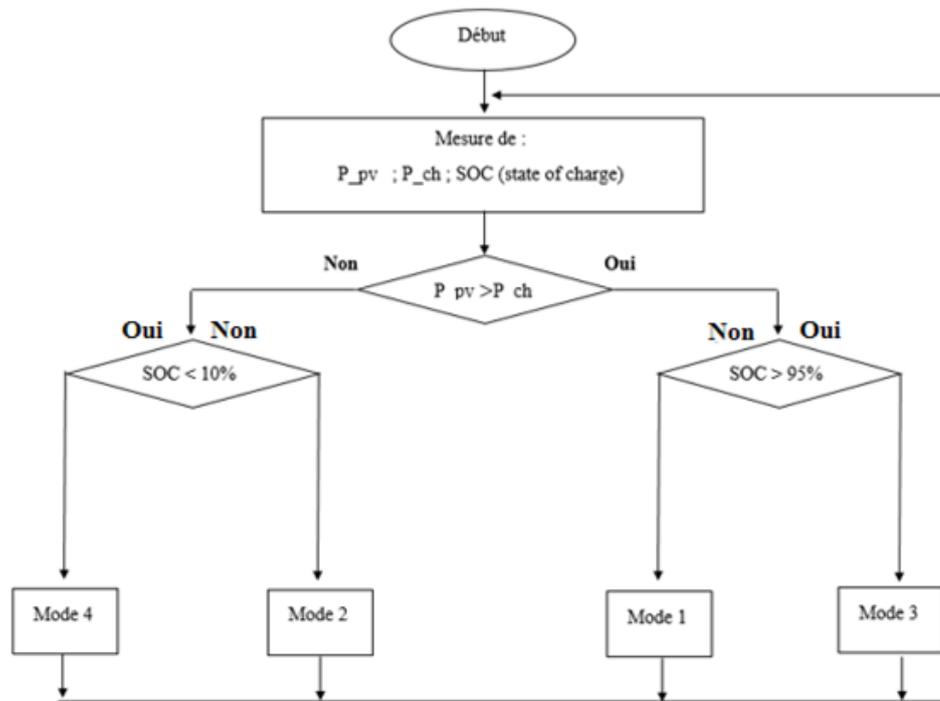


FIGURE 2.20 – Algorithme de gestion d'énergie [6]

Mode 3

Dans ce mode, appelé aussi "mode de limitation", la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est supérieure à celle demandée et en même temps les batteries sont chargées. On doit donc limiter cette puissance. Pour cela, on utilise un commutateur (switch en anglais) qui contrôle le convertisseur associé au générateur photovoltaïque pour trancher entre une utilisation de la commande MPPT et un fonctionnement normal sans maximiser la puissance (mode limitation).

Mode 4

Ce dernier mode est utilisé pour les cas urgents pour lesquels la puissance maximale du générateur photovoltaïque est complètement inférieure à celle demandée, avec un parc de batterie déconnecté. Puisque les batteries sont complètement déchargées, la pile à combustible sera connectée au bus continu. Dans ce cas on considère la puissance du générateur photovoltaïque nulle et on utilise seulement la pile à combustible.

8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude de dimensionnement du système électrique composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible et d'un parc de batteries, et ce pour un site isolé de notre choix. Une étude théorique des convertisseurs utilisés est ensuite présentée. Aussi, la commande MPPT permettant l'optimisation de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque est exposée. Enfin, la gestion de l'énergie produite par les trois éléments de notre système ainsi que les quatre modes de fonctionnement sont passés en revue. Dans le chapitre suivant, nous présenterons et discuterons les résultats obtenus par modélisation.

Bibliographie

- [1] D. Soro, M.H.C.Yapi, N.A.Yao, "Dimensionnement d'une installation solaire pour la réalisation de travaux pratiques dans les lycées et collèges en zone isolée", École Normale Supérieure (ENS) d'Abidjan, Département des Sciences et Technologie, Côte d'Ivoire.
- [2] Aicha Saadi, "Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2014.
- [3] A. Berroubi, "Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck Boost dans un système photovoltaïque" mémoire de master
- [4] G.Séguier, F.Labrique et P. Gelarue, "Électronique de puissance, structures commandes et applications, 10e édition, DUNDO, 2015
- [5] L. Bentouati, Mémoire de master, "Étude d'un convertisseur DC/DC pour application PV", Université Amar thelidji, Laghouat, 2015
- [6] O. Benseddik, mémoire de master, "Étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", Université Kasdi Merbah OUREGLA, .2012
- [7] M. Issadi, mémoire de magistère "Commande d'une poursuite du point de puissance maximum(MPPT) par le réseau de Neurones , École nationale polytechnique, laboratoire LDCCP, Alger, 2006
- [8] M.Pinard, " Convertisseurs et électronique de puissance " commande , description ; mise en œuvre, applications avec LabVIEW. L'usine nouvelle, Dunod

Chapitre 3

Simulation et interprétation des résultats

1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats de la simulation effectuée à l'aide de logiciel libre de simulation MATLAB/SIMULINK de l'utilisation d'un convertisseur DC/DC contrôlé par la commande MPPT, la régulation de bus DC et la gestion d'énergie fournie par un système énergétique multi-source connecté à un élément de stockage. La figure (3.1) illustre le système complet simulé.

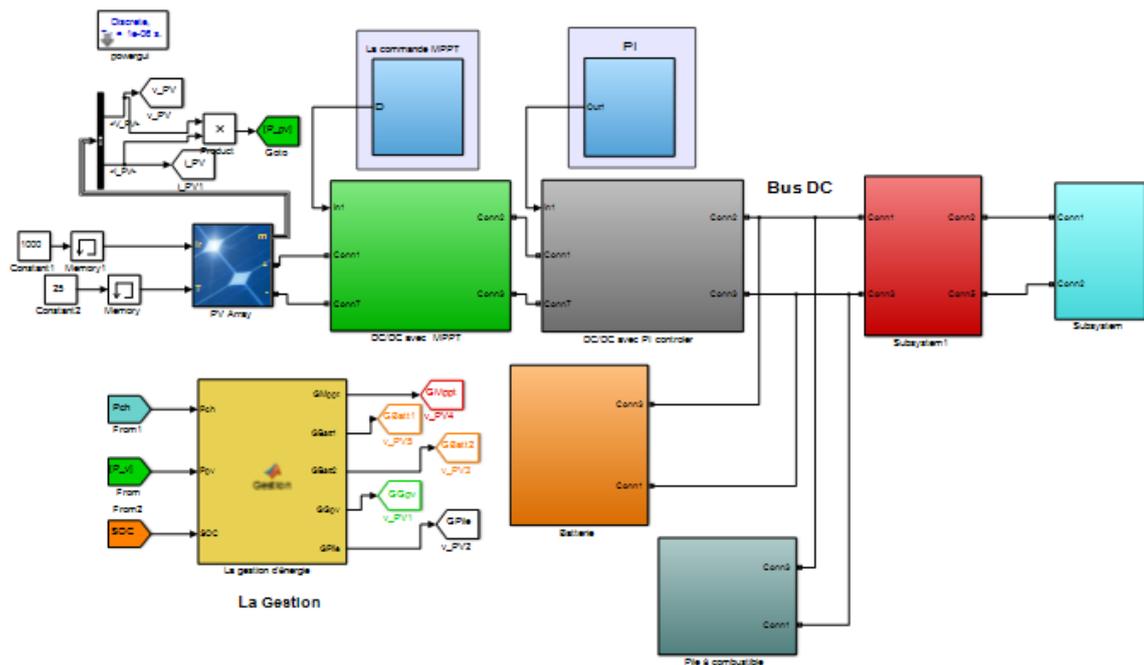


FIGURE 3.1 – Schéma bloc du système complet à l'aide de MATLAB/SUMILINK

2 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT

La figure (3.2) présente la modélisation de la connexion entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur statique (hacheur de type Boost) avec la commande MPPT en utilisant la

technique *P&O*, (l'algorithme est mentionné dans l'annexe).

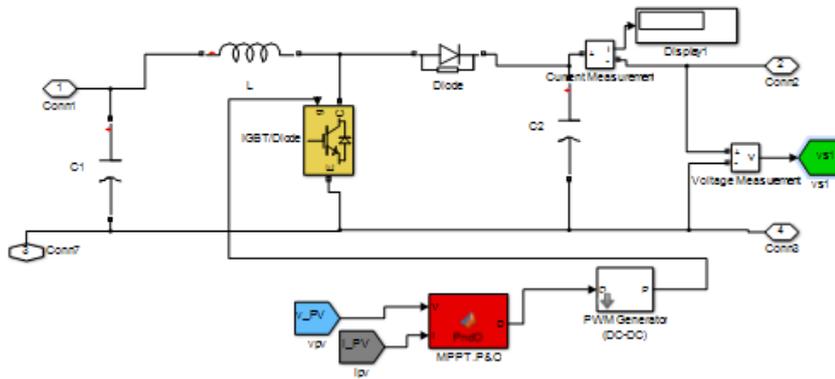


FIGURE 3.2 – Bloc de la commande MPPT simulé par MATLAB/SUMILINK

2.1 Fonctionnement sous les conditions standards

La figure (3.3) présente les différents signaux (tension, courant et puissance du générateur photovoltaïque) à l'aide de la commande MPPT dans les conditions d'ensoleillement standards (éclairage égal à $1000 W/m^2$ et une température de panneau égale à $25^\circ C$). L'intérêt majeur est focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance, la tension et le rapport cyclique D .

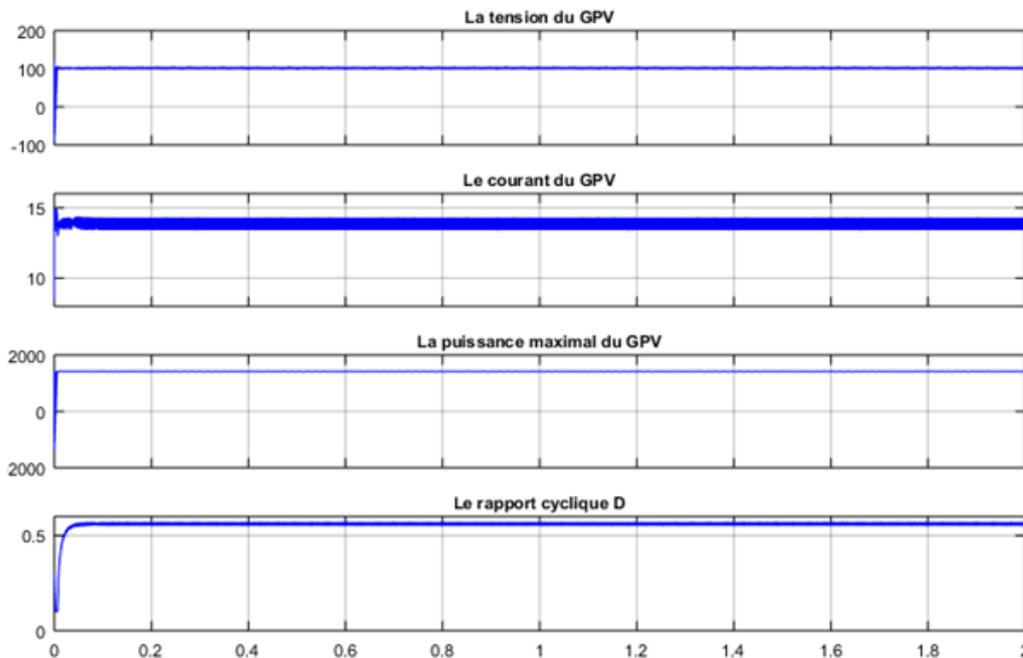


FIGURE 3.3 – Les différentes formes des signaux de tension, de courant, de puissance du générateur photovoltaïque ainsi que le rapport cyclique, pour des conditions d'ensoleillement standards.

Notre générateur photovoltaïque (GPV) de simulation regroupe six panneaux de type (1Soltech 1STH-215-P) (deux branches en parallèle chacune contient 3 panneaux en série) connecté au régulateur MPPT (méthode *P&O*). La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque

est égale à 1431 W , sous une tension égale à 103.9 V et un courant égal à 13.64 A . Les signaux de ces trois grandeurs passent par un régime transitoire très rapide (de 0 à 0.02 seconde(s)) avant de se stabiliser.

De l'instant 0 à 0.02 s, nous observons une variation du rapport cyclique d'une valeur d'ordre 0.3 (valeur initiale dans l'algorithme) avant de se stabiliser autour de la valeur de 0.56. L'algorithme bascule par un pas de 10^{-5} ; ensuite la tension et la puissance augmentent jusqu'à atteindre leurs valeurs maximum, après une perturbation claire sous l'effet de changement du rapport cyclique. Le convertisseur 'Boost' nous donne une stabilisation pour une tension de sortie égale à 234.5 V .

2.2 Comportement du système sous conditions d'ensoleillement variables

Pour bien comprendre le rôle de la commande MPPT, nous varions la température des panneaux du système ainsi que le niveau d'éclairement afin de voir l'effet de chaque variation sur la puissance délivrée par le système.

Effet de la variation de la température

L'éclairement étant fixé à une valeur de 1000 W/m^2 , nous varions la température de fonctionnement des panneaux (la même pour tous les panneaux) sur un intervalle de temps égal à 2 secondes. La figure (3.4) montre la variation de la température dans le temps.

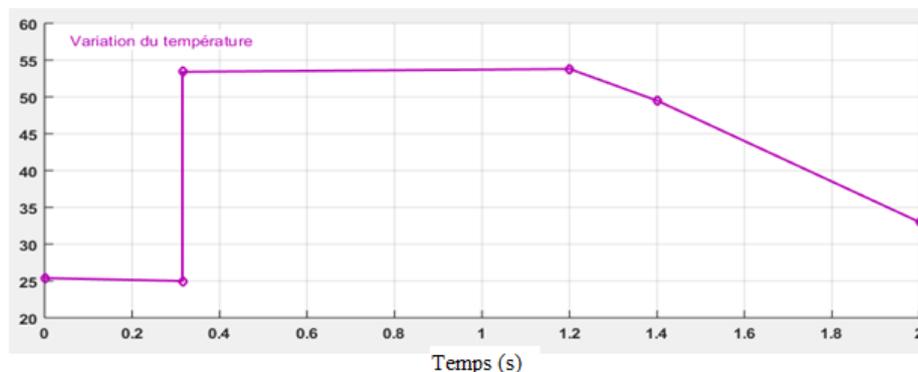


FIGURE 3.4 – Variation dans le temps de la température des panneaux.

A cause de la masse thermique importante du panneau solaire la variation de sa température est très lente. De ce fait, les changements rapides de la température sont rarement occasionnés (exemple : un véhicule alimenté par un GPV passant dans un tunnel). Dans ce cas, nous avons changé la température sur trois (03) périodes (voir figure (3.4)) :

- De 0 s à 0,31 s la température est fixée à 25°C et le fonctionnement est le même comme dans le cas de l'application des conditions standards.
- Une variation brusque de la température est effectuée (en pratique, l'augmentation rapide de la température ne se produit jamais !) pour atteindre une valeur fixe de 53.5°C sur une période entre 0,31 s et 1.2 s.
- De 1.2 s à 2.0 s, la température diminue de manière linéaire de la valeur 53.5°C à une valeur de 33°C .

L'augmentation de la température fait diminuer la tension des panneaux (voir figure (3.5.a)) ; mais sans incidence apparente sur le courant délivré (voir figure (3.5.b)) (à part une oscillation brusque au moment de la variation de la température).

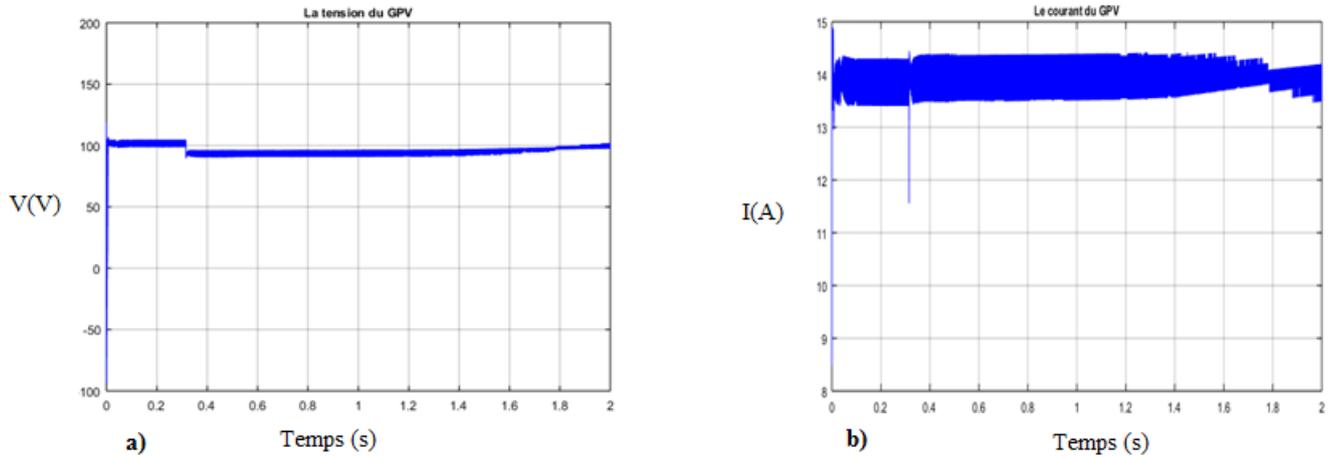


FIGURE 3.5 – Variation dans le temps de la tension a) et du courant b) pour un éclairement fixe 1000 W/m^2 et une température variable.

La figure (3.6.a)) montre la variation de la puissance sur un intervalle de temps égal à 2 secondes. Nous remarquons que le point de la puissance varie dans le temps. La figure (3.6.b)) montre la variation du rapport cyclique D en fonction du temps.

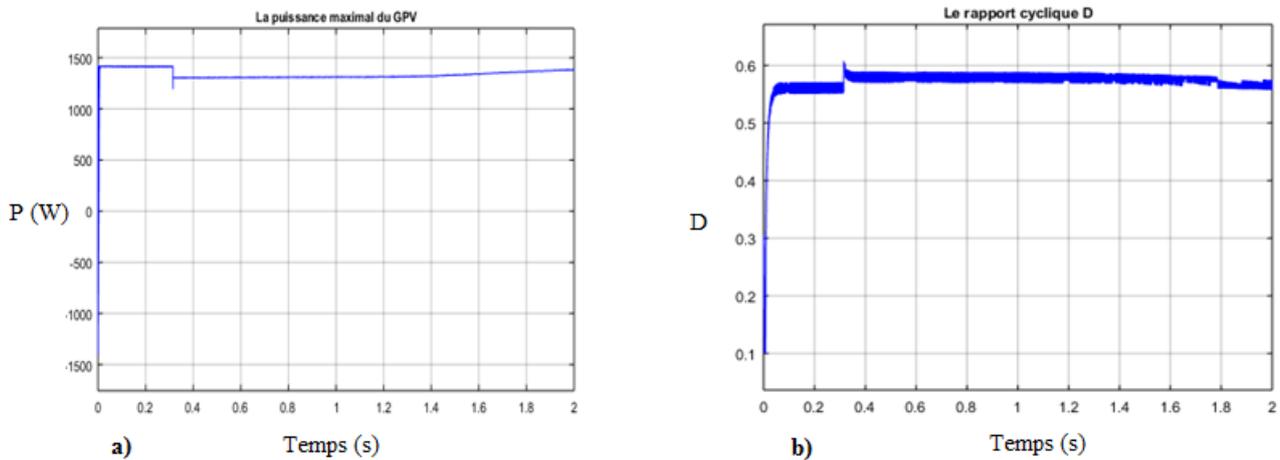


FIGURE 3.6 – Variation dans le temps de la puissance a) et du rapport cyclique b) pour un éclairement fixe 1000 W/m^2 et une température variable.

Effet de la variation de l'éclairement

Afin de comprendre l'effet de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque, nous avons effectué une variation de l'éclairement sur un intervalle de temps de deux secondes tout en fixant la température à 25°C . Cette variation de l'éclairement le long de la journée, est due, par exemple, au passage de nuages. La figure (3.7) illustre la variation de l'éclairement dans un intervalle de temps égal à 2 secondes.

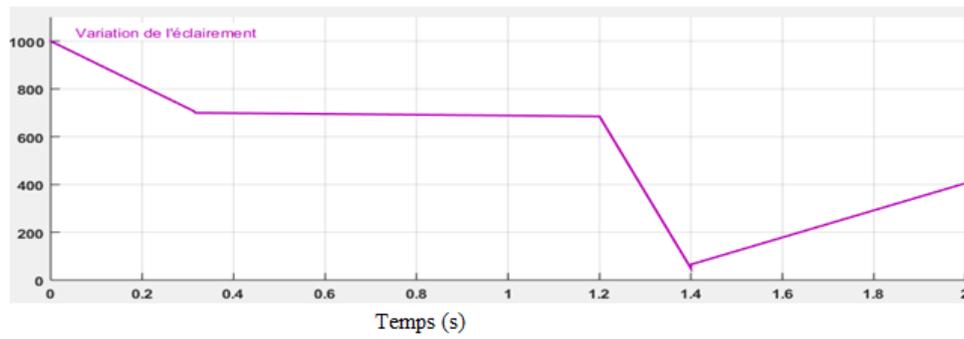
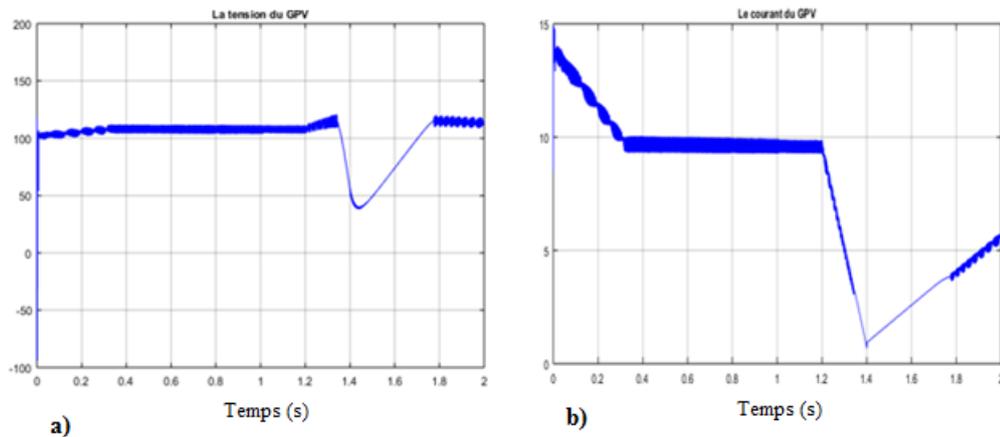


FIGURE 3.7 – Signal de la variation de l'éclairement

La variation de l'éclairement passe par quatre périodes :

- Entre 0 s et 0.31 s, l'éclairement est diminué de manière linéaire à partir de $1000 W/m^2$ jusqu'à $700 W/m^2$.
- Entre 0.31 s et 1.2 s, l'éclairement est maintenu fixe à une valeur de $700 W/m^2$.
- Entre 1.2 s et 1.4 s, l'éclairement est diminué de manière linéaire jusqu'à $50 W/m^2$.
- Entre 1.4 s et 2.0 s, l'éclairement est augmenté de manière linéaire jusqu'à $400 W/m^2$.

Nous remarquons que la variation de l'éclairement n'influe que très peu sur la tension (à l'exception de l'intervalle $[0 s, 0.35 s]$) (voir figure (3.8.a)), alors qu'elle a un effet très apparent sur le courant qui, lui, dépend fortement et directement de l'éclairement (voir figure (3.8.b)). Par


 FIGURE 3.8 – La variation de la tension a) et du courant b) en fonction de l'éclairement pour une température de $25^{\circ}C$

conséquence, le point de puissance maximum délivrée par le générateur photovoltaïque varie de la même manière que la variation de l'éclairement (voir figure (3.9a.)). La figure (3.9.b) illustre la variation du rapport cyclique dans le temps sous l'effet de la variation de l'éclairement.

2.3 Bloc batterie et pile à combustible

Le système est associé à un parc de batterie avec un hacheur bidirectionnel pour régler la charge et la décharge de la batterie et contrôler sa tension (voir figure (3.10)), et une pile à combustible avec un hacheur de type Boost pour élever la tension de la pile (voir figure (3.11)).

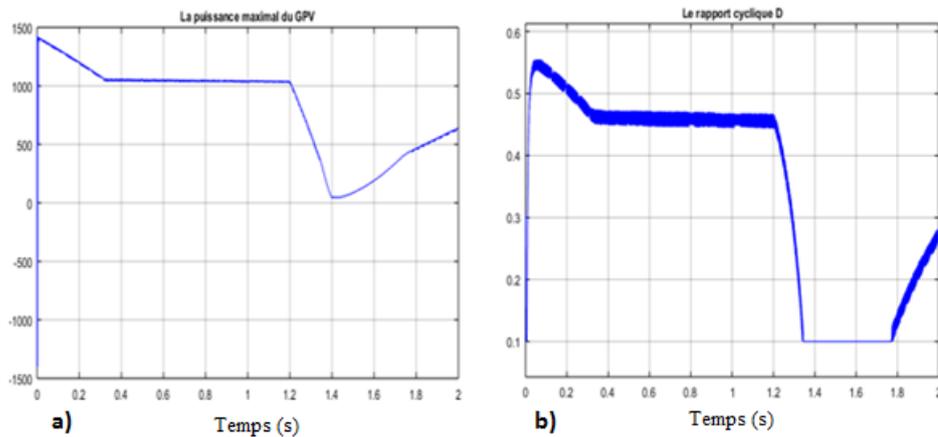


FIGURE 3.9 – La variation du point de puissance maximum a) et du rapport cyclique b) en fonction de l'éclairement pour une température de 25°C

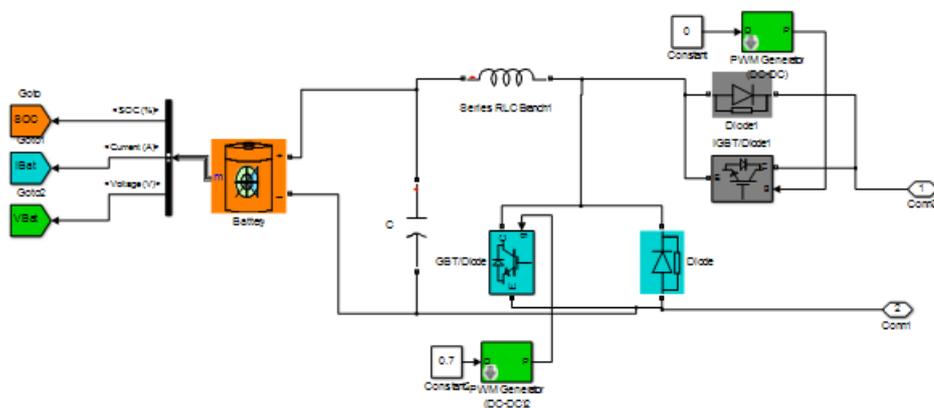


FIGURE 3.10 – Batterie avec convertisseur bidirectionnel

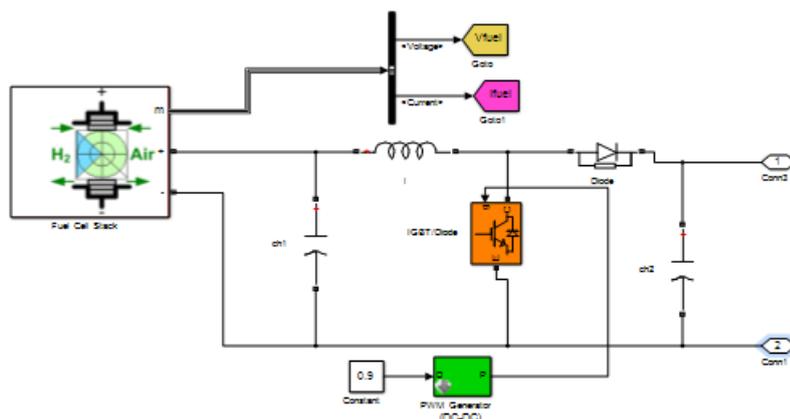


FIGURE 3.11 – Pile à combustible avec un hacheur Boost

3 Tension du bus DC

À l'aide d'un régulateur PI et afin d'obtenir une tension désirée à l'entrée de l'onduleur monophasé, nous avons effectué le réglage du bus DC (voir figure (3.12)) connecté lui aussi aux batteries et la pile à combustible.

Nous constatons sur la figure (3.13) que la tension du bus DC passe par un régime transitoire

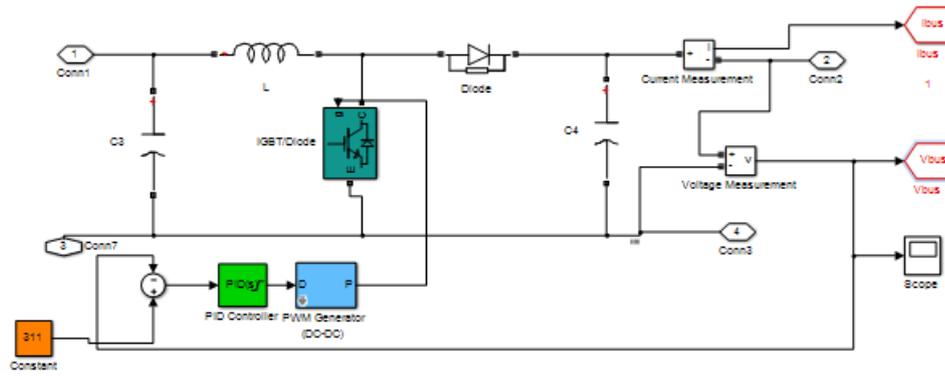


FIGURE 3.12 – Bloc de régulateur PI implanté sur un hacheur Boost

jusqu'à 0.01 s puis se stabilise à la tension désirée (environ 311 V) quelle que soit la variation de la tension d'entrée ; avec une ondulation de tension de 7%. Cette tension passe par l'onduleur pour alimenter la charge alternative (AC) du site isolé.

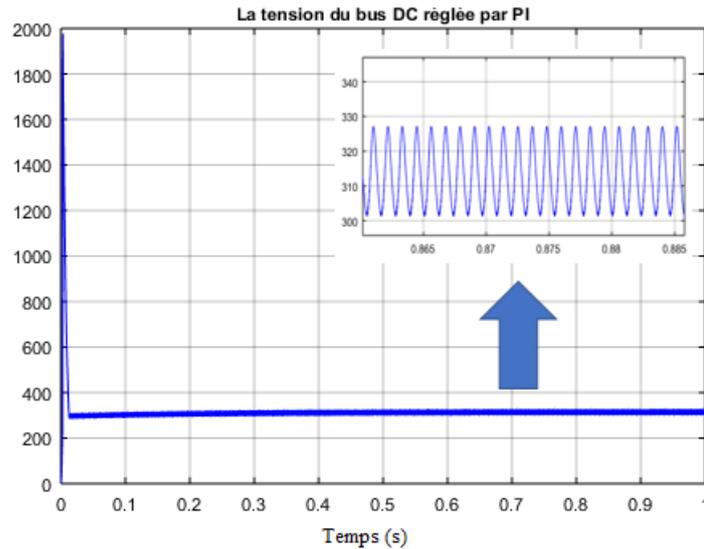


FIGURE 3.13 – Tension du bus DC

4 Conversion DC/AC en utilisant un onduleur monophasé

Dans le site isolé, l'onduleur monophasé est largement suffisant pour assurer un fonctionnement normal. La figure (3.14) présente un onduleur monophasé en pont complet avec la commande MLI sinus-triangulaire et un filtre passif (LC) passe-bas (pour éliminer les ondulations et les harmoniques) avec une fréquence égale à 50 Hz. Le signal de sortie avant filtrage est illustré sur la figure (3.15).

Après un régime transitoire entre $[0 \text{ s}, 0.051 \text{ s}]$ la tension alternative à la sortie de l'onduleur se stabilise (voir figure (3.16)). Dans ce cas, l'onduleur de tension monophasé est le plus utilisé. Rappelons que la valeur moyenne de la tension est nulle.

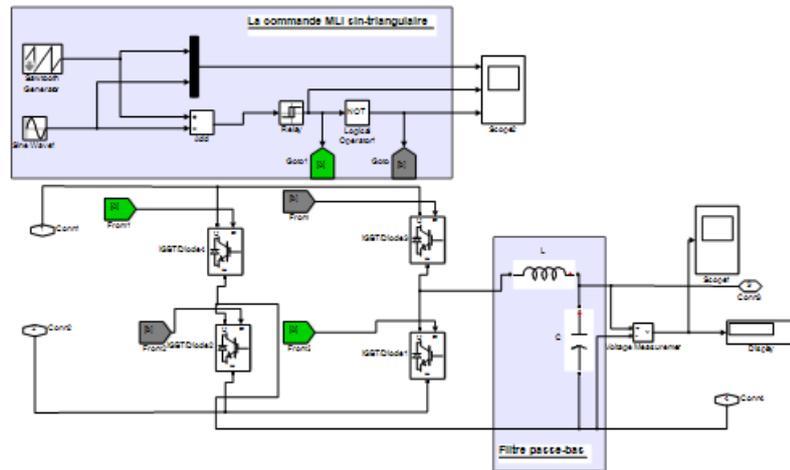


FIGURE 3.14 – Bloc d'onduleur monophasé

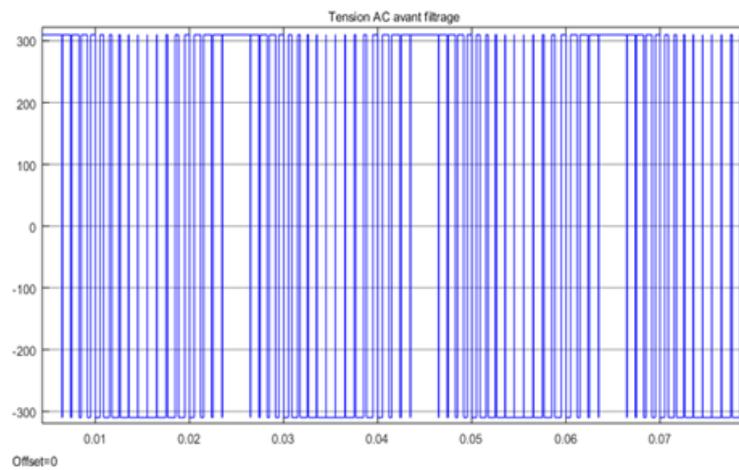


FIGURE 3.15 – Signal de la tension alternative avant filtrage

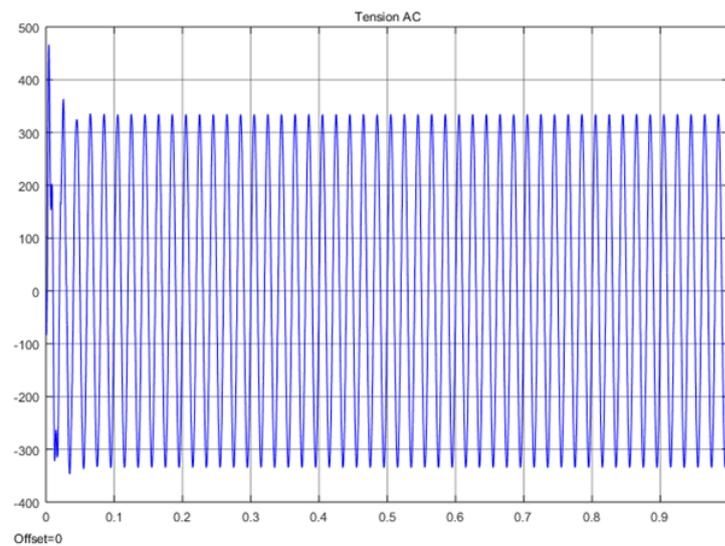


FIGURE 3.16 – Signal de la tension alternative qui alimente la charge AC avec filtre

5 Gestion d'énergie

La gestion d'énergie dans ce cas se fait à l'aide d'interrupteurs associés aux conditions de chacun des modes suivants :

5.1 Mode 1

Le premier mode, défini par une puissance du générateur photovoltaïque supérieure à la puissance de la charge, consiste à satisfaire le besoin de la charge des batteries si celles-ci sont déchargées (dans ce cas l'état de charge (en anglais ; state of charge (SOC)) est égal à 10%). Sous un éclairement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$, la puissance du générateur photovoltaïque en mode MPPT est suffisante pour couvrir les besoins de la charge (site isolé), au même temps le surplus charge les batteries déchargées. Sous un éclairement de $1000W/m^2$,

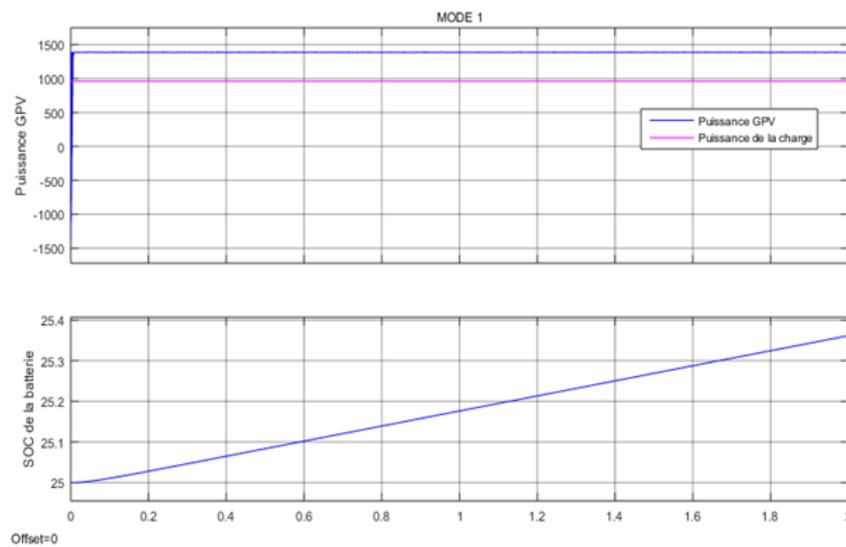


FIGURE 3.17 – Mode 1

et une température de $25^{\circ}C$ la puissance du générateur photovoltaïque en mode MPPT est suffisante pour couvrir les besoins de la charge (site isolé); en même temps le surplus sert à charger les batteries déchargées.

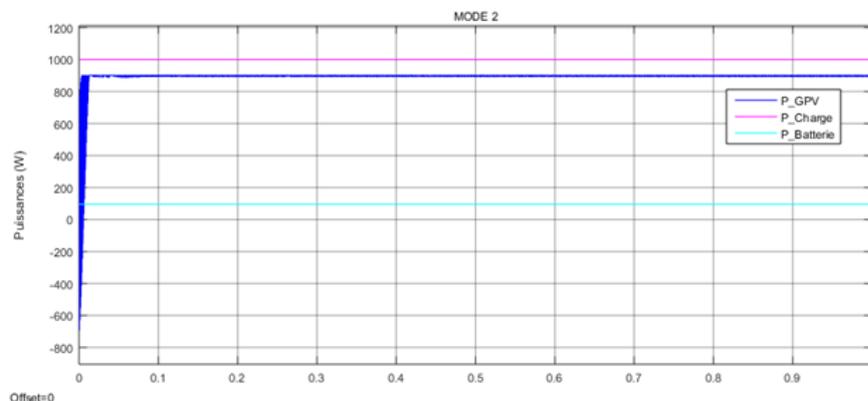


FIGURE 3.18 – Mode 2

5.2 Mode 2

Dans ce mode, la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en mode MPPT est insuffisante et $SOC > 25\%$. Nous utilisons donc les batteries pour couvrir le besoin (voir figure (3.18)).

Pour un faible éclairement de $600 W/m^2$, le générateur photovoltaïque est incapable de couvrir le besoin. Aussi, la charge des batteries est supérieure à 25%, ce qui permet à celles-ci de compenser le manque de puissance de telle sorte que $P_{GPV} + P_{Batterie} \simeq P_{ch}$, avec peu de pertes.

5.3 Mode 3

Dans le mode 3 la puissance du générateur photovoltaïque donne une puissance capable de satisfaire le besoin sans utilisation du commande MPPT, et en parallèle les batteries sont chargées (voire figure (3.19)). Les batteries du parc étant chargées, la puissance reste supérieure

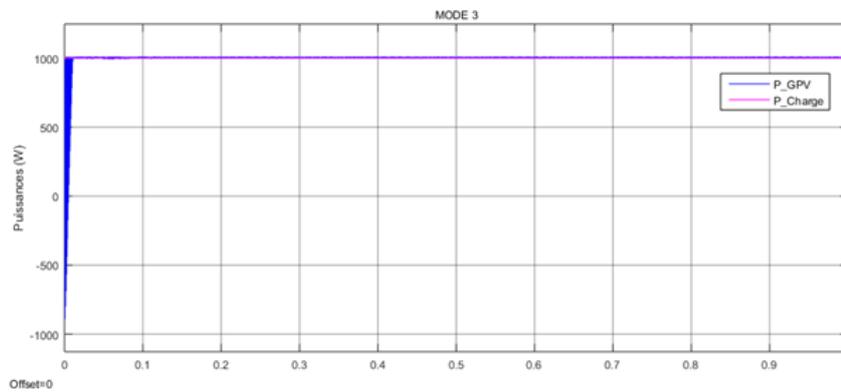


FIGURE 3.19 – Mode 3

à la demande $P_{GPV}P_{charge}$ avec élimination de la commande MPPT.

5.4 Mode 4

Ce mode est désigné pour les cas urgents où $P_{GPV} + P_{Batterie} < P_{charge}$. Dans ce cas, la pile à combustible participe à l'alimentation en énergie (voir figure(3.20)).

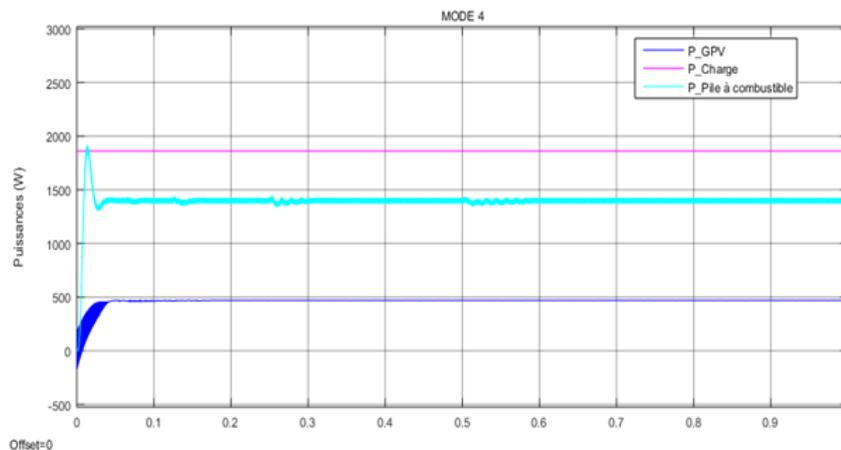


FIGURE 3.20 – Mode 4

Comme exemple, les batteries sont déchargées $SOC < 25\%$ et le générateur photovoltaïque est totalement insuffisant. Pour un éclairage égal à $300W/m^2$, la pile à combustible participe à alimenter la charge telle que $P_{GPV} + P_{Pile} \simeq P_{charge}$.

6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de la simulation d'un système électrique multi-source. Nous avons commencé par la simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT en présentant les effets de l'éclairage et de la température sur les différents signaux (tension, courant et puissance du générateur photovoltaïque). Ensuite, nous avons présenté la forme de la tension du bus DC réglé par un PI auquel est connecté les trois éléments du système (GPV, batteries et pile à combustible). En effet, le parc des batteries est connecté à un régulateur bidirectionnel qui assure la charge et la décharge des batteries et le réglage de tension. La pile à combustible est connectée à un hacheur Boost pour élever sa tension. Les deux sources sont connectées au bus DC et la tension continue est transformée en alternative à l'aide d'un onduleur monophasé. La gestion d'énergie est à même d'assurer l'alimentation ininterrompue en électricité du site.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail nous avons effectué une étude de la gestion de la production d'énergie électrique pour un site isolé d'une multi-source composée de trois sources d'énergie, à savoir, une source d'énergie photovoltaïque (principale), un système de batteries pour stockage et une pile à combustible (comme source de secours). L'objectif de notre travail était d'assurer l'autonomie en électricité du site déconnecté du réseau.

La gestion de la production passe forcément par l'optimisation de fonctionnement de chaque type de source et le bon dimensionnement du syst de batteries. Ainsi, nous avons étudié la commande (MPPT) pour le générateur photovoltaïque qui permet à ce dernier de fonctionner à une puissance maximum quelles que soient les variations des conditions météorologiques (éclairagements, température) et de la charge. Aussi, nous avons effectué une étude de fonctionnement des différents convertisseurs (DC/DC) et (DC/AC) utilisés pour alimenter la charge du site isolée en AC. Il était nécessaire d'utilisé un régulateur PI pour régler la tension du bus DC auquel sont connectées les trois sources d'énergie. Nous avons présenté les différents résultats de simulation à l'aide de logicielle MATLAB. A cet effet, nous avons trouvé que l'hybridation des ressources renouvelables (photovoltaïque et pile à combustible) avec un système de stockage est une bonne solution, parmi d'autres, pour assurer l'alimentation en électricité propre. L'inconvénient de cette hybridation réside dans le fait que le rendement des panneaux photovoltaïques reste toujours relativement faible et que les piles à combustible sont très chères. Nous souhaitons dans l'avenir qu'une étude plus approfondie soit effectuée en vue d'optimiser la production en électricité du système des trois sources, et même allonger la liste à d'autres sources renouvelables comme l'éolienne ou même la biomasse.

Annexe

L'algorithme MPPT

```
function D = PndO(V,I)
Dinit = 0.3;
Dmax = 0.99;
Dmin = 0.1;
deltaD = 1e-5;

persistent VoldPoldDold;

if isempty(Vold)
Vold=0;
Pold=0;
Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP == 0
if dP < 0
if dV < 0
D = Dold - deltaD;
else
D = Dold + deltaD;
end
else
if dV < 0
D = Dold + deltaD;
else
D = Dold - deltaD;
end
end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax || D <= Dmin
D=Dold;
end
```

```
Dold=D ;  
Vold=V ;  
Pold=P ;
```

L'algorithme de la gestion d'énergie

```
function G = Gestion(Pch,Ppv,SOC)  
GMppt = 0 ;  
GBatt1 = 0 ;  
GBatt2=0  
GGpv = 0 ;  
GPile= 0 ;  
  
    if Ppv<Pch  
if SOC < 10  
GPile=1  
else  
GBatt1=1  
end  
else  
if SOC <95  
GMppt=1  
GBatt2=1  
else  
GGpv=1  
end  
end
```