



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES ELECTRONIQUE

N° d'ordre : M/GE/2019

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : énergies renouvelables

Par

Nom et Prénom : Lankri Salah Eddine

Nom et Prénom : Kouider Azeddine

Intitulé du sujet

Amélioration de la gestion d'énergie dans un système
photovoltaïque avec stockage

Président :

Mme.Mimi Malika

Professeur

Université de Mostaganem

Examineur :

Mr.Souag Slimane

MCB

Université de Mostaganem

Rapporteur :

Mme.Bekkouche

MCB

Université de Mostaganem

Fatima

Remerciements

En premier lieu, Dieu merci pour la patience et le courage qui m'a attribué le long de ce travail.

Je tiens à remercier Mme : F.Bekkouche pour sa disponibilité et sa mise de son savoir à ma disposition pour la réalisation de ce travail.

Je remercie l'ensemble des membres de jury d'avoir acceptés de juger ce modeste travail.

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Abstract :

Photovoltaic energy is currently experiencing strong growth worldwide . Given its ecological character , it appears as an important source, it results in transforming sunlight into electrical energy.

In this paper we are interested in the study of a photovoltaic system with storage management ensuring the availability of energy continuously, a management system has been developed to optimize system end of the life of this latest. This system operates at an optimal power with the use of a DC / DC converter controlled by MPPT Thanks to the design and system simulation results obtained theoretical study we could confirm.

Keywords:

photovoltaic system. Énergie Renouvelables. MPPT strategy , perturbation & observation (PO) , improvement .

Résumé

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante, elle se résulte en transformant la lumière du soleil en énergie électrique.

Dans ce mémoire on s'intéresse à l'étude d'un système de gestion photovoltaïque avec stockage assurant la disponibilité d'énergie de façon continue, un système de gestion a été développée à fin d'optimiser la durée de vie de système de ce dernier. Ce système fonctionne à une puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT.

Grace à l'étude et la simulation de système les résultats obtenue on put valider l'étude théorique.

Mots clé :

Énergie photovoltaïque. Énergie Renouvelables. MPPT, perturbation & observation (PO) , amélioration

ملخص :

الطاقة الشمسية تشهد حالياً نمواً قوياً في جميع أنحاء العالم. نظراً لطابعها البيئي ، يبدو أنه مصدر مهم، يؤدي إلى تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية.

في هذه الأطروحة ، نحن مهتمون بدراسة نظام إدارة الخلايا الكهروضوئية مع تخزين يضمن توافر الطاقة بطريقة مستمرة، وقد تم تطوير نظام الإدارة من أجل تحسين عمر هذا النظام. يعمل هذا النظام بأقصى طاقة مع استخدام محول رافع يتحكم فيه عن طريق نظام تتبع نقاط القوة القصوى.

بفضل الدراسة ومحاكاة نظام، النتائج التي تم الحصول عليها تمكننا من التحقق من صحة الدراسة النظرية.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية, طاقات متجددة, الاضطراب والمراقبة, تحسين

Nomenclature :

P_V : photovoltaïques.

V_{mpp} : Tension au point de Puissance maximale (V).

I_{mpp} : Courant au point de Puissance maximale (A).

P_{mpp} : puissance du point maximale (W).

V_{oc} : Tension de circuit ouvert (V).

I_{sc} : Courant de court-circuit (A).

A_c : air de la cellule.

FF : facteur de forme.

NOCT : Température de fonctionnement nominal des cellules (Nominal operating cell temperature).

STC : conditions du fonctionnement normal.

n_s : Nombre de module en série.

n_p : Nombre de module en parallèle.

η_f : rendement faradique de la batterie.

η_e : rendement énergétique de la batterie.

C_n : capacité nominale ou évaluée de la batterie.

I_{bat} : courant de la batterie(A).

EDC : état de charge de la batterie.

EDD : Etat de décharge.

V_{co} : tension en circuit ouvert de la batterie (V).

U_{bat} : tension aux bornes de la batterie. (V).

n_b : nombre de cellule de la batterie.

E_b : La force électromotrice.

R_i : La résistance interne d'une cellule de la batterie.

C_{10} : c'est la capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

I_{10} : le courant de décharge en 10 heures.

T : l'échauffement de la batterie.

Z_{bat} : L'impédance complexe de la batterie (Ω).

R_{bat} : Partie réelle de l'impédance (Ω).

X_{bat} : Partie imaginaire de l'impédance (Ω).

I_{pv} : courant du module.

I_{ph} : photo courant.

I_D : courant de la diode.

I_{Rp} : courant de la résistance shunt.

ΔT_c : variation de la température.

ΔI : variation du courant par rapport à l'insolation et la température.

ΔV : variation de la tension par rapport à l'insolation et la température.

α_{sc} : Coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} ($mA/^\circ C$).

β_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} ($mV/^\circ C$).

G : niveau d'insolation dans des conditions quelconques.

T_c : température dans des conditions quelconques.

G_{stc} : niveau d'insolation dans les conditions STC.

T_{stc} : température dans les conditions STC.

V_{out} : Tension de sortie dans le convertisseur élévateur (V).

V_{in} : Tension d'entre dans le convertisseur élévateur (V).

α : rapport cyclique du hacheur.

MPPT: Recherche de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker).

P_{ch} : puissance de la charge (W).

V_{ch} : tension de la charge (V).

$P_{pv,tot}$: puissance totale des panneaux PV [W].

B_j : les besoins énergétiques journaliers [Wh].

E_s : rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : E_s [$kWh/m^2/j$].

C_p : coefficient de perte.

N_{pv} : nombre de panneaux PV.

$P_{pv,uni}$: puissance d'un panneau PV.

C_{batt} : la capacité nominale des batteries [Ah].

Aut : le nombre de jour d'autonomie.

Ubatt : la tension nominale des batteries [V].

PDD la profondeur de décharge des batteries.

η_b : rendement de la batterie.

Liste des figures

La figure	Numéro de page
Figure(I.1) : Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.	5
Figure(I.2) : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.	5
Figure(I.3) : Module photovoltaïque.	6
Figure(I.4) : Caractéristique d'un groupement en série de ns cellules identiques.	7
Figure(I.5) : Caractéristique d'un groupement en parallèle de np cellules identiques.	7
Figure (I.6) : Stockage par volant d'inertie.	11
Figure (I.7) : Principe de stockage gravitaire hydraulique.	12
Figure(I.8) Stockage à air comprimé en caverne.	13
Figure(I.9) : Système de stockage thermique.	14
Figure(I.10) : Principe de fonctionnement d'une cellule.	15
Figure(I.11) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.	16
Figure(I.12) : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.	19
Figure(II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque complète	24
Figure(II.2) : Schéma de simulation du panneau PV Solarex MSX-60	27
Figure(II.3) : Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.	28
Figure(II.4) : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV.	28
Figure(II.5) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes éclairément et une température $T_c = 25^\circ\text{c}$	29
Figure(II.6) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes éclairément et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$	30
Figure(II.7) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes températures et un éclairément $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	30
Figure(II.8) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes températures et un et un éclairément $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	31
Figure(II.9) : Figure (II.9) : Symbole d'un convertisseur DC-DC	32
Figure(II.10) : Schéma électrique d'un hacheur buck	33
Figure(II.11) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	34
Figure(II.12) : Schéma électrique d'un hacheur boost	25
Figure(II.13) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	36
Figure(II.14) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost	36
Figure(II.15) : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost	37
Figure(II.16) : Ondulation du courant de l'inductance	39
Figure(II.17) : Ondulation sur la tension de condensateur	41

Figure(II.18) : Schéma de simulation du hacheur boost	41
Figure(II.19) : Tension de sortie du hacheur boost	42
Figure(II.20) : Courant de sortie du hacheur boost	42
Figure(II.21) : Modèle R-C de la batterie	43
Figure(II.22) : Schéma équivalent de nb éléments en série	44
Figure(II.23) : Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink	46
Figure(II.4) : Tension aux bornes de la batterie CIEMAT	46
Figure (III.1) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT	49
Figure (III.2) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	50
Figure(III.3) : Signe de différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	52
Figure(III.4) : Organigramme de la méthode P&O	53
Figure (III.5) : Schéma block de la commande MPPT (P&O).	54
Figure (III.6) : Schéma de l'installation	56
Figure(III.7) : Diagramme de l'algorithme de gestion proposé.	57
Figure(III.8) : Hacheur boost.	58
Figure(III.9) : Fonctionnement du mode 1.	59
Figure(II.10) : Fonctionnement du mode 2	59
Figure(III.11) : Fonctionnement du mode 3.	60
Figure(III.12) : Fonctionnement du mode 4.	60

Figure(III.13) : Schéma Matlab/Simulink du système global.	61
Figure(III.14) : Tension de sortie du convertisseur	61
Figure(III.15) :) Tension de sortie du Panneau pv	62
Figure(III.16) : Puissance de sortie du convertisseur	62
Figure(IV.17) : Puissance de sortie du Panneau PV	62
Figure(III.18) Variation l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures.	63
Figure(III.19) : Influence de la température sur l'état de décharge.	63
Figure(III.20) : Tension aux bornes de la batterie.	64

Liste des tableaux

Tableau(I.1) : comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.....	16
Tableau(I.2) : Comparaison des caractéristiques techniques des batteries.....	21
Tableau(II.1) : Tableau (II.1) : Spécifications du module PV Solarex MSX-60.....	26
Tableau(III.1) : Les différents modes de fonctionnement	56

Table des matières

Abstract	I
Nomenclature	IV
Liste des figure	VII
Liste des tableaux	X
Table des matières	XI

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Energie Photovoltaïque; Production et stockage

Introduction.....	3
I.1 Energie photovoltaïque.....	3
I.1.1 Historique.....	3
I.1.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	4
I.1.3 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.1.4 Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
a- Influence de l'ensoleillement.....	6
b- Influence de la température.....	6
I.1.5 Le module PV.....	6
I.1.6 Architecture classique d'un module photovoltaïque.....	6
a- Association en série.....	6
b- Association en parallèle.....	7
c- Association hybride (en série et en parallèle).....	8
I.1.7 Types de systèmes photovoltaïques.....	8
a- Systèmes autonomes.....	8
b- Systèmes hybrides.....	8
c- Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	8
I.1.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	9
a- Avantages	9
b- Inconvénients.....	9
I.2 Systèmes de stockage.....	10
I.2.1 Techniques de stockage à court terme.....	10
I.2.1.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Superconductor Magnetic Energy Storage).....	10
I.2.1.2 Stockage par Condensateurs à double couche : super condensateurs.....	11

I.2.1.3 stockage sous forme d'énergie cinétique : volant d'inertie (flywheel).....	11
I.2.2 Techniques de stockage à long terme.....	12
I.2.2.1 Stockage sous forme gravitaire.....	12
I.2.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression).....	12
I.2.2.3 Stockage sous forme thermique.....	13
I.2.2.4 stockage sous forme chimique.....	14
a- Les Batteries.....	14
b- Les piles à combustibles.....	15
I.2.3 Comparaison entre les modes de stockage présentés.....	16
I.3 Principe du fonctionnement des Batteries.....	17
I.3.1 Les différents types de Batteries.....	18
a- La Batterie au plomb.....	18
b- La Batterie Nickel - Cadmium.....	19
c- La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH).....	19
d- La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion).....	20
e- La Batterie Nickel-NaCl.....	20
f- La Batterie Nickel-Zinc.....	20
Conclusion.....	22

Chapitre II : Modélisation Et Simulation De Système Photovoltaïque Avec Stockage

II.1 Introduction.....	23
II.2 Modélisation des composants du système.....	23
II.2.1 Modèle de cellule photovoltaïque.....	23
II.2.2 Module photovoltaïque.....	26
II.3 Simulation du panneau photovoltaïque.....	27
II.3.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(v)$ et $p=f(v)$	29
II.3.2 éclairement fixe $G=1000W/m^2$ et pour des différents température.....	30
II.4 Généralités sur l'hacheur.....	31
II.4.1 Exigences de l'utilisateur.....	32
II.4.2 Les types d'hacheur.....	33
II.4.2.1 Hacheur Buck.....	33
II.4.2.2 Hacheur Boost.....	35
II.4.2.3 Hacheur Buck-Boost.....	36
II.5 Choix du convertisseur.....	38
II.6 Détermination des paramètre de l'hacheur boost.....	38
II.7 Simulation de convertisseur boost.....	41

II.8 Modele électrique de la batterie.....	43
II.9 Simulation de la batterie.....	45
II.10 Conclusion.....	47

Chapitre III : Optimisation de la gestion d'énergie dans un système photovoltaïque avec stockage

III.1 Introduction.....	48
III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	48
III.2.1 Introduction.....	48
III.2.2 Principe du MPPT48	
III.3 Algorithme de commande MPPT.....	51
III.3.1 Principe de la commande 'perturbation et observation' (P&O).....	51
III.3.2 Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation	54
III.4 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système.....	54
III.4.1 Bloc de gestion sous Matlab/Simulink.....	57
III.5 Simulation du système global.....	61
III.6 Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66
Bibliographi.....	67

Introduction générale

L'énergie électrique a trois origines, fossile, fissile et renouvelable. Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂.

Les gisements de ressources énergétiques d'origines fissiles, même si elles offrent une alternative à court/moyen terme, posent quant à elles de réels problèmes environnementaux liés au traitement des déchets radioactifs et au démantèlement des centrales nucléaires [1].

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre durant une journée est dix fois plus grande que celle consommée [2]. La problématique d'un générateur photovoltaïque c'est qu'il peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension qui dépendent des conditions climatiques [3]. Suite aux changements brusques et fréquents de ces conditions (la température et l'éclairement), le point de fonctionnement (intersection de la courbe de charge avec celle du générateur photovoltaïque) change de manière conséquente, ce qui rend la poursuite du point de puissance maximale plus que nécessaire afin de minimiser les pertes en puissance du photo-générateur [3]. Alors pour une gestion optimale de l'énergie disponible a la sortie de générateur photovoltaïque, les technique d'optimisation, de régulation et de contrôle permettent d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque en transférant a la charge la puissance maximale issue de générateur PV.

Dans notre travail, nous allons intéresser à l'étude d'un système photovoltaïque autonome avec la commande de **Poursuite du Point de Puissance Maximale (PPPM)** connu en anglais par le terme **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**, et la gestion de cette énergie pour une optimisation le système .

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

Dans **le chapitre I**, nous présentons des généralités sur le photovoltaïque, sur les systèmes de stockage, ainsi que Les différents types de Batteries les plus utilisées.

Le chapitre II est consacré à la modélisation, et la simulation de tous les éléments du système étudié (le panneau photovoltaïque, le hacheur «*Boost*», la batterie)

Introduction général

Le **chapitre III** nous présenterons la commandes MPPT la plus utilisées, la conception d'un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation, et les résultats de simulation de notre système.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale

Chapter 1 : Énergie photovoltaïque production et stockage

Introduction

L'énergie photovoltaïque est une énergie dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques. Cette énergie peut être utilisée comme source d'énergie en site isolé ou bien en application connectée au réseau.

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite.

Il y a nécessité de stockage électrique chaque fois que la demande électrique est décalée dans le temps par rapport à l'apport solaire. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur.[1]

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïque est généralement assuré par des batteries et cela pour ses différents avantages.

I.1 Energie photovoltaïque

I.1.1 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

1839: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 400 km en Australie

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.[3]

I.1.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.[4]

Une jonction PN est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (Donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composée de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- une jonction PN (homo-jonction, les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.[1]

Lorsque la surface libre de la cellule est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et N.

Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérée par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les cotés de la jonction à une charge, un courant I la

parcourt et une différence de potentiel apparaît.[3]

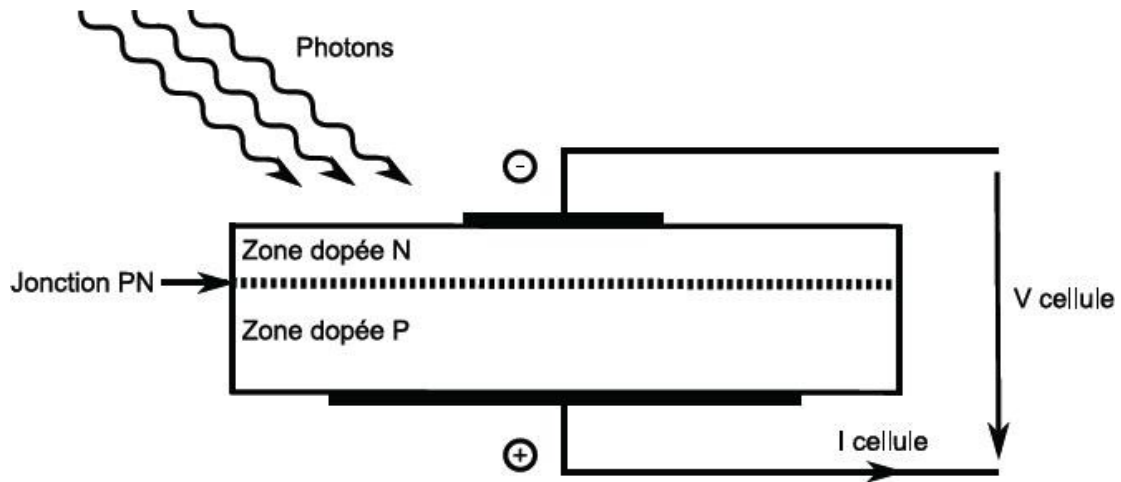


Figure (I.1) : Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. [4]

I.1.3 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au maximum de courant produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, rayonnement donné, cellule PV à une température donnée, air ambiant Circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.[5]

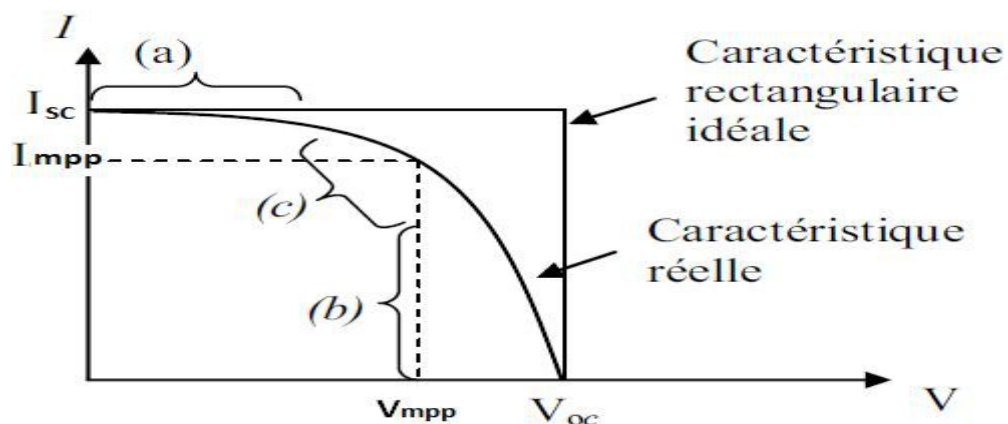


Figure (I.2) : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. [3]

Voc : tension à circuit ouvert

Isc : courant à court-circuit.

Vmpp : la tension au point maximum de puissance.

Impp : le 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 ISC proportionnel à l'éclairement.

La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension Voc.

La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

I.1.4 Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

a- Influence de l'ensoleillement

Le courant ISC varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est linéaire), la tension restant relativement constante. Cela est intéressant, notamment pour la charge d'une batterie.

b-Influence de la température

La température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.[6]

I.1.5 Le module PV

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

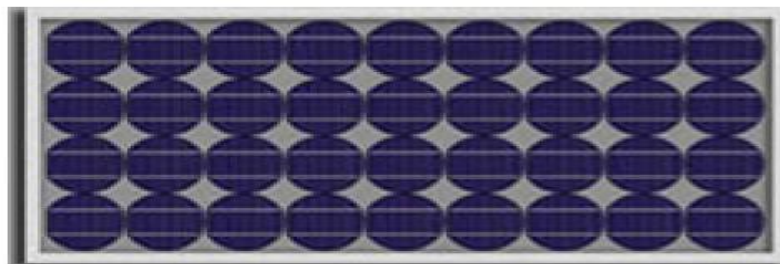


Figure (I.3) : Module photovoltaïque. [8]

I.1.6 Architecture classique d'un module photovoltaïque

a- Association en série

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

courant donné.[4] La caractéristique d'un groupement de n_s cellules PV identiques est présentée sur la Figure suivante.

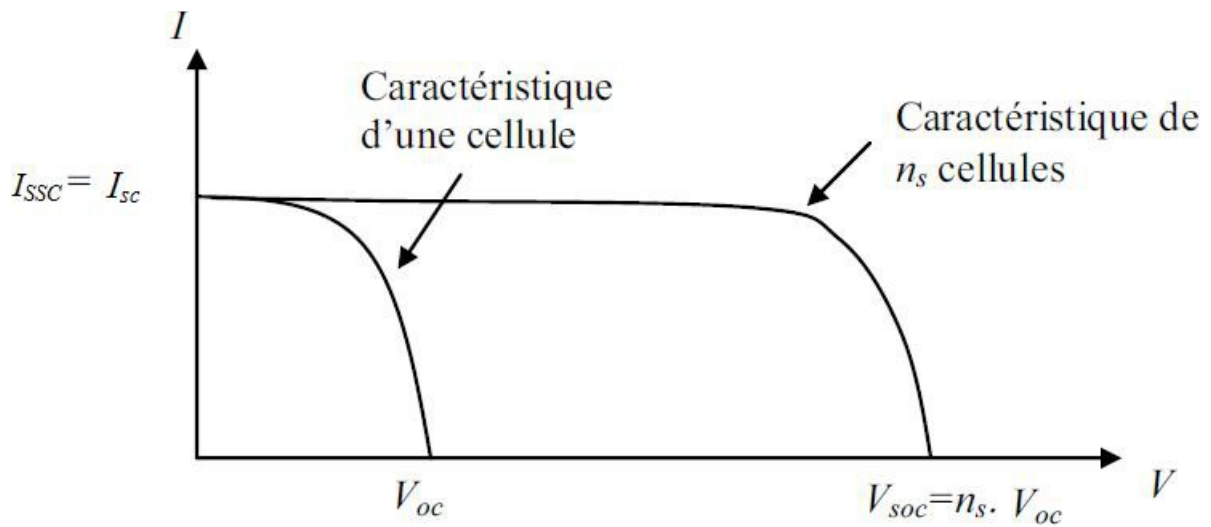


Figure (I.4) : Caractéristique d'un groupement en série de n_s cellules identiques. [3]

$V_{SOC} = n_s V_{OC}$; $I_{SSC} = I_{SC}$

Avec :

V_{SOC} : la somme des tensions en circuit ouvert de n_s cellules en série.

I_{SSC} : le courant de court circuit de n_s cellules en série.

b- Association en parallèle

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

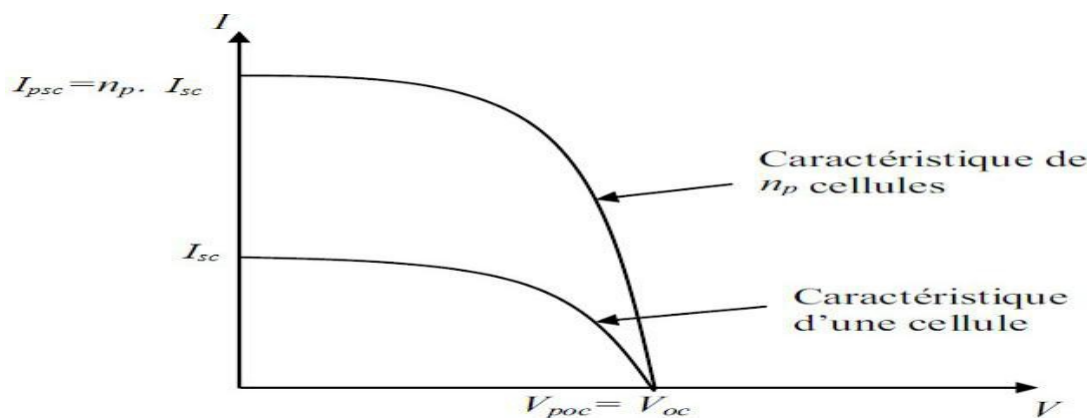


Figure (I.5) : Caractéristique d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques. [3]

Avec :

$$V_{POC} = V_{OC}; \quad I_{PSC} = n_p I_{SC}$$

V_{POC} : la somme des tensions en circuit ouvert de n_p cellules en parallèle.

I_{PSC} : le courant de court circuit de n_p cellules en parallèle.

c-Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [3] :

$$I'_{sc} = n_p x I_{sc}; \quad V'_{oc} = n_s x V_{oc}$$

Avec:

n_p : nombre des cellule en parallèle, n_s : nombre des cellule en série.

I.1.7 Types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau :

a- Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie.

Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

b- Systèmes hybrides

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

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.

c- Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un

convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA).

Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que l'on veuille une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.[11]

I.1.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV

a- Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

une haute fiabilité, car elle ne comporte pas de pièces mobiles ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

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

ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.

ils n'exigent presque aucun entretien.[6].

b- Inconvénients

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

les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

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

enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.[6].

I.2 Systèmes de stockage :

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques.[12]

Le stockage de l'énergie électrique passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, de compression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc.....) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de stockage à envisager :

stockage à court terme : (temps de stockage inférieur à 10 minutes).

stockage à long terme : (temps de stockage supérieur à 10 minutes).

Le choix du système de stockage se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont :[1], [13]

la puissance massique (en W/kg) .

l'énergie massique (en Wh/kg) .

le nombre de cycles de fonctionnement.

le coût.

le rendement .

I.2.1 Techniques de stockage à court terme

I.2.1.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Superconductor Magnetic Energy Storage)

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, on l'introduit dans un cryostat rempli d'hélium liquide. La bobine court-circuitée permet de stocker l'énergie sous forme de $\frac{1}{2}.L.I^2$. Avec L l'inductance de la bobine et Isp le courant la traversant.

Pour récupérer l'énergie il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur et l'énergie stockée est transférée en un temps très court. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMES en fonction. Même si les recherches envisagent des SMES de l'ordre de 10 – 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW.[14]

I.2.1.2 Stockage par Condensateurs à double couche : super condensateurs

Le condensateur électrique à double couche est un condensateur à très forte capacité ; on le dénomme couramment "super condensateur". Les modèles actuels se caractérisent par leur densité de puissance très élevée (bien supérieure à 1000 W/kg), leur longévité (plus de 100.000 cycles) et par un rendement relativement élevé (en général supérieur à 80 %).

De par ces caractéristiques, ils sont généralement bien adaptés à la fonction d'égalisation de charge pour une batterie ou une pile à combustible.

En effet, ils présentent une densité d'énergie fort inférieure à celle des autres sources de puissance : seulement de 3 à 7 Wh/kg ! Compte tenu par ailleurs des considérations de poids et d'encombrement, on n'arrive ainsi qu'à une ou deux centaines de wattheures d'énergie.[15]

I.2.1.3 stockage sous forme d'énergie cinétique : volant d'inertie (flywheel)

Le système de volant d'inertie est composé d'une masse inertielle mouvante, circulaire ou non tournant à une vitesse de rotation Ω , construite en matériau composite ou en acier pour le stockage d'énergie et un moteur/générateur à haute vitesse de rotation pour le transfert de cette énergie.

Ce système, suspendu sur des paliers magnétiques ou à billes, opère dans une enceinte sous vide afin de limiter les pertes par ventilation et par frottement. L'enceinte externe doit être très résistante afin d'éviter une dispersion des débris en cas de rupture du disque d'inertie en cours de fonctionnement.

L'énergie cinétique emmagasinée s'exprime par : $W=1/2 J \Omega^2$.

Le fonctionnement du système de stockage inertiel est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier temps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle. Le système d'entraînement désaccouplé, le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation. A la demande cette dernière sera transformée en énergie électrique par le générateur. Il est utilisé en application de véhicules électriques. [13].

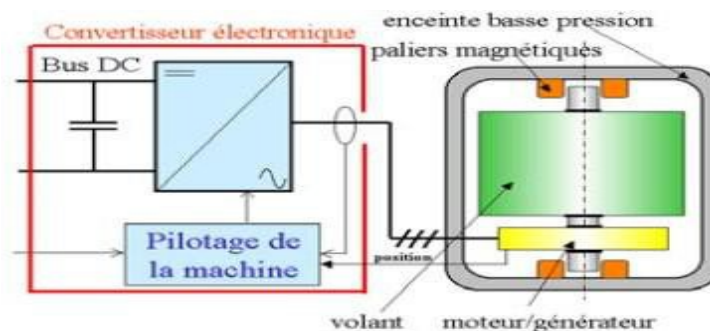


Figure (I.6) : Stockage par volant d'inertie. [16]

I.2.2 Techniques de stockage à long terme

I.2.2.1 Stockage sous forme gravitaire

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique.

Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ($w=mgh$), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

Cette technique de stockage nous fournis jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportables. En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75%. [13]

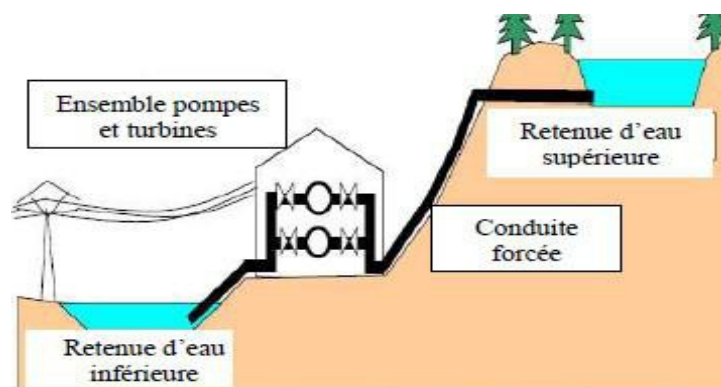


Figure (I.7) : Principe de stockage gravitaire hydraulique.

[13] I.2.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression)

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air.

Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel, puis détendu dans la turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée. Dans une installation moderne, pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser 0,75 kWh d'électricité durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage.[14]

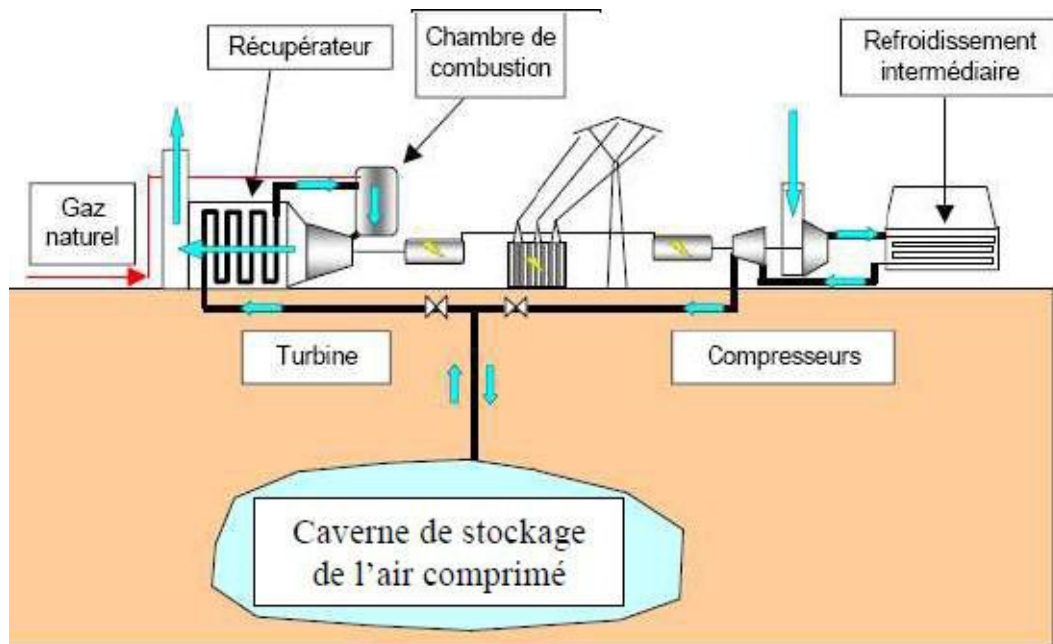


Figure (I.8) Stockage à air comprimé en caverne. [13]

I.2.2.3 Stockage sous forme thermique

Le principe de stockage thermique consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc..) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur.

Pour stocker l'électricité sous forme thermique, il faut :

transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques.

stocker la chaleur produite dans des réfractaires.

transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

Cette idée qui aurait pu paraître incongrue il y a quelques années devient maintenant envisageable grâce au développement des turbines à gaz à haute température (supérieure à 1400°C), qui autorisent un rendement de conversion de la chaleur en électricité de 60 % dans les cycles combinés. De plus, à ce niveau de température, la densité d'énergie qu'il est possible de stocker dans des réfractaires est considérable. (Il faut 500 kWh pour chauffer une tonne de réfractaires à 1400°C).

Les résistances nécessaires existent. Les réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à 1400°C sont déjà largement employés en sidérurgie. L'isolation thermique à ce niveau de température est également bien maîtrisée par cette industrie. Une première analyse montre d'ailleurs que les pertes thermiques d'un tel système sont relativement d'autant plus réduites

que la taille du stockage est grande. En plus tous les ingrédients nécessaires pour développer de tels systèmes de stockage sont disponibles.[17],[13]

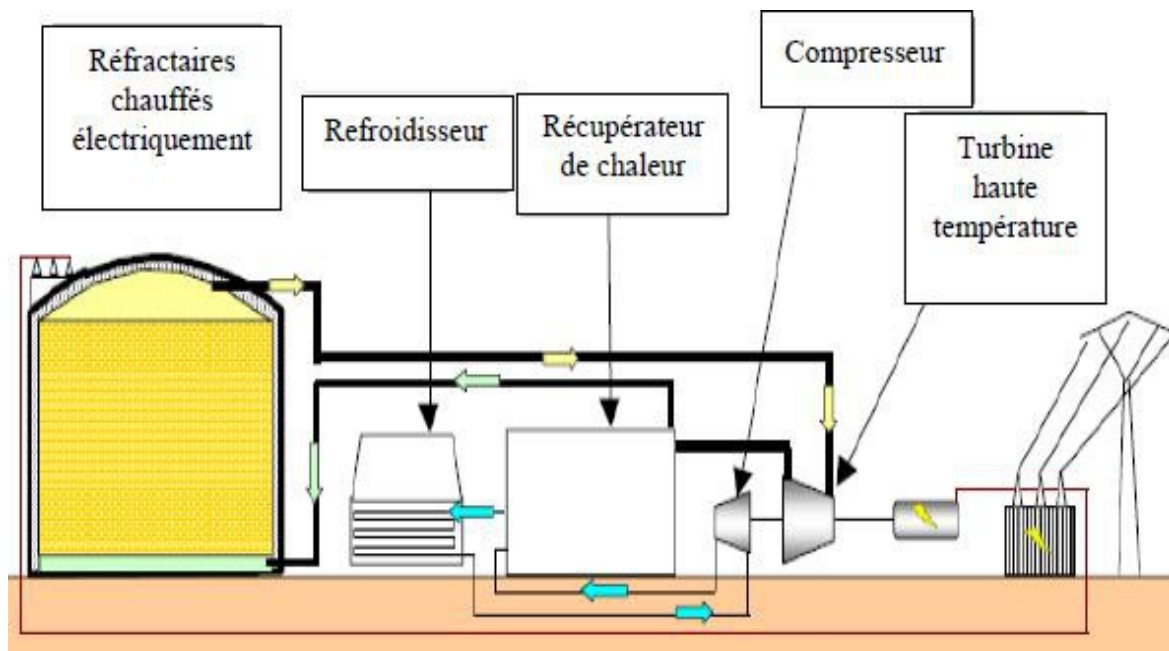


Figure (I.9) : Système de stockage thermique. [17]

I.2.2.4 stockage sous forme chimique

a- Les Batteries

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière.[1]

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité.[14]

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :

une électrode positive (cathode),

une électrode négative (anode),

un électrolyte.

Globalement, l'objectif d'une cellule est de créer une différence de potentiel entre les deux électrodes liée à leurs matériaux constitutifs. L'électrolyte permet la migration des ions entre l'anode et la cathode tout en interdisant le transfert des électrons. Ceux-ci devront transiter au travers d'un circuit électrique qui est la charge.

En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé. [18]

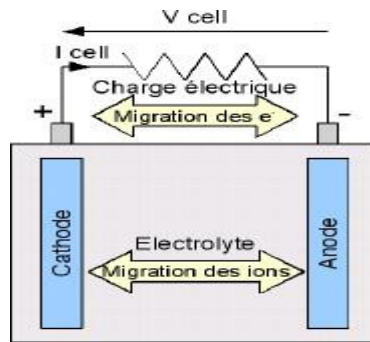


Figure (I.10) : Principe de fonctionnement d'une cellule batterie. [18]

b- Les piles à combustibles

La pile à combustible est parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée tel qu'elle suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite et fortement, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs de piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables.[19]

La pile à combustible est un dispositif électrochimique réalisant l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau. Là où une électrolyse dissocie la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène grâce au passage d'un courant ; la Pile à combustible permet de les réunir en produisant donc de l'électricité et de l'eau et également de la chaleur.

Une cellule de pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode. A l'anode, se produit une réaction d'oxydation du carburant (par exemple, de l'hydrogène) tandis que, à la cathode, se produit une réaction de réduction de comburant (le plus souvent de l'oxygène). Les électrodes sont recouvertes d'un catalyseur afin de faciliter les réactions d'oxydoréduction et séparées par un électrolyte. Ce dernier laisse transiter les protons de l'anode à la cathode mais bloque les électrons. Ainsi, ils doivent emprunter un circuit extérieur (la charge) afin de migrer.

Il existe plusieurs technologies de PAC, généralement classifiées en fonction du type de leur électrolyte et de leur température de fonctionnement. [18]

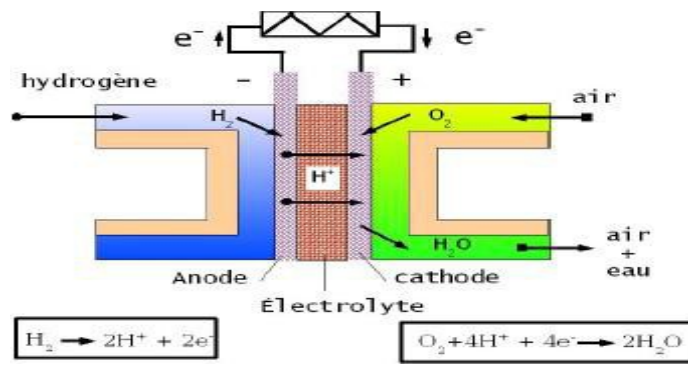


Figure (I.11) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [18]

La réaction globale s'écrit : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur} \dots\dots\dots$ (I.4)

I.2.3 Comparaison entre les modes de stockage présentés

Tableau(I.1) : comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Batterie	Faible coût	Durée de vie
Air comprimé	Capacité de stockage importante.	Site spécifique Coulé avec le gaz naturel
Pompage hydraulique	Stockage important Faible coût	Délais de construction Site favorable
Volant d'inertie	Puissance élevée	Faible densité d'énergie Le coût
Supraconducteur	Puissance élevée	Coût élevé Faible densité d'énergie
Super condensateur	Durée de vie Bon rendement	Faible densité d'énergie

les barrages hydroélectriques et le stockage d'air comprimé : sont des dispositifs gigantesques et nécessitent de disposer d'une géologie favorable.

les supraconducteurs : leur développement est encore à ce jour limité, ce qui les rend très onéreux.

pour le volant d'inertie, le coût élevé de cette technologie risque d'être un obstacle à

son développement et son utilisation en plus de sa sensibilité aux chocs malgré les différents avantages qu'il possède.

les piles à combustibles ont un coût d'investissement encore prohibitif, leur rendement global est très faible et leur durée de vie insuffisante.

les accumulateurs électrochimiques, se reconnaissent par une bonne énergie massique. leur utilisation paraît intéressante dont la charge très peu fluctuante.

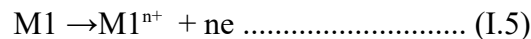
en plus, ils respectent certaines contraintes notamment un bon rapport coût/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité.[1]

Vu tous les avantages présentés par le stockage par batteries, leur association au système photovoltaïque est presque impératif dans les systèmes de production décentralisée. Voilà pourquoi on a opté dans la suite de ce travail à l'étude et à l'application du système de stockage par batteries, dans un système de production photovoltaïque autonome.

I.3 Principe du fonctionnement des Batteries

Deux électrodes plongeant dans un électrolyte constituent une chaîne électrochimique. Des lames métalliques de nature différente peuvent jouer, par exemple, le rôle d'électrodes. La chaîne électrochimique joue le rôle d'un générateur de courant par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. C'est au niveau de ces électrodes que se passent les réactions électrochimiques. On peut décrire en générale ces réactions comme suit : [20]

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation pendant la décharge et cela se caractérise par la formule suivante :



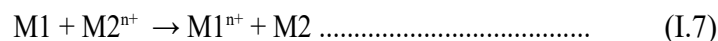
M1 : étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés vont transiter via le circuit extérieur pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, là où se fait la réaction de réduction :



M2 : étant l'espèce active de la cathode.

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :



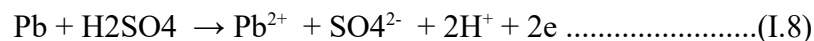
I.3.1 Les différents types de Batteries

a- La Batterie au plomb

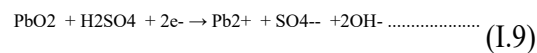
Elle se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte.

L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO₂) et la négative en plomb (Pb). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. la densité de l'électrolyte décroît lors de la décharge lorsque la batterie débite un courant les matières actives vont se transformer en sulfate et en eau.

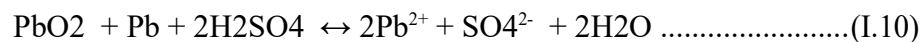
La réaction chimique au niveau de l'anode



La réaction chimique au niveau de la cathode



La réaction globale en partant des produit chimiques PbO₂ , Pb , et H₂SO₄ est la suivante :



Cela se passe pendant la décharge et pour la charge ça se fait en sens inverse

La tension de ce type d'accumulateur est voisine de 2V.

On parle ici d'une cellule et une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module appelé batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif

les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité.

si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre une valeur de seuil a partir de laquelle on assiste a la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène O₂ gazeux a l'électrode positive et en dihydrogène H₂ gazeux à l'électrode négative.[18]

/

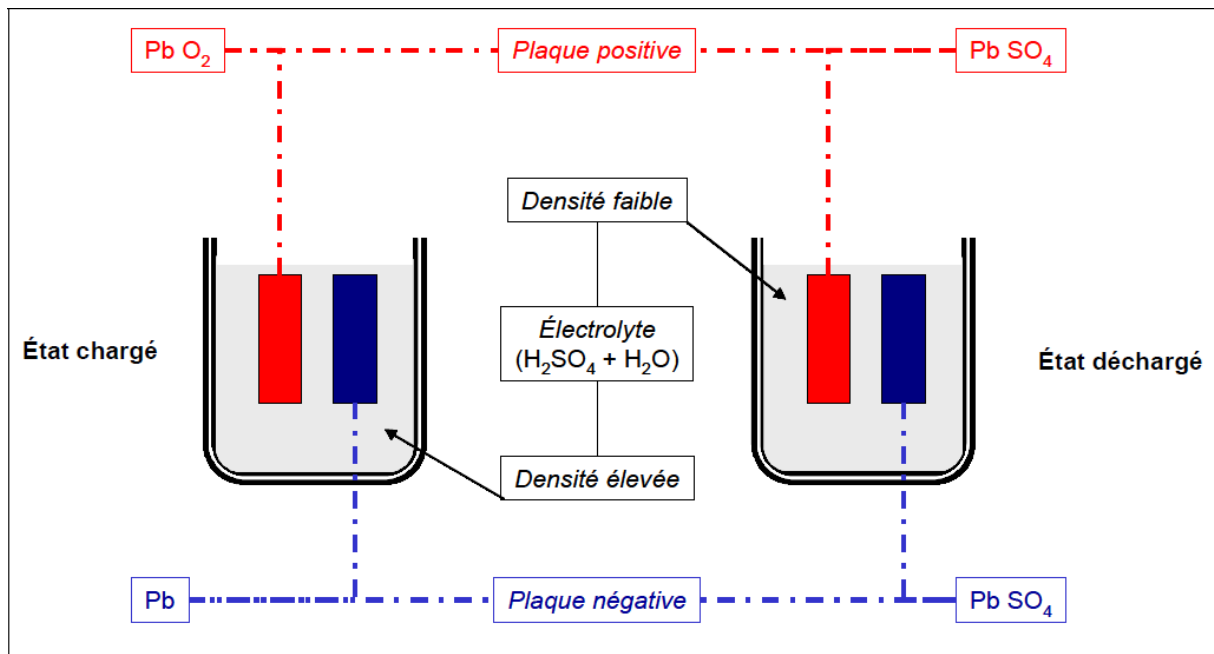
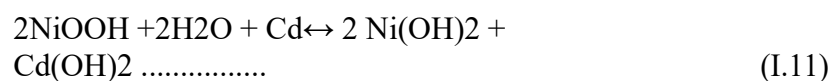


Figure (I.12) : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.

b- La Batterie Nickel - Cadmium

Les batteries Cadmium-Nickel sont réalisés à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse. La réaction réversible globale est la suivante:



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative. L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
- supportent les décharges totales
- pas d'émanation toxique.[10]

c- La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH diffèrent des Ni-Cd de part la constitution de l'électrode négative, ici basée sur de l'hydrogène adsorbé dans un métal, Cette technologie apporte des améliorations intéressantes par rapport au Ni-Cd. Tout d'abord, l'énergie spécifique est plus élevée.

Ensuite, l'absence de cadmium rend le retraitement de l'accumulateur en fin de vie beaucoup plus aisé et une éventuelle rupture de la cuve moins problématique. Le coût de ce type de batterie reste malheureusement des plus élevés. Ces batteries ont été développées avec 3 objectifs :

augmenter la capacité par unité de volume.

favoriser les charges rapides.

éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et est déjà interdit dans certains pays.

A part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces batteries ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire. Ils sont même moins bons en ce qui concerne la tenue au froid. [18]

d- La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevées et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€/ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances.[10]

e- La Batterie Nickel-NaCl

Simple, de très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles et extrêmement robustes. Ces accumulateurs fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisoirement arrêté mais pourrait bien reprendre.[10]

f- La Batterie Nickel-Zinc

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait le bienvenu et ces batteries ont une densité d'énergie élevée (25% plus que la batterie NiCd). La tension d'une cellule varie de 1.6 à 1.8 V. La durée de vie reste le problème majeur à résoudre.[10]

Il existe d'autres types de batteries qu'on n'a pas citées. On donne ci-dessous un tableau de comparaison entre quelques différents types de batteries.

Tableau(I.2) : Comparaison des caractéristiques techniques des batteries

Technologie	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/Ion
Energie Spécifique (Wh/kg)	35-50	50-60	70-95	60-130
Puissance Spécifique (W/kg)	80-150	150-400	200-1000	500-4000
Rendement (%)	>80	75	70	>95
Nombre cycle	500-1000	800	750-1200	1000
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	Toxicité	Comportement en température	Le coût élevé

Notre travail consiste à étudier le système photovoltaïque avec stockage et on a opté pour une batterie au plomb et cela pour les avantages suivants : faible coût.

bon rendement.

meilleur compromis en termes de cout / performance / entretien.

sa durée de vie.

caractéristiques électrochimiques favorable.

une large disponibilité.

entretien faible ou nul.

bonne tenue aux températures extrêmes

Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque ainsi que les différents modes de stockage, notamment, le stockage électrochimique et ses constituants. Nous avons par la suite modélisé le module photovoltaïque, le hacheur (survolteur), et nous avons aussi exploité le modèle CIEMAT de la batterie pour simuler suivi d'une simulation du système global sous Matlab/Simulink.

Chapitre II

Modélisation Et Simulation

De Système Photovoltaïque

Avec Stockage

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants d'un système photovoltaïque avec stockage, nous procédons à la modélisation de ce dernier, ce qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant chaque élément du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord une modélisation des différents composants de système à étudier (à commencer par le modèle du générateur photovoltaïque) puis le système de conversion de celui-ci muni de batteries. Cette modélisation sera faite utilisant l'environnement (Matlab/Simulink).

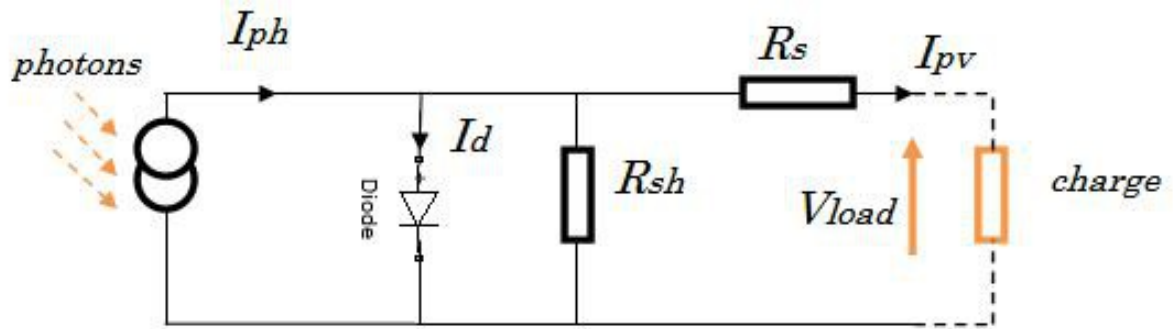
II.2 Modélisation des composants du système

II.2.1 Modèle de cellule photovoltaïque

Les solutions analytiques donnent une compréhension intuitive des cellules solaires et de leurs performances. Elles sont limitées dans leurs précisions en raison des nombreuses hypothèses simplificatrices effectuées. Il est plus direct de résoudre les équations sans la nécessité de faire autant d'hypothèses simplificatrices avec des codes de calcul utilisant la méthode des différences ou éléments finis pour résoudre les équations concernant des matériaux semi-conducteurs constitutifs des cellules solaires. La simulation numérique permet une analyse de la configuration et des conditions de fonctionnement pour laquelle des expressions analytiques simples ne sont pas adaptées. [8]

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode figures (II.1). Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_{sh} qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.

Il existe plusieurs schéma d'une cellule photovoltaïque et nous avons utilisé le modèle basé sur le schéma d'une cellule photovoltaïque complète vu sa simplicité.



Figure(II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque complète

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule ;

I_d : Le courant circulant dans la diode ;

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} ;

Le courant passant par la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

V_d : Tension aux bornes de la diode;

R_{sh} : Résistance Parallèle.

Le courant de la jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

I_s : Courant de Saturation ;

V_{th} : Tension thermique.

$$\text{Avec : } V_{th} = \frac{A.K.T_{mod}}{q} \quad (\text{II.4})$$

T_{mod} : Température de fonctionnement de la cellule ;

A : Facteur d'idéalité de la diode;

K : la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$) ;

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left(\frac{\text{NOCT}-20}{800} \right) \quad (\text{II.5})$$

T_c : Température ambiante;

T_{ref} : Température de référence [K];

G : Éclairement.

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_s = I_{os} \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.E_g}{A.K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad (\text{II.6})$$

I_{os} : Le courant de court-circuit de la cellule ;

T_r : Température référence de la cellule;

E_g : Énergie de seuil.

Avec NOCT étant Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

La tension V_d est donnée par :

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (\text{II.7})$$

Le photon-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} \quad (II.8)$$

I_{cc} : Courant de court de circuit ;

K_i : Coefficient de la température de I_{pv} ;

G_0 :Éclairement pour les STC.

En remplaçant dans (II.1) les équations (II.2), (II.3) et (II.8), nous obtenons :

$$I_{pv} = [I_{cc} + K_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

II.2.2 Module photovoltaïque

Nous avons choisi Le Solarex MSX-60. Qui est un module photovoltaïque composé de 36 cellules en série, ayant une puissance maximale de 60 W et considéré dans les conditions standards (STC : Standard Test Conditions) $G = 1000 \text{ W/m}^2$; $T_c = 25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Tableau (II.1) : Spécifications du module PV Solarex MSX-60

Grandeurs	Valeurs
Puissance maximale, P_{max}	60 W
Tension de P_{max} , V_{mp}	17.1 V
Courant de P_{max} , I_{mp}	3.5 A
Courant de court-circuit, I_{sc}	3.8 A
Tension de circuit-ouvert, V_{co}	21.1 V
Coefficient de température en circuit-ouvert V_{oc} , K_v	-80mV/°C
Coefficient de température en court-circuit I_{sc} , K_i	2.4mA/°C
Nombre de cellules	36

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment nous avons procédé à une série de simulations, ainsi les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :

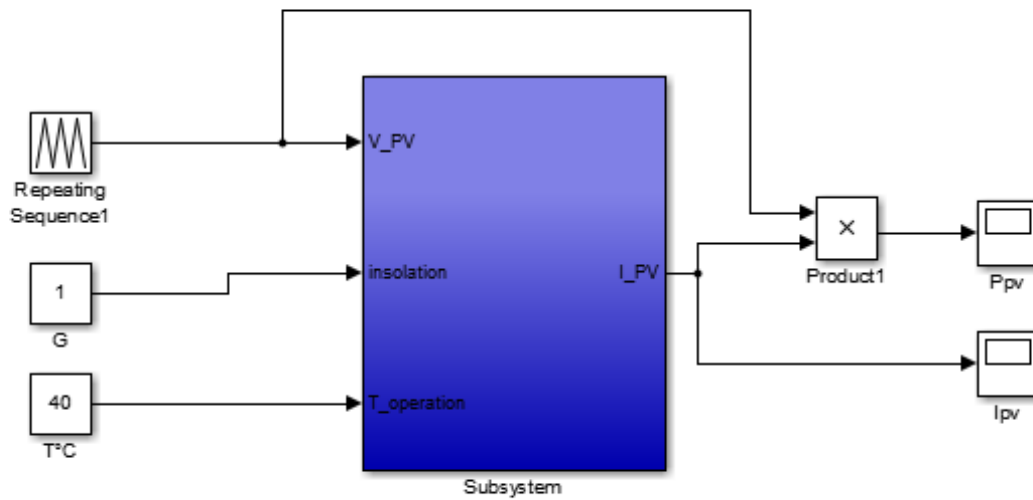
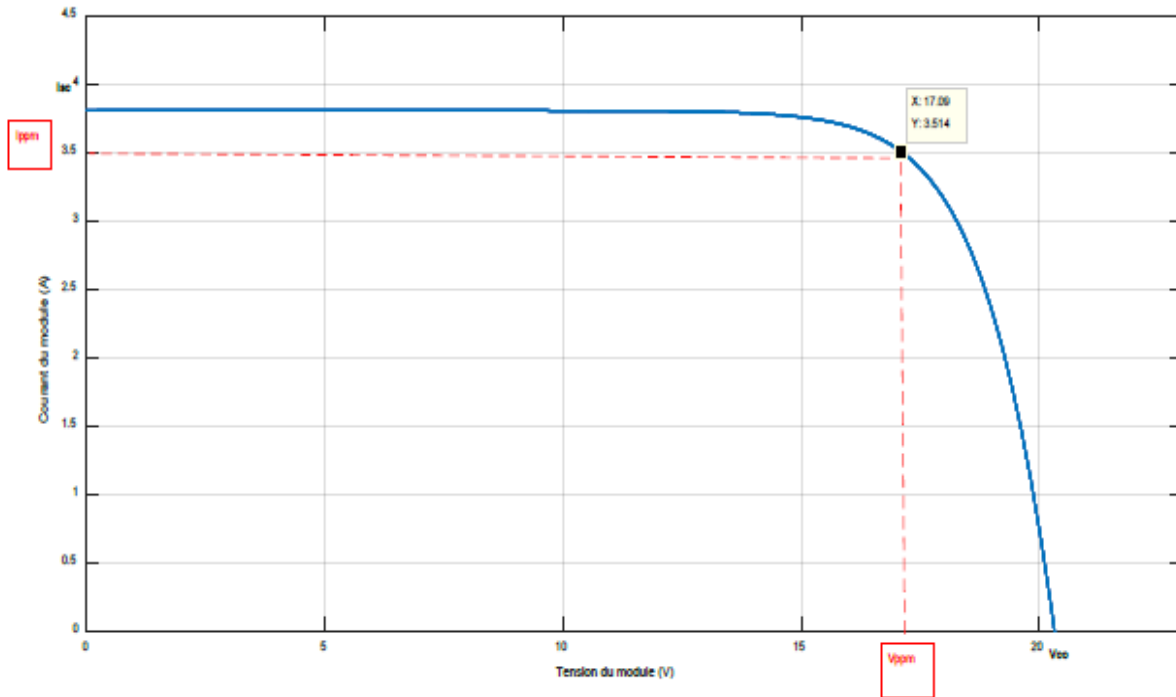


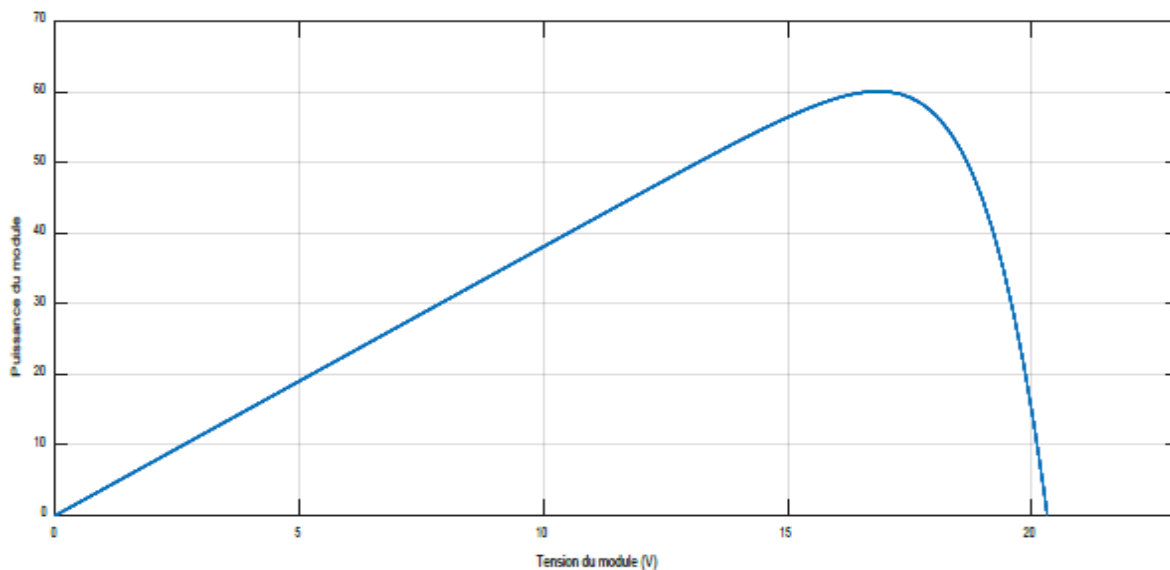
Figure (II.2) : Schéma de simulation du panneau PV Solarex MSX-60

Figure(II.3) : Présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$

Figure(II.4) : Présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$



Figures(II.3) : Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.



Figure(II.4) : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV

La figure(II.3) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à $V=17.1V$ puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

La figure(II.4) présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (60W) puis diminue rapidement.

La figure(II.3) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à $V=17.1V$ puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

La figure(II.4) présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (60W) puis diminue rapidement.

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le module PV. Les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et Courant- Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs I_{sc} , I_{ppm} , V_{co} , V_{ppm} ainsi que P_{ppm} sont les valeurs exactes du Tableau II.1 donné précédemment. Nous allons passer dans ce qui suit à l'étude de l'influence des paramètres d'entrées : Température et Ensoleillement.

II.3.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$

et $P=f(V)$

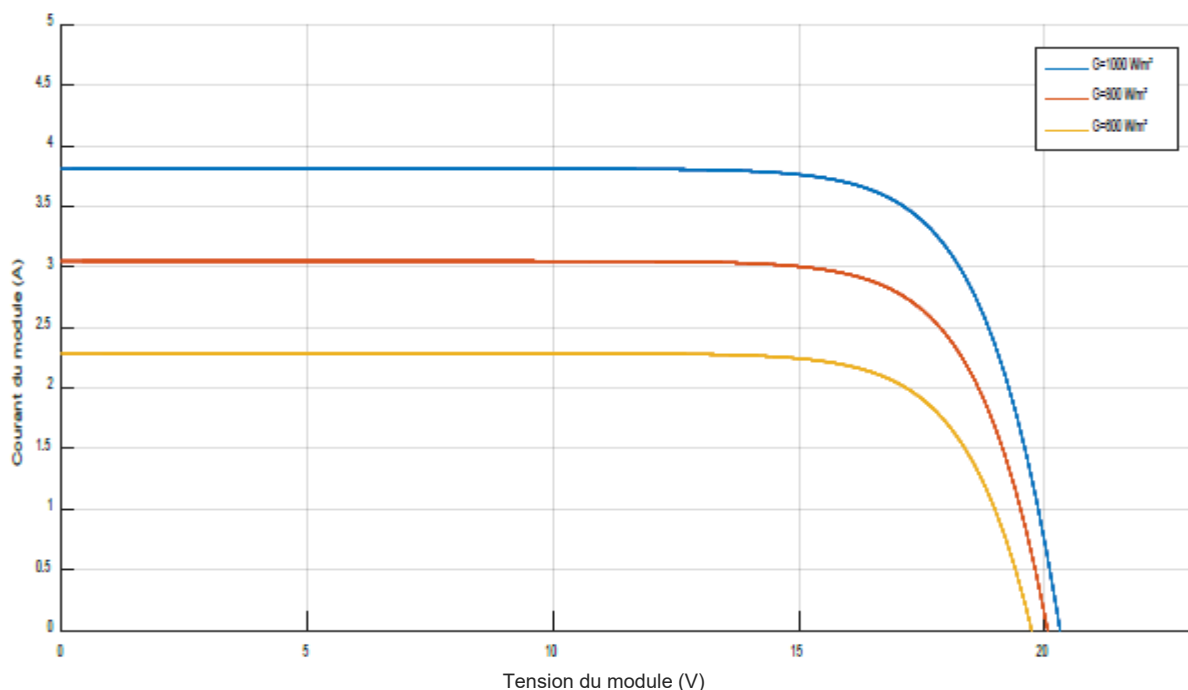


Figure (II.5) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ C$

La figure(II.5) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension (même plage de variation) de sortie à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant

La figure(II.5) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension (même plage de variation) de sortie à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant.

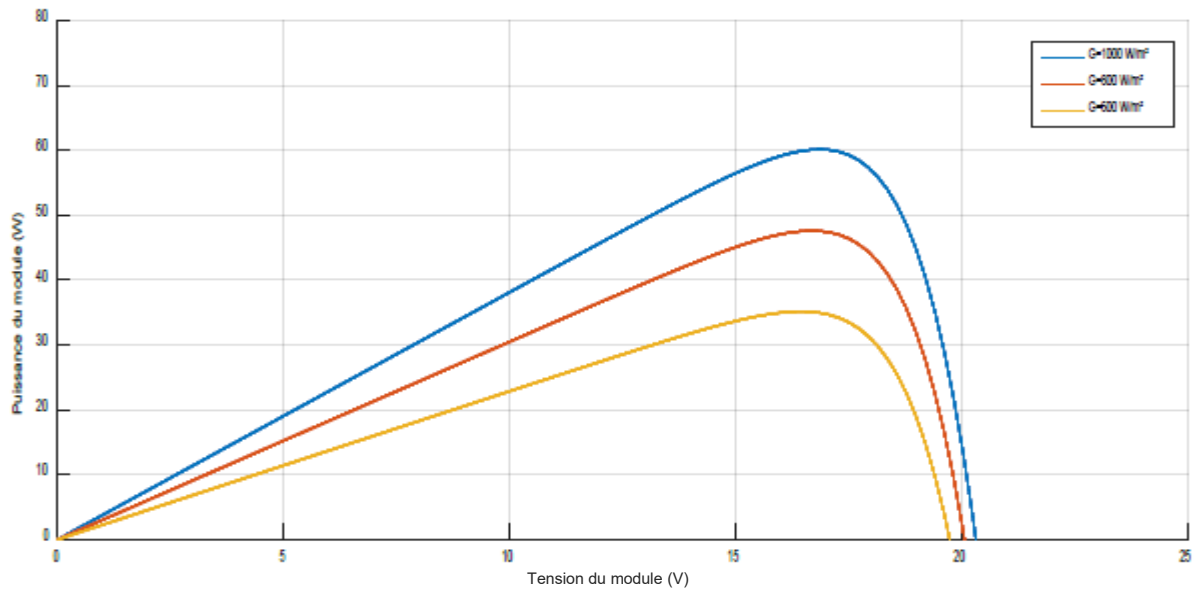


Figure (II.6) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure(II.6) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation de la puissance.

- **Éclairement fixe $G = 1000\text{W/m}^2$ et pour des différentes températures**

Le même travail comme précédente, nous avons fixé éclairement pour différents températures.

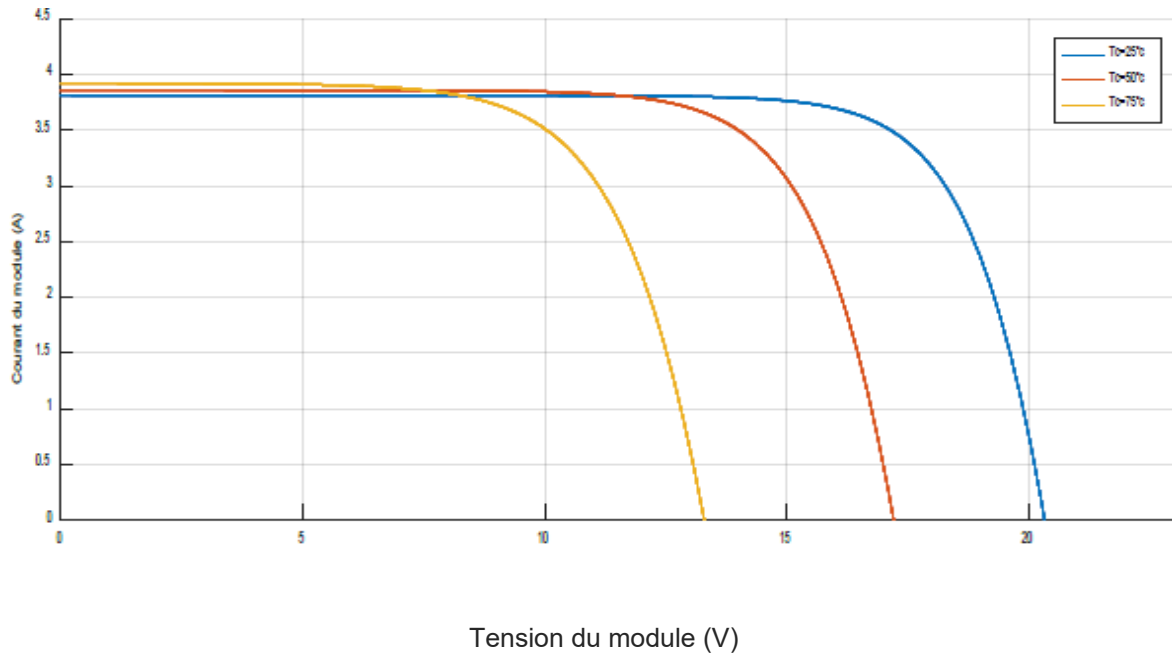


Figure (II.7) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$

La figure(II.7) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension à éclairage fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne un courant relativement constant, on remarque aussi la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

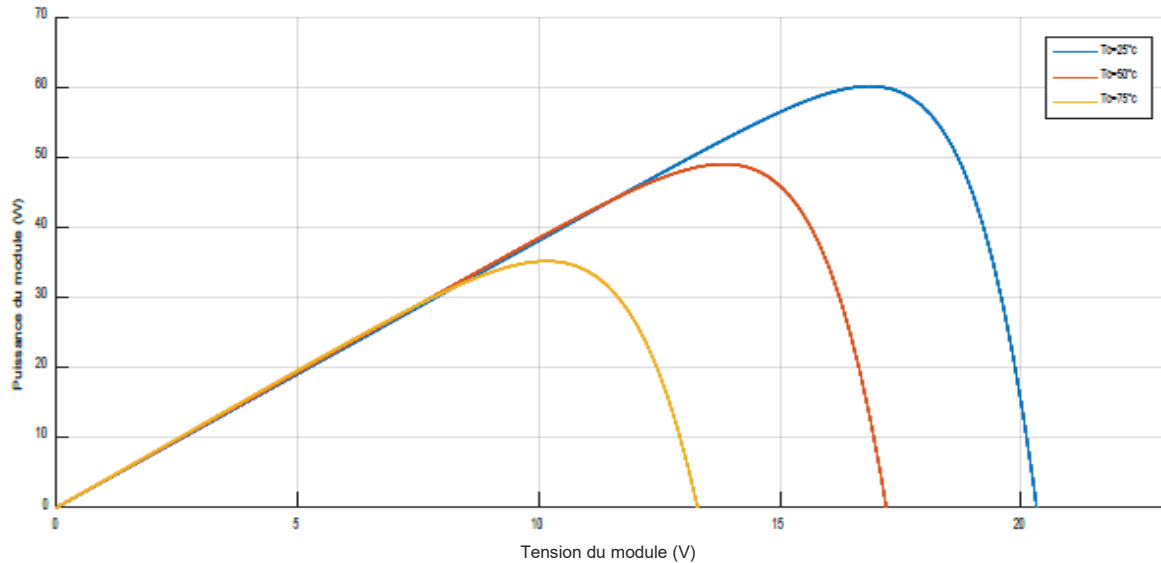


Figure (II.8) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$

La figure (II.8) présente l'évolution de la puissance générée par le module en fonction de la tension à l'éclairement fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance, on remarque aussi la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

II.4 Généralités sur l'hacheur

L'hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [19]

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [9]

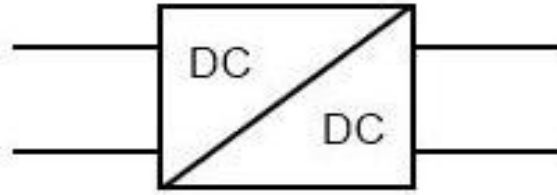


Figure (II.9) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.4.1 Exigences de l'utilisateur

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit.

Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [20] :

1. Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé
2. posséder un rendement élevé ;
3. Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;
4. Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.) ;
5. Ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique) ;
6. Être la plus petite et la plus légère possible ;
7. Et bien entendu être de préférence peu coûteuse ...

II.4.2 Les types d'hacheur

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [21]:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

II.4.2.1 Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.10) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]

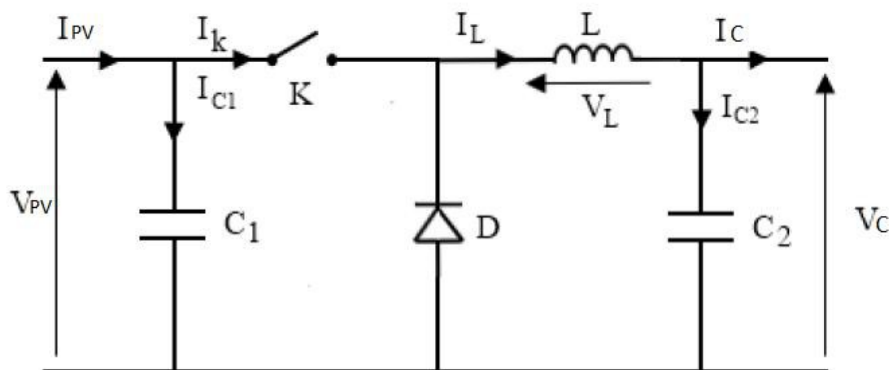


Figure (II.10): Schéma électrique d'un hacheur buck

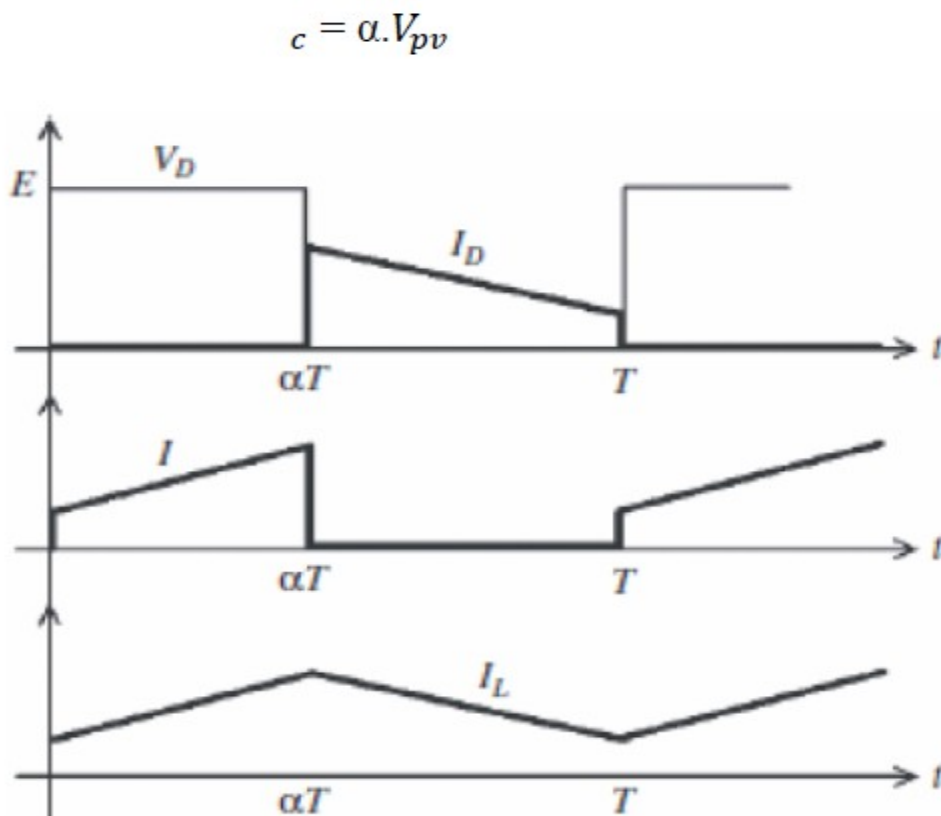
Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension appliquée aux bornes de la diode est l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f = \frac{1}{T}$.

La source V_{pv} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. [23]

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure(II.11) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. [23]

[II.10]



Figure(II.11) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.4.2.2 Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.12) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]

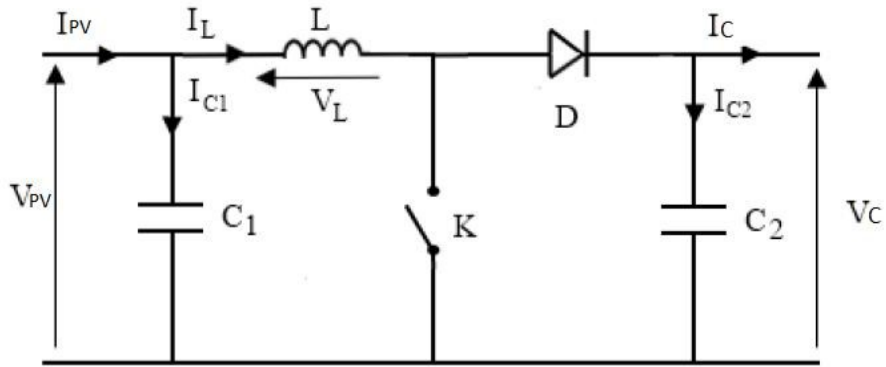
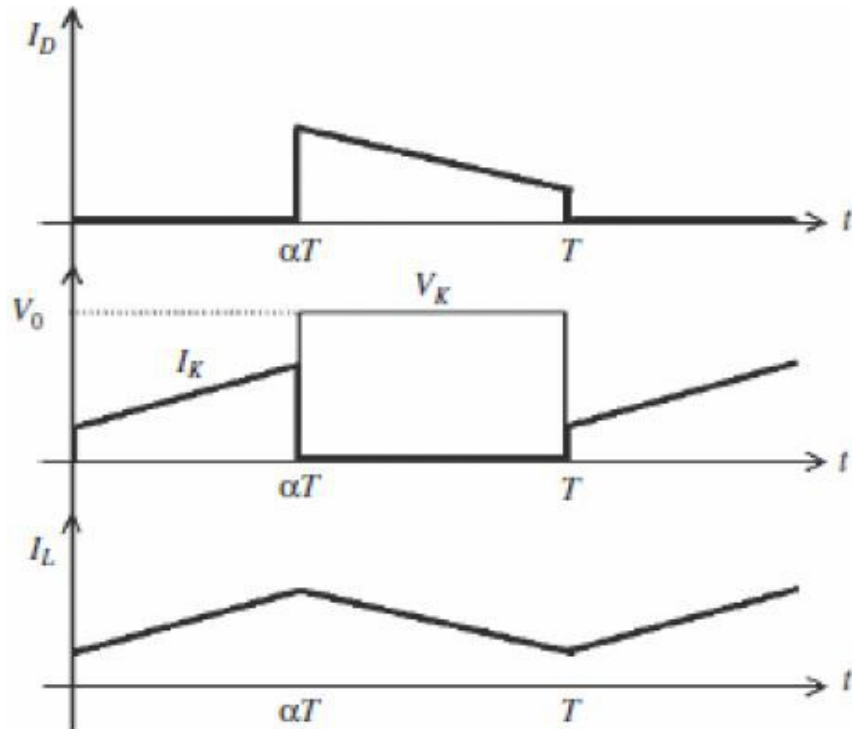


Figure (II.12) : Schéma électrique d'un hacheur boost

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps t , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $k=c$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [23] :

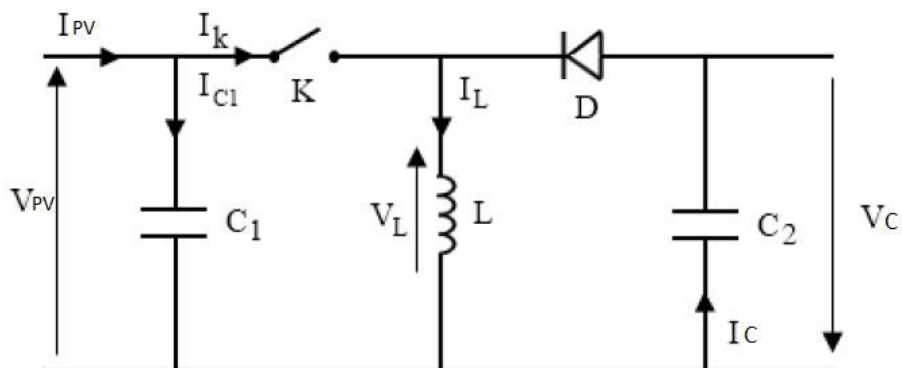
$$V_c = (1 - \alpha) = V_{pv} \quad (II.11)$$



Figure(II.13) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

II.4.2.3 Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.14) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]



Figure(II.14) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

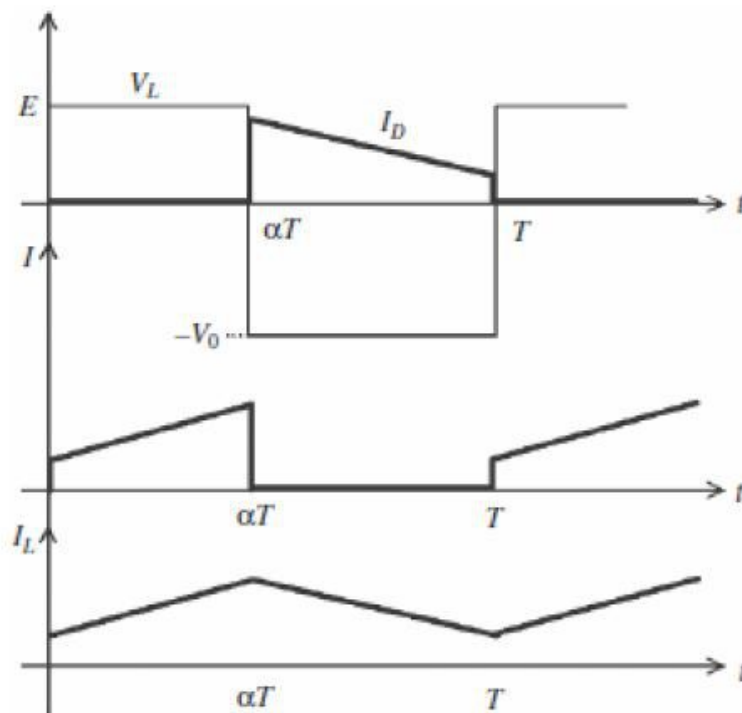
Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure(II.15) Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{pv} .

À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_1 est égale à V_c . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [23] :

$$V_{pv} \cdot \alpha \cdot T = V_c \cdot (1 - \alpha)T \quad (\text{II. 12})$$

Quand le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.



Figure(II.15) : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost

II.5 Choix du convertisseur DC-DC

Le générateur PV fournit une tension faible que nous devons adapter à la tension nominale de la charge, ce qui sera réalisé par l'hacheur élévateur. Ceci est la condition sur le choix du convertisseur. En plus, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander

Le convertisseur Boost est le plus adapté pour ce type de conversion, car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Pour cette raison nous allons utiliser dans notre système un hacheur élévateur (Boost).

II.6 Détermination des paramètres du hacheur Boost

Les calculs des paramètres du hacheur Boost se font à l'aide des formules ci-dessous :

à Le rapport cyclique (α)

$$V_{pv} = V_c \frac{1}{1-\alpha} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c} \quad (\text{II.13})$$

• Résistance (R) :

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (\text{II.14})$$

• L'inductance (L) :

Sachant que le courant aux bornes de l'inductance est représenté par la figure suivante :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha T_s) - i_L(0)) \quad (\text{II.15})$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.16})$$

première période est donné par :

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L}(\alpha T_s) \quad (\text{II.17})$$

Paramètres du hacheur :

$L = 75 \text{ mH}$

$C = 400 \text{ uF}$

$a = 0.4$

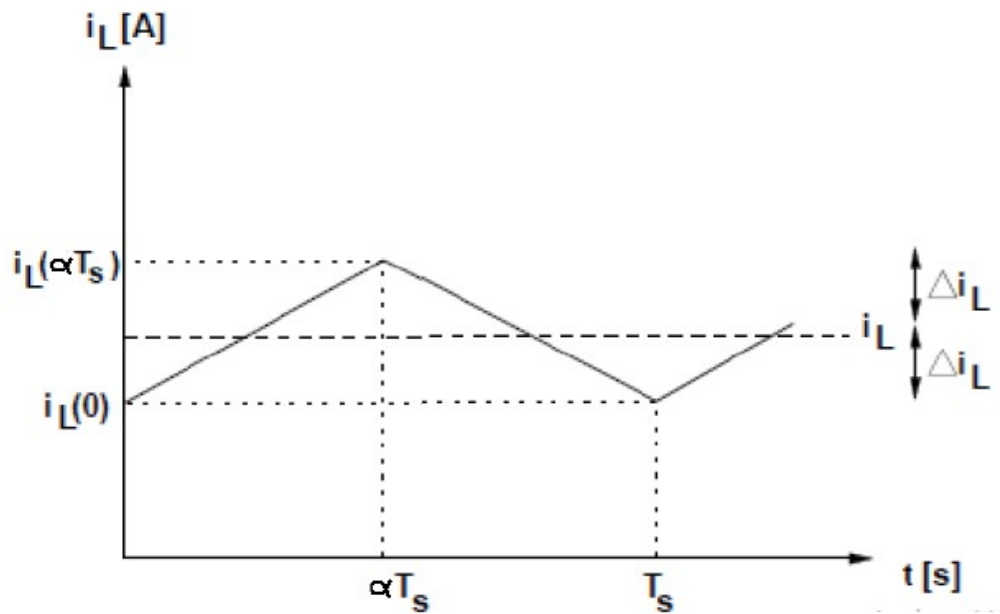


Figure (II.16) : Ondulation du courant de l'inductance

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L}(\alpha T_s) \quad (\text{II.18})$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de l'inductance L :

$$L = \frac{V_{pv}}{2\Delta i_L F_s} \alpha \quad (\text{II.19})$$

Avec $F_s = \frac{1}{T_s}$

Capacité (C) :

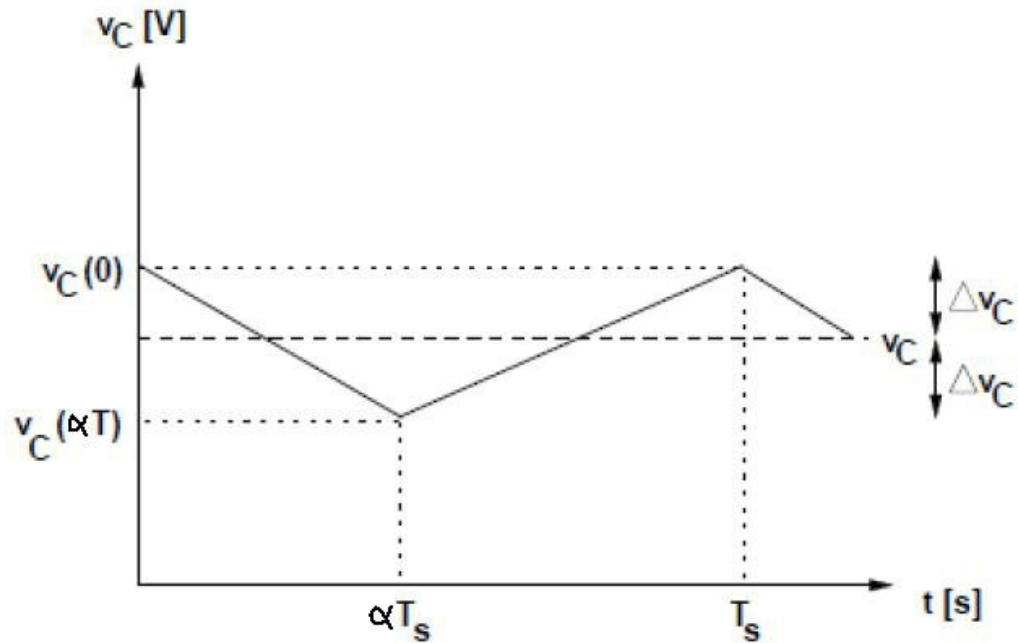
Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{II.20})$$

$$\int_{-\Delta V_c}^{\Delta V_c} V_c = \int_0^{\alpha T_s} i_c dt$$

$$-2\Delta V_c = -\frac{1}{C} \frac{V_s}{R} \alpha T_s$$

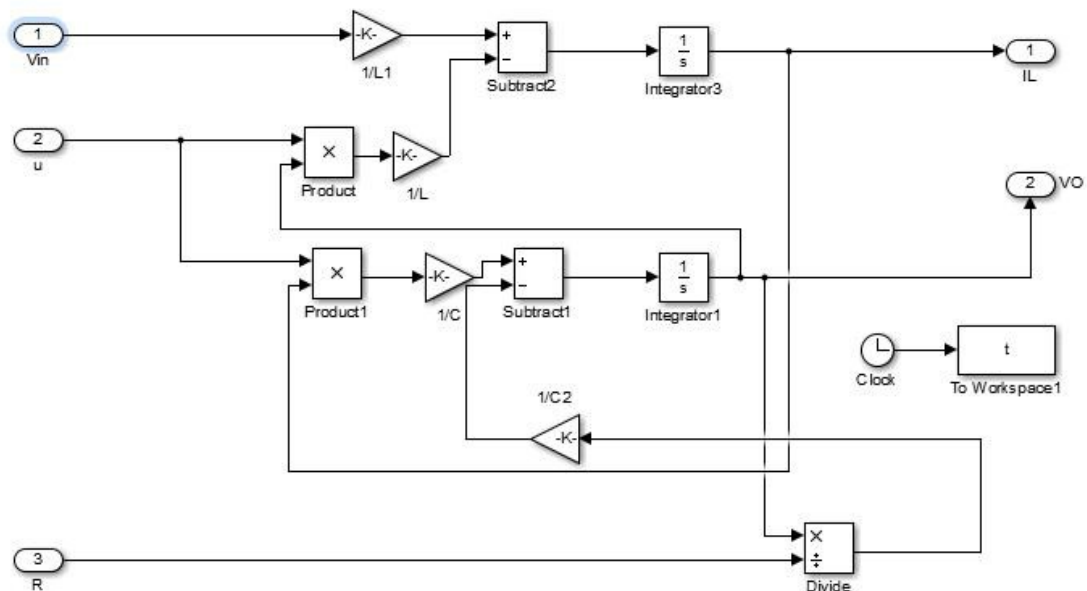
$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_s} \alpha \quad (\text{II.21})$$



Figure(II.17) : Ondulation sur la tension de condensateur

II.7 Simulation de convertisseur boost

Pour simuler le fonctionnement de l'hacheur élévateur, nous avons utilisé Matlab/Simpower system pour nous rapprocher du fonctionnement réel, ce qui est présenté par la figure (II.18).



Figure(II.18) : Schéma de simulation du hacheur boost

Les résultats de simulation de l'hacheur élévateur (boost) sont présentés sur les figures (II.19) et (II.20). Ces figures représentent la tension et le courant de sortie de l'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur élévateur (boost) est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur élévateur (boost) effectue correctement son rôle. Le courant et la tension de sortie subie un régime transitoire oscillant puis se stabilise en régime permanent.

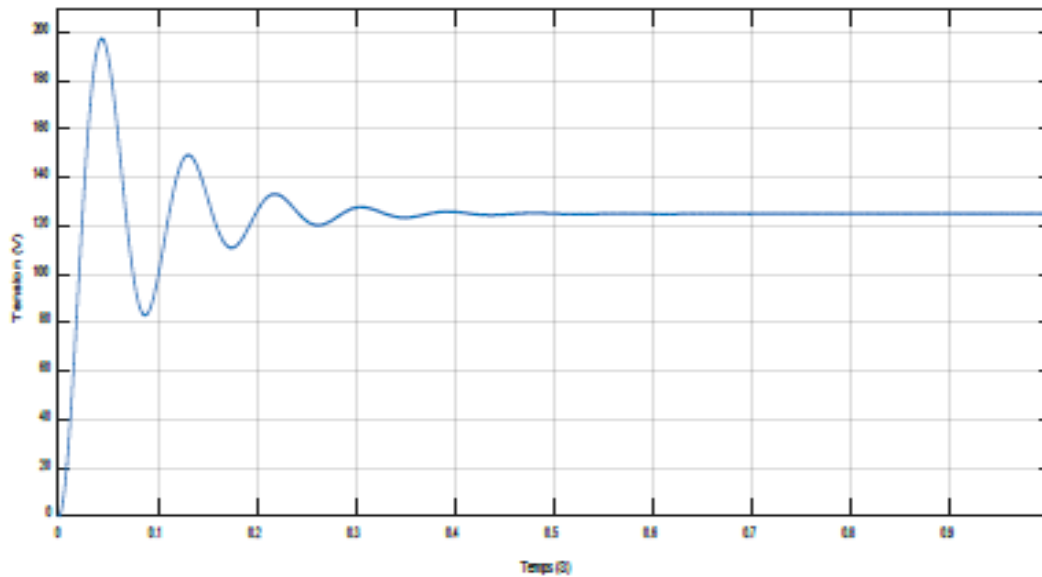


Figure (II.19) : Tension de sortie du hacheur boost

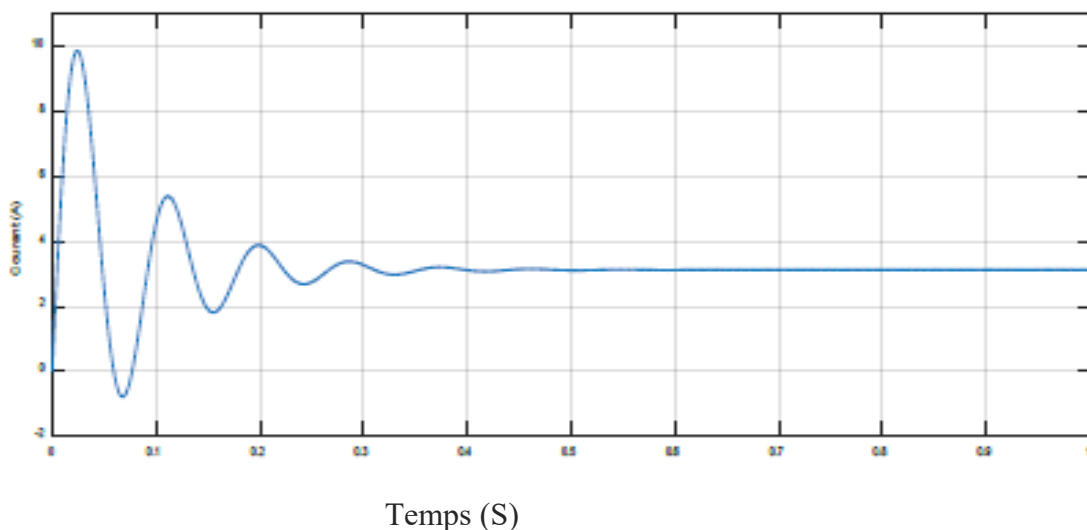


Figure (II.20) : Courant de sortie du hacheur boost

II.8 Modèle électrique de la batterie

Il existe plusieurs types de stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques. La

batterie au plomb acide est la technologie la plus utilisée, « à cause » de son faible coût et sa

disponibilité. Notre choix s'est porté sur le modèle : CIEMAT (Research Center for Energy, Environment and Technology, Espagne) relativement complet, malgré quelques

imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de

décharge, le modèle R-C, utilisé lors des simulations avec des pas de temps « très petits » (de

l'ordre de 10^{-6} s pour permettre de tenir compte de la fréquence de hachage des convertisseurs).

Modèle électrique simple de la batterie

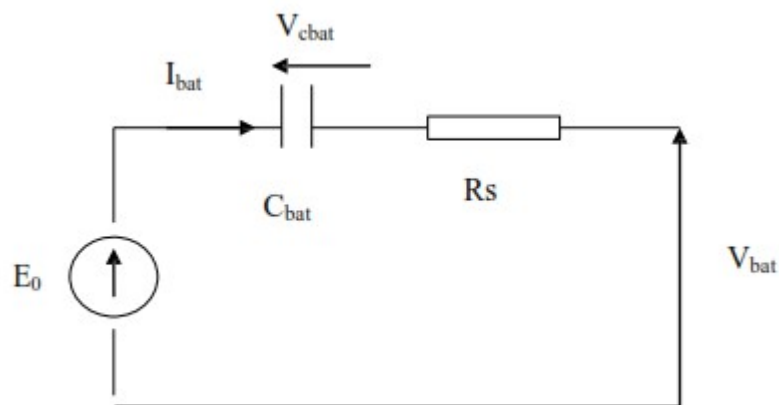


Figure (II.21) Modèle R-C de la batterie

Ce modèle comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R_s). [1]

Nous avons donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot i - V_{cbat} \quad (II.22)$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II.23)$$

C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

Q_{bat} : la quantité de charge électrique en coulomb

Modèle CIEMAT

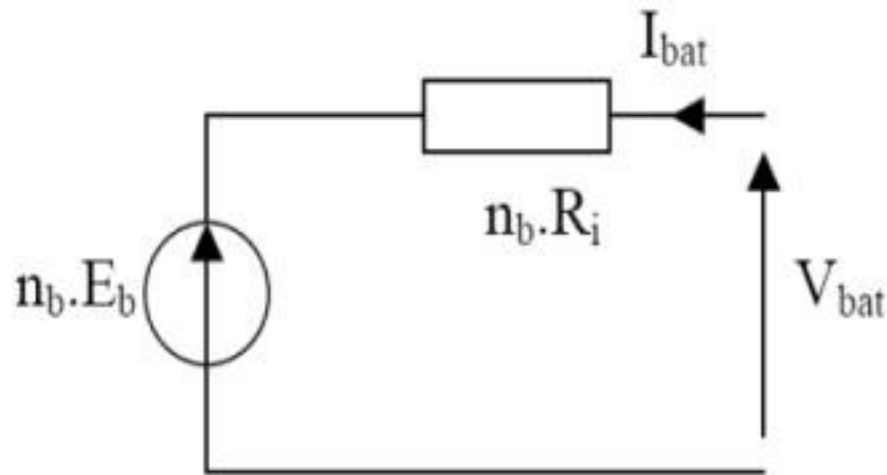


Figure (II.22) : Schéma équivalent de n_b éléments en série [1]

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène). [13]

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad (\text{II.24})$$

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge, elle est donnée par l'équation (II.29).

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{1}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (\text{II.25})$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} (C_{10} est la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h: $C_{10} = 10 \cdot I_{10}$), dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

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

$$EDC=1-\frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.26})$$

Avec la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (\text{II.27})$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [37] :

Tension en décharge :

$$V_{bat-d} = n_b [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.002 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (\text{II.28})$$

Tension en charge :

$$V_{bat-c} = n_b [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.006 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (\text{II.29})$$

Paramètres du modèle CIEMAT utilisé :

$$nb = 24$$

$$C10 = 92$$

$$I10 = 9.2$$

II.9 Simulation de la batterie CIEMAT

La figure (II.23), représente le Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink. La figure (II.24), représente la tension aux bornes de la batterie CIEMAT cette résultat montre le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge.

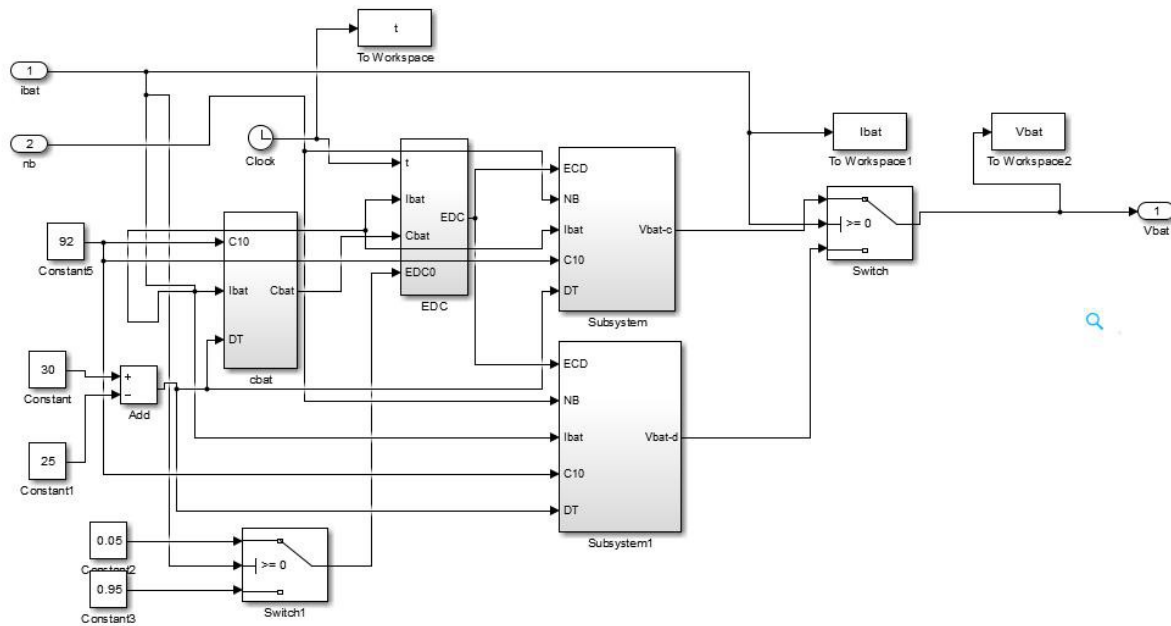


figure (II.23) Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink

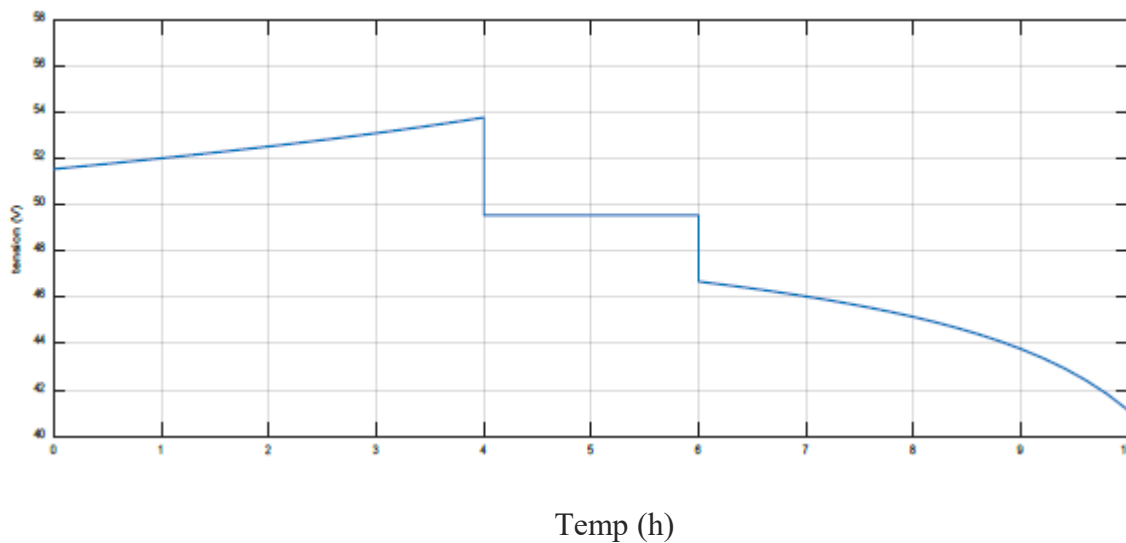


figure (II.24) :Tension aux bornes de la batterie CIEMAT

La figure (II.24) Tension aux bornes de la batterie CIEMAT avec une valeur de courant (-8 A/8 A) pour le charge/décharge, le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge est claire.

II.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation du système étudié. Nous avons commencé par le module photovoltaïque, Puis nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques. Pour finaliser nous avons modélisé les différents éléments de notre système photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, la batterie). Dans ce qui suit nous allons faire Nous avons simulé le module photovoltaïque avec MPPT (PO), puis nous les avons faire la gestion de notre système.

Chapitre III

Optimisation de la gestion d'énergie dans un Système Photovoltaïque avec Stockage

III.1 Introduction :

Pour la conception d'un système photovoltaïque avec stockage, l'application de commande MPPT pour le bon fonctionnement de ce système est nécessaire. Dans ce chapitre, Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par le panneaux photovoltaïque et de contrôler les échanges d'énergies entre les différents composants.

ensuite nous présentons brièvement l'architecture de notre système photovoltaïque. et nous terminons le chapitre par simulation du système globale.

III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

III.2.1 Introduction

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [12]

III. 2.2 Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [12]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.1).

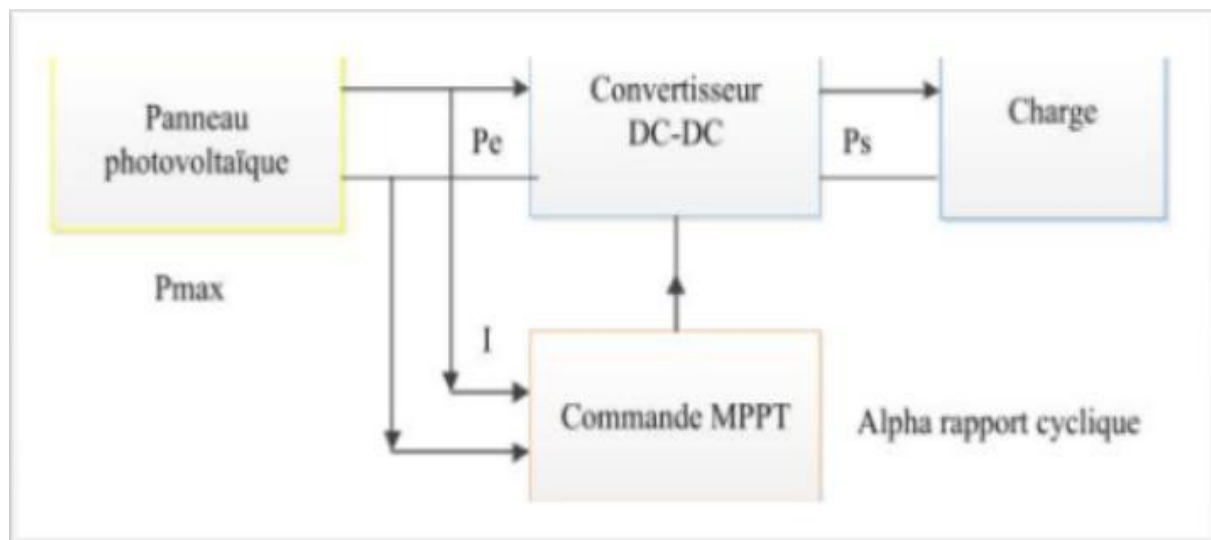


Figure (III.1) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT[25]

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique du hacheur de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (III.2) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM_2 .

Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [24]

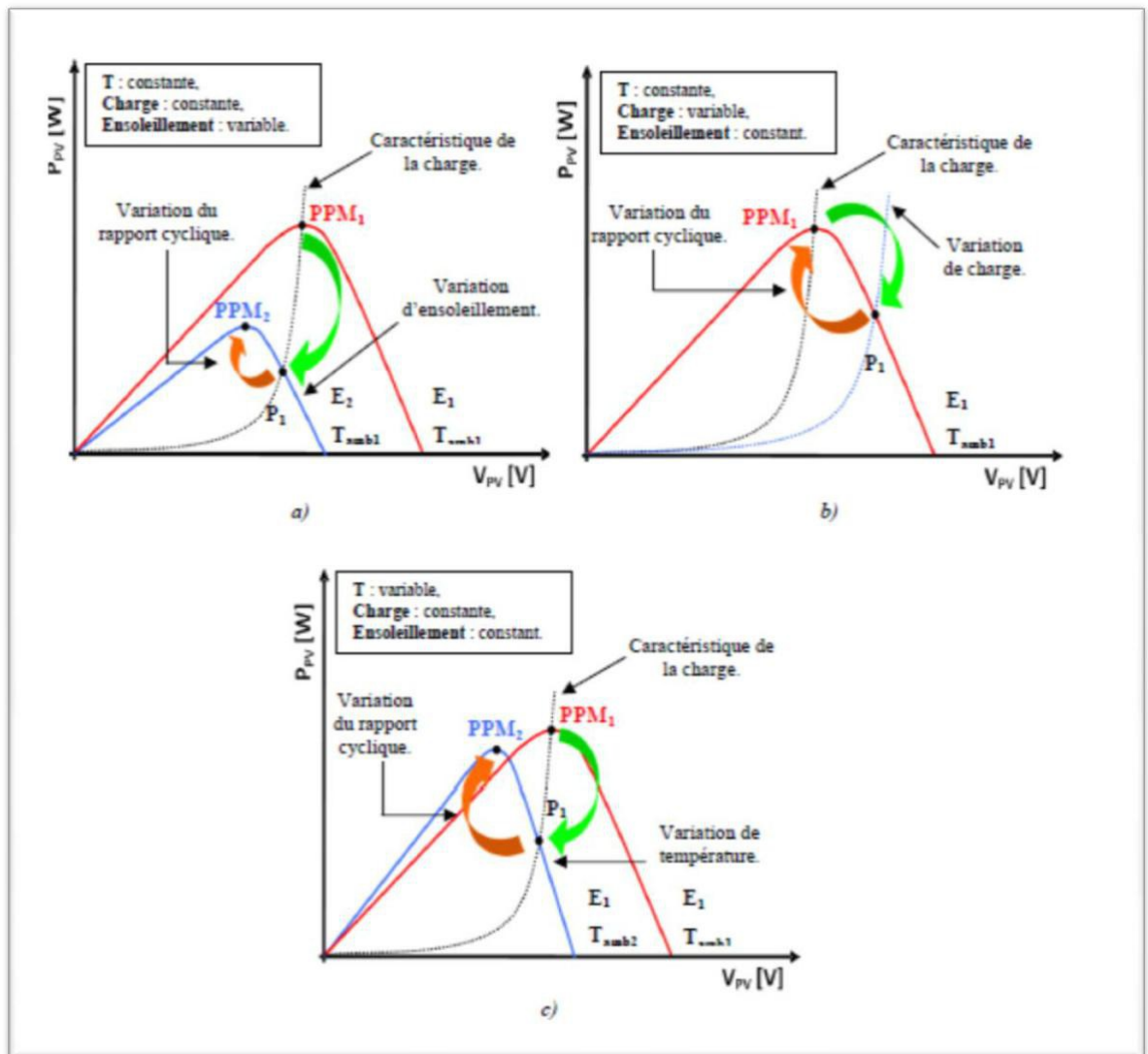


Figure (III.2) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de Température .

III.3 Algorithmes de commande MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (INC).

Dans notre travail on se limite à la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement. Pour une meilleure compréhension de cette commande, nous rappelons brièvement son principe dans le paragraphe suivant.

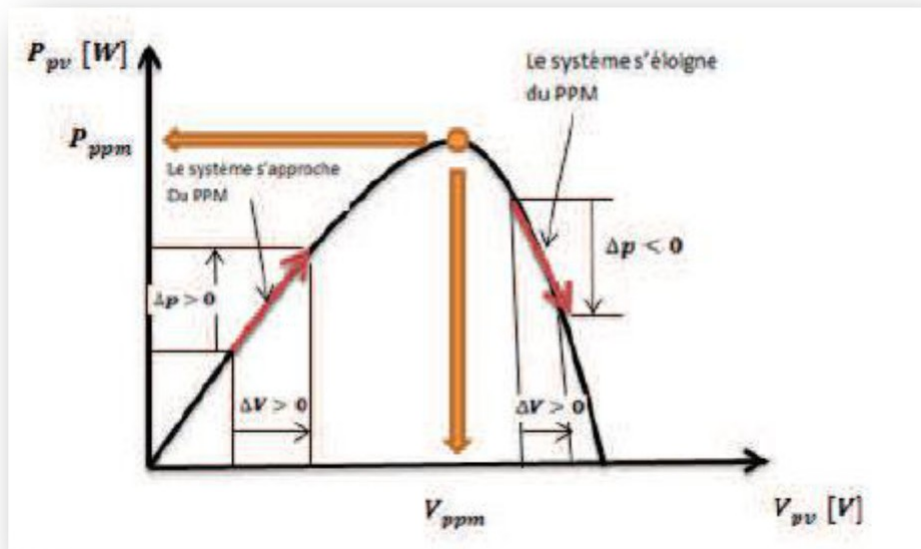
III.3.1 Principe de la commande "Perturbation et Observation" (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure(III.3) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($P > P_0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($P < P_0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante.

Cet algorithme est résumé sur la figure (III.3) et l'organigramme descriptif est donné par la figure(III.4). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [25]



Figure(III.3): Signe de et à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

L'algorithme qui décrit le fonctionnement de la méthode P&O est illustré dans la figure (III.4) suivante :

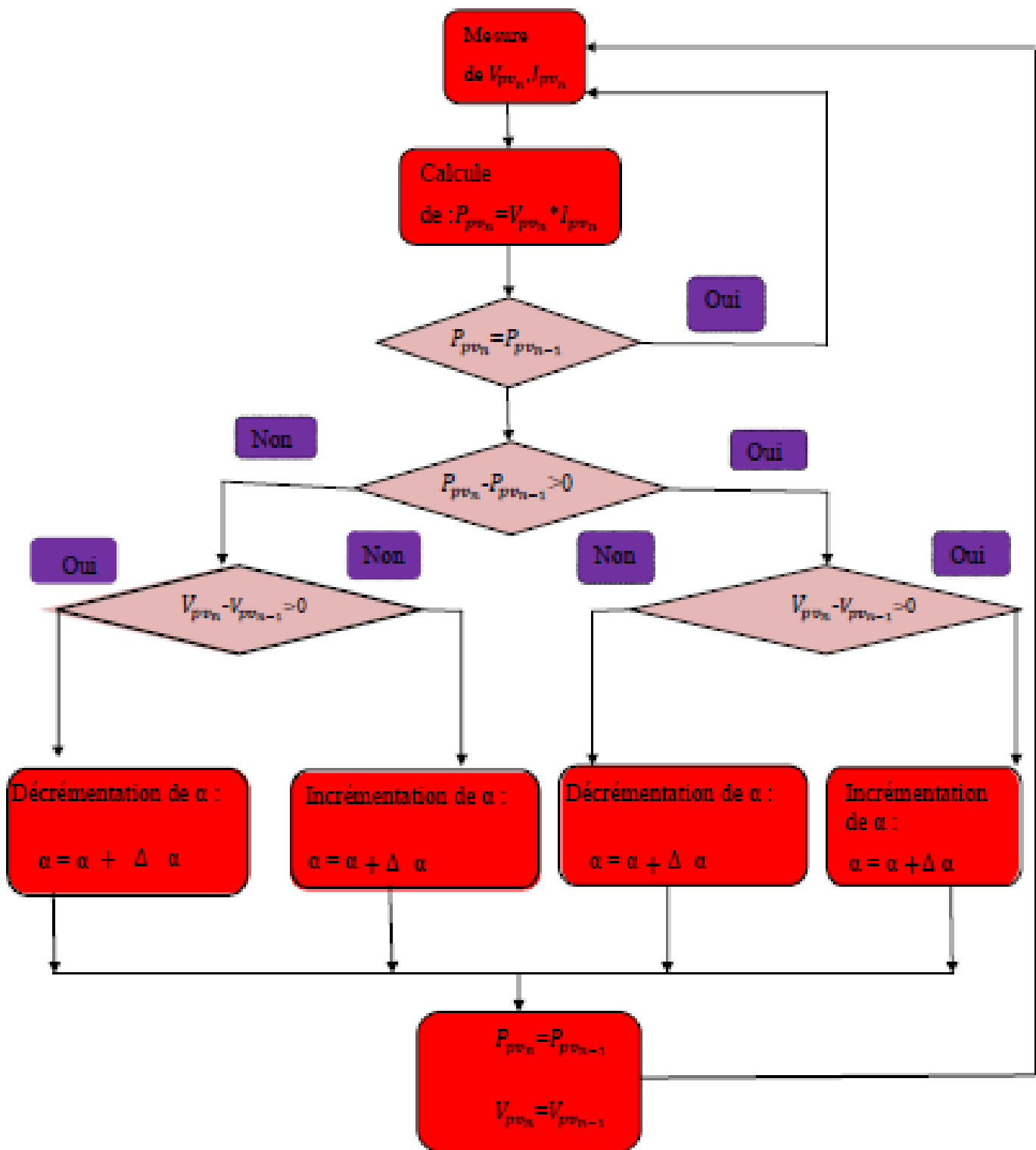


Figure (III .4) : Organigramme de la méthode P&O

III.3.2 Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation P&O

La figure III.5 présente le schéma Matlab/Simulink assurant la commande MPPT du type P&O.

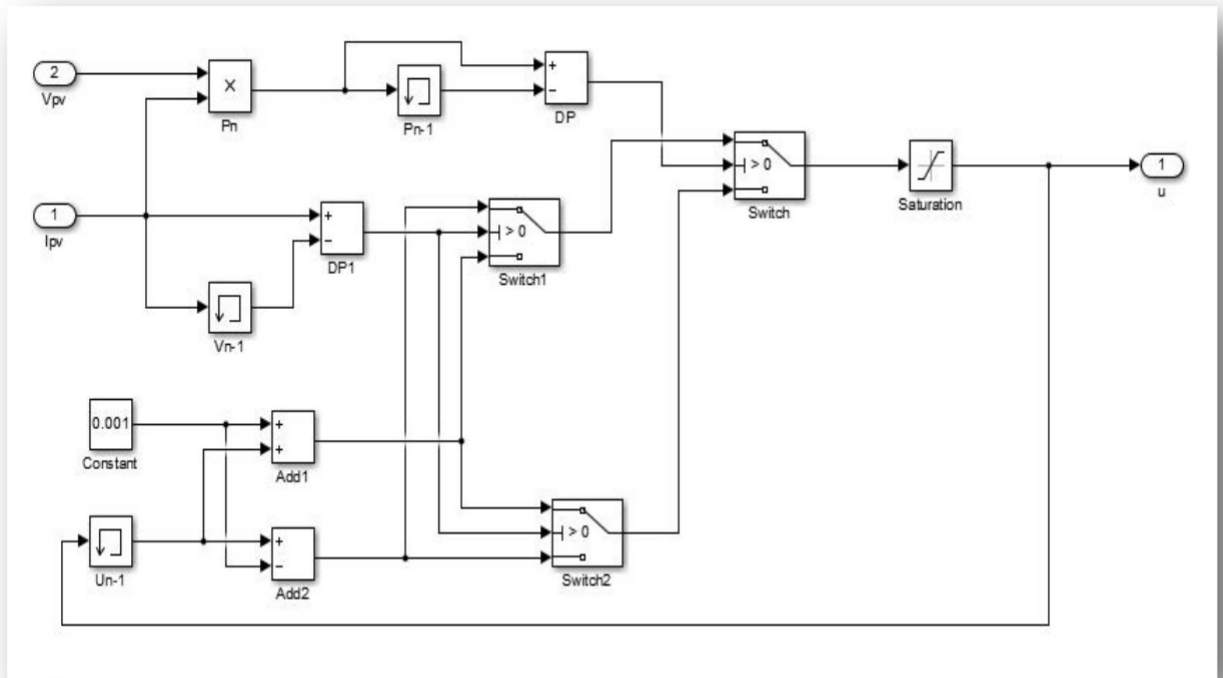


Figure (III.5) : Schéma block de la commande MPPT (P&O)

III.4 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système

Afin de faire fonctionner le système d'une manière parfaitement autonome, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants du système. Il est donc nécessaire d'introduire un système de gestion. Pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part.

A cet effet, le module de supervision sera chargé de gérer l'énergie provenant des panneaux PV et du stockage suivant la demande du consommateur qui est la charge dans notre cas.

Le système de gestion d'énergie, est basé sur deux scenarios :

- alimentation de la charge et du stockage par les panneaux PV si énergie solaire suffisante.
- alimentation de la charge par les panneaux PV et le stockage si énergie solaire insuffisante.

[1] on adopte la convention que lorsque le courant est fourni par les batteries, alors il est négatif et lorsque elle se charge le courant est positif.

Donc nous avons cinq différents modes qui régissent le fonctionnement du système proposé et qui sont :

MODE 1 : Les batteries sont chargées $EDC_{max} \cong 95\%$

Le générateur photovoltaïque est suffisant pour satisfaire la charge $P_{pv} \cong P_{ch}$

MODE 2 : P_{pv} est insuffisante pour alimentais la charge $P_{pv} < P_{ch}$

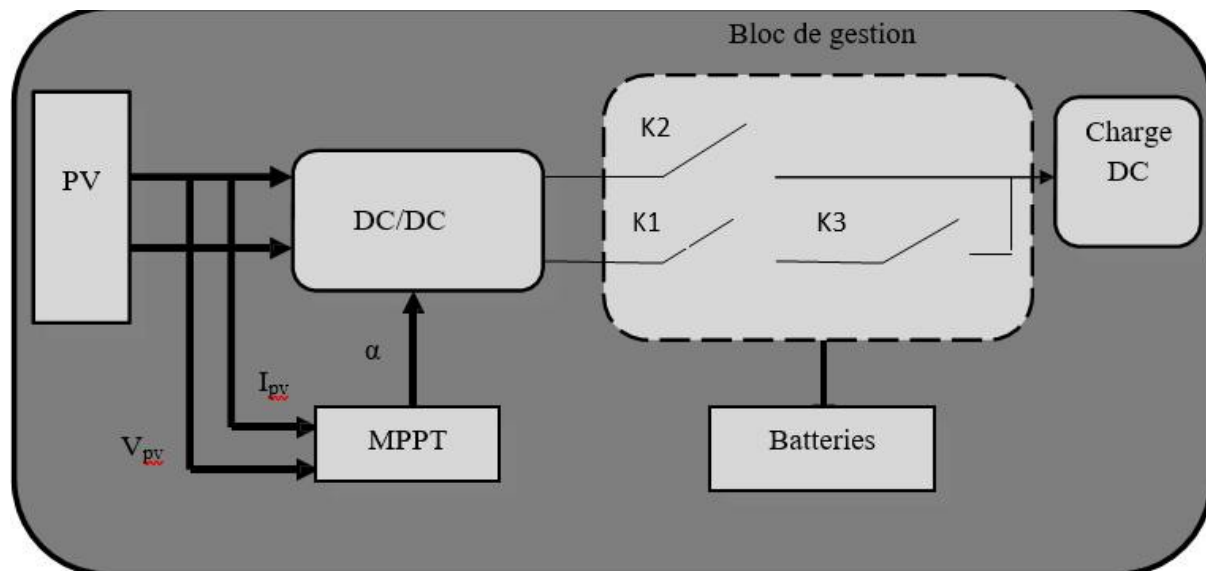
La batterie ajoute sa puissance pour satisfaire la charge $P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$

$EDC_{min} \cong EDC$

MODE 3 : Seul la batterie qui alimente la charge $P_{batt} = P_{ch}$ $EDC \cong EDC_{min}$

MODE 4 : La P_{pv} suffisant pour alimenter la charge $P_{pv} = P_{ch}$

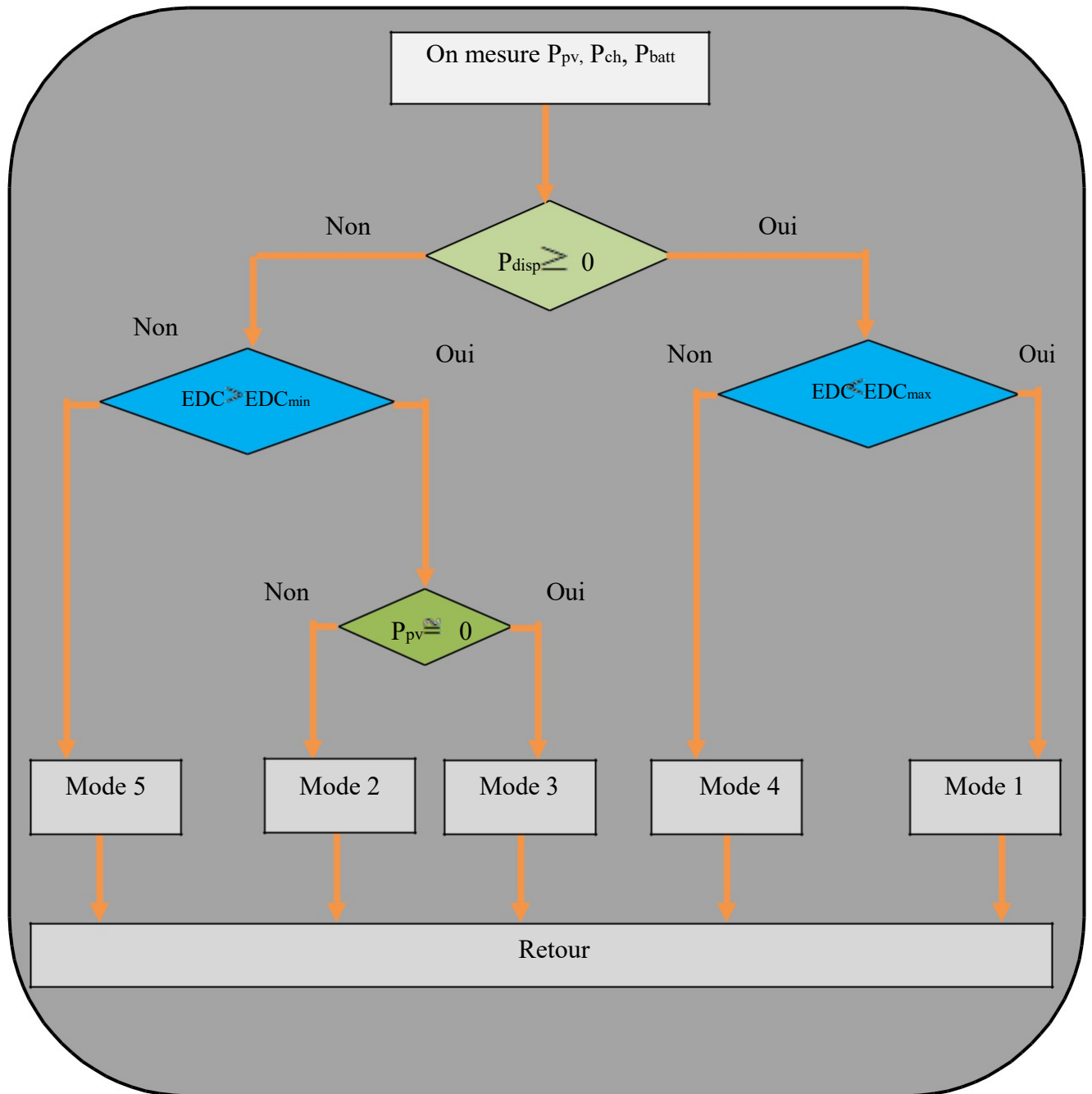
MODE 5 : Les batteries complètement décharger $EDC < EDC_{min}$ Pas de production photovoltaïque $P_{pv} = 0$



Figure(III.6) Schéma de l'installation

Mode	Etas des interrupteurs (0 ou 1)			Courant de charge
	K1	K2	K3	
Mode 1	ON	ON	OFF	$I_{ch} = I_{pv}$
Mode 2	OFF	ON	ON	$I_{ch} = I_{batt} + I_{pv}$
Mode 3	OFF	OFF	ON	$I_{ch} = I_{batt}$
Mode 4	OFF	ON	OFF	$I_{ch} = I_{pv}$
Mode 5	OFF	OFF	OFF	$I_{ch} = 0$

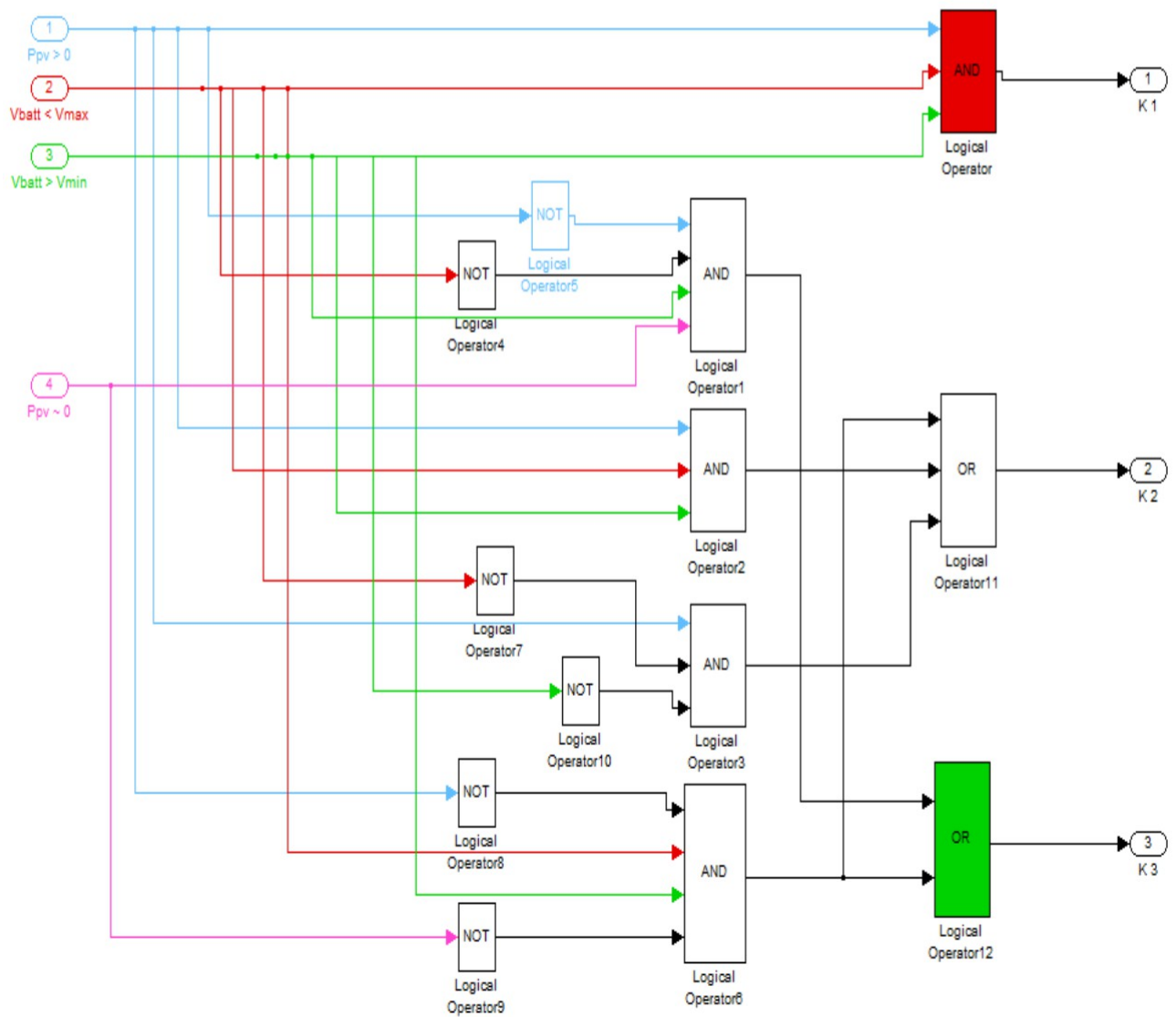
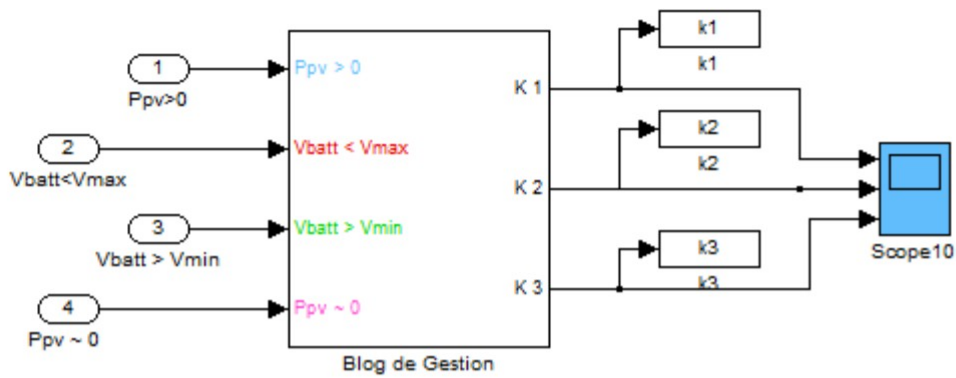
Tableau(III.1) Les différents modes de fonctionnement



Figure(III.7) Diagramme de l'algorithme de gestion proposé.

III.4.1 Bloc de gestion sous Matlab/simulink

En suivant l'organigramme précédent, nous avons réalisé un bloc de gestion en Simulink à partir de celui-ci en utilisant des portes logiques.



Figure(III.8) Bloc de gestion en Simulink

Les figures (III.9), (III.10), (III.11), (III.12) montrent le fonctionnements ouvert (état ON) ou fermé (état Off) des interrupteurs, on peut remarquer que les trois interrupteurs fonctionnent à des modes différents :

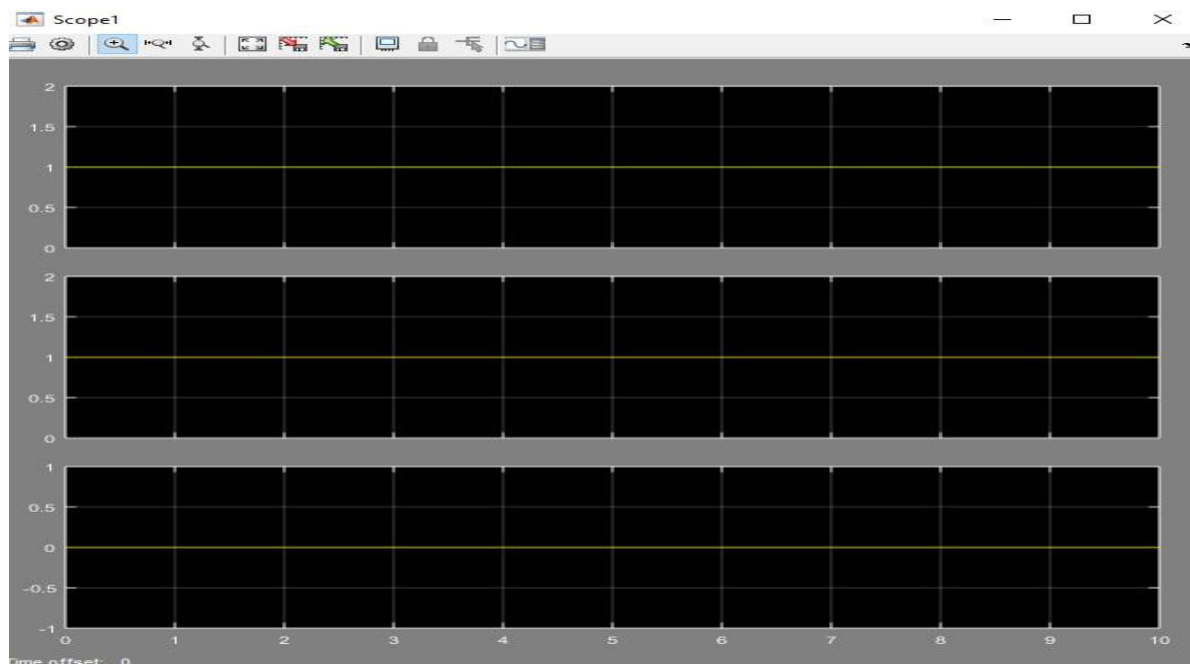


Figure (III.9) Fonctionnement du mode 1.

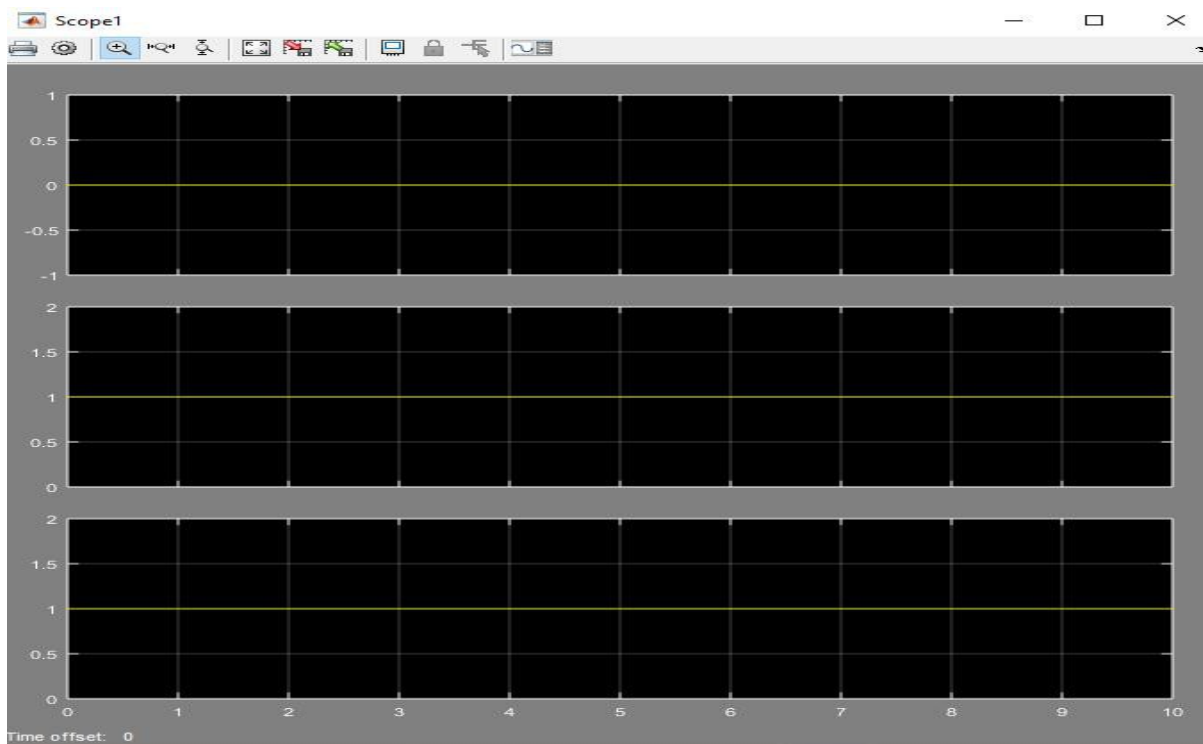


Figure (III.10) Fonctionnement du mode 2

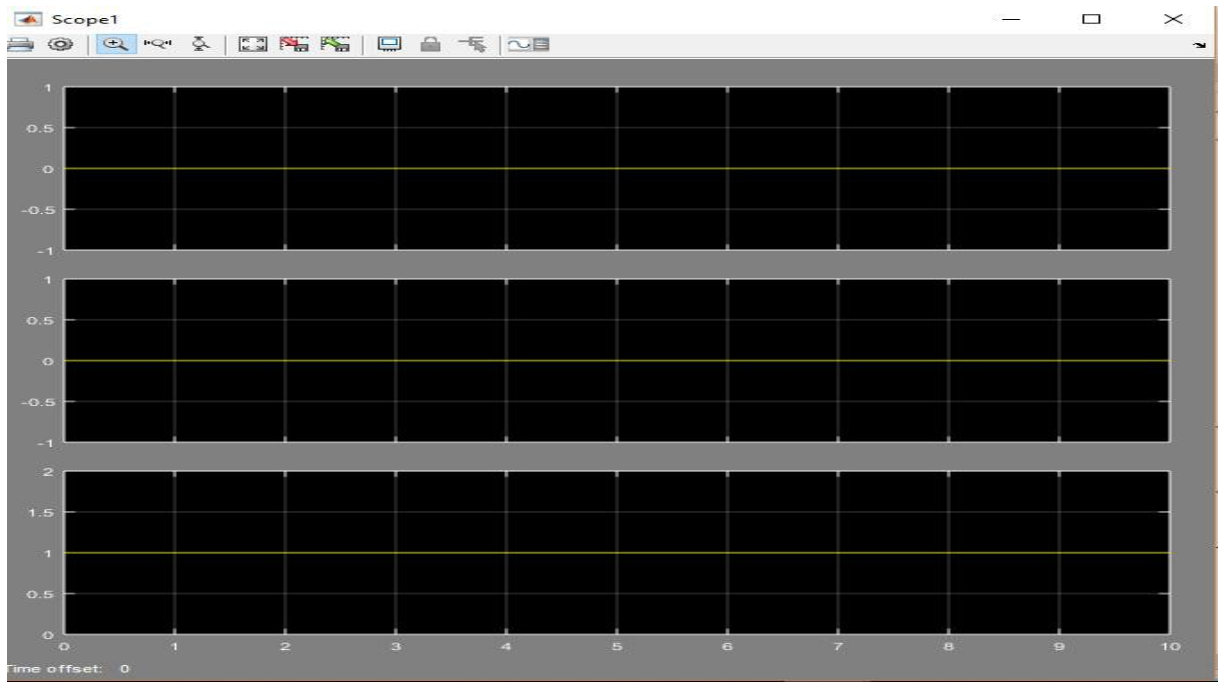


Figure (III.11) Fonctionnement du mode 3.

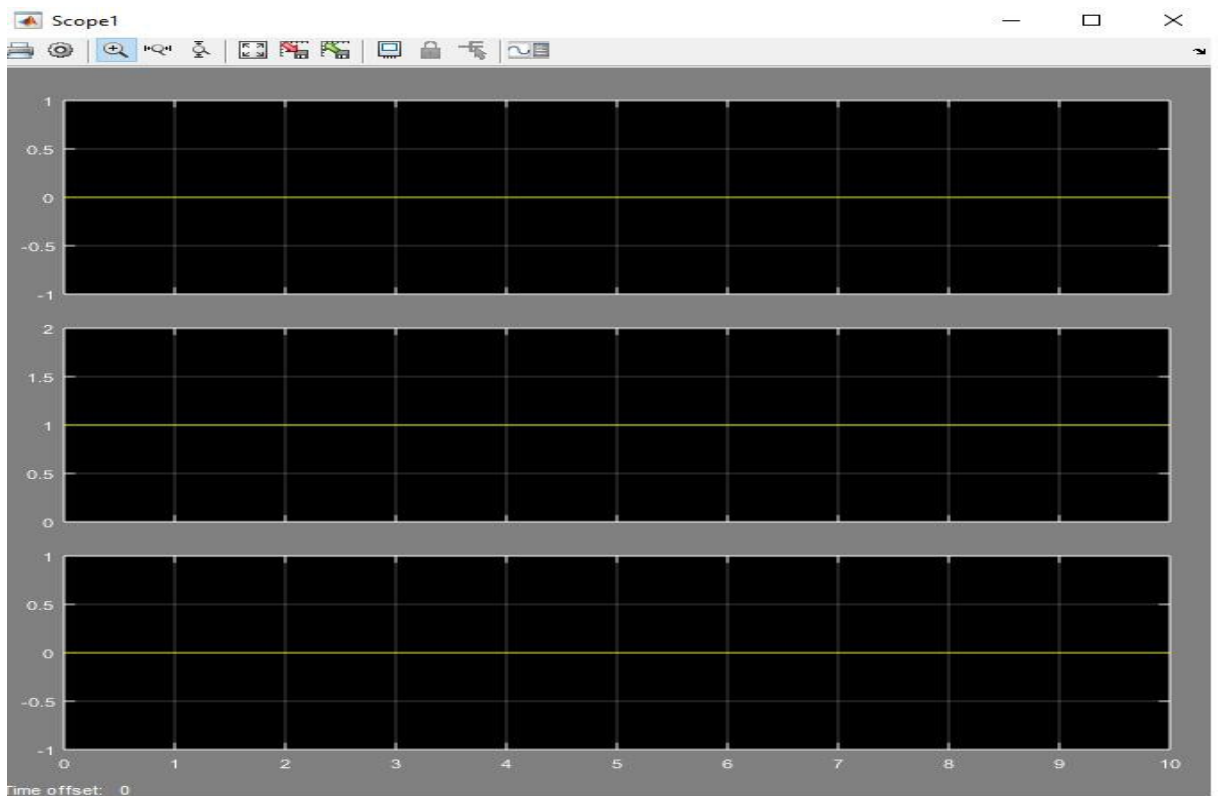


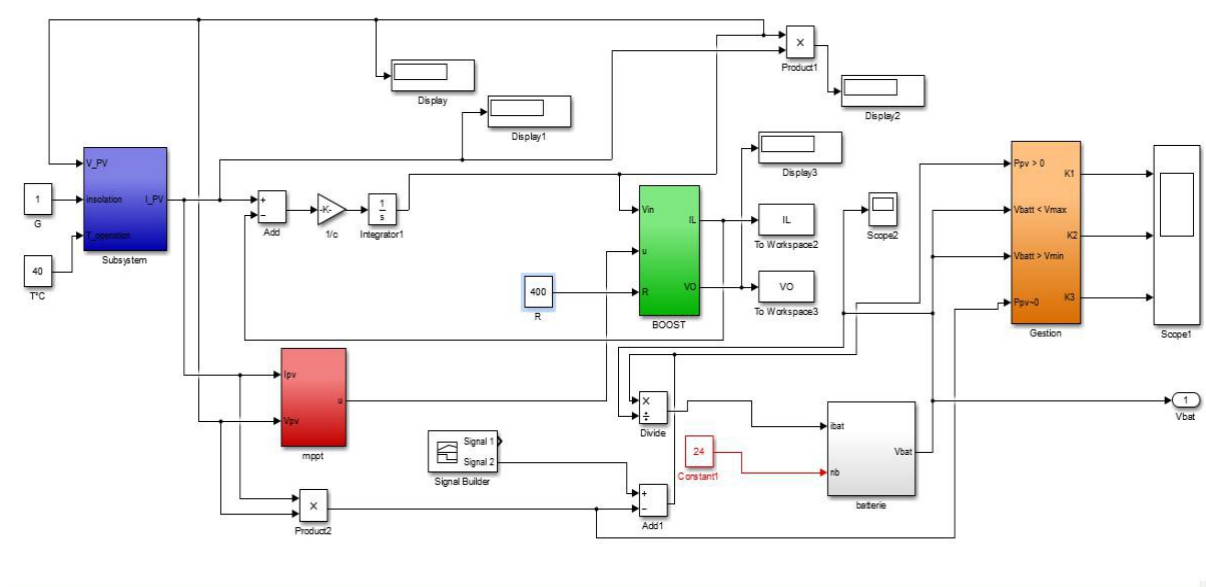
Figure (III.12) Fonctionnement du mode 4

III.5. Simulation du système global

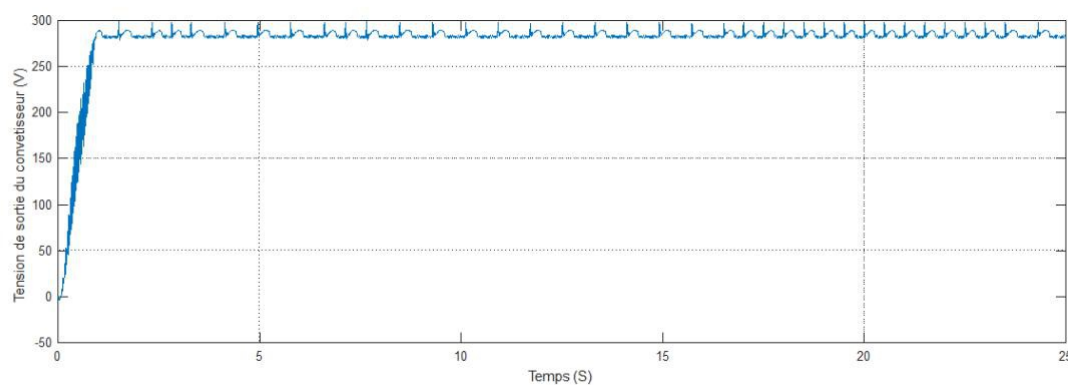
Pour une évaluation des performances de notre système photovoltaïque, nous allons simuler le fonctionnement de l'ensemble (panneau-hacheur-charge et MPPT) avec une 25c° de la température du milieu, pour un éclairage constant.

La charge utilisée sur le côté (DC) est une résistance idéal ($R=400\Omega$)

La figure (III.12) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation », et notre système de gestion.

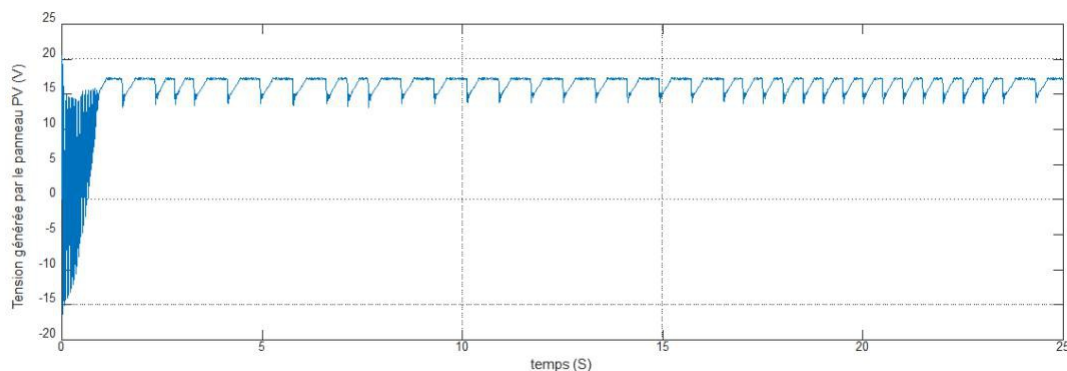


Figure(III.13) :Schéma Matalb/Simulink du système global.



Figure(III.14) :Tension de sortie du convertisseur

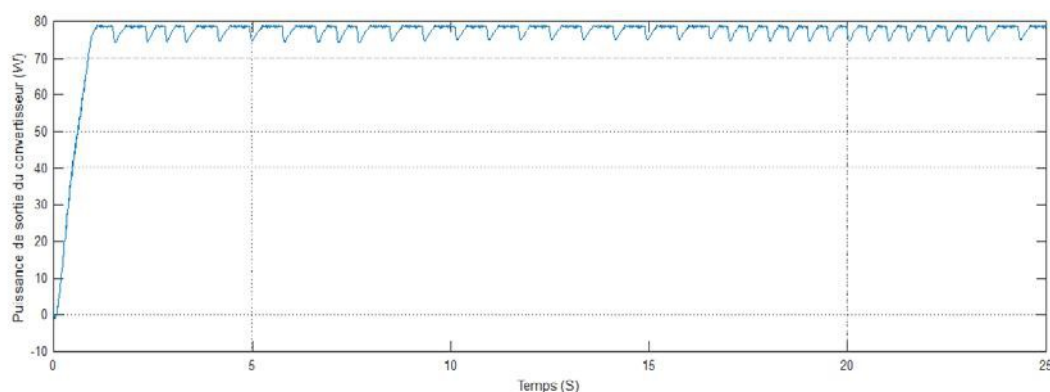
Chapitre III Optimisation de la gestion d'énergie dans un Système Photovoltaïque avec Stockage



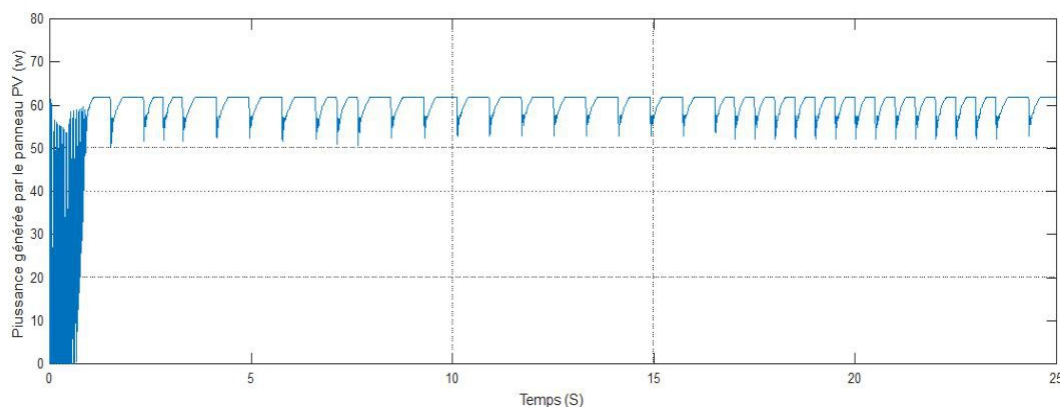
Figure(III.15) : Tension de sortie du Panneau pv

Les figure(III.14) , (III.15) présente l'évolution de la tension sortie du convertisseur et la tension générée par le panneau PV pour un éclairement et température fixe. On note la présence d'oscillations au niveau de la tension source et la tension de la charge.

Les figure(III.16) , (III.17) représente la puissance de sortie du convertisseur et la puissance générée par le panneau PV. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance entre la source et la charge et présence d'oscillation due à la source.



Figure(III.16) :Puissance de sortie du convertisseur

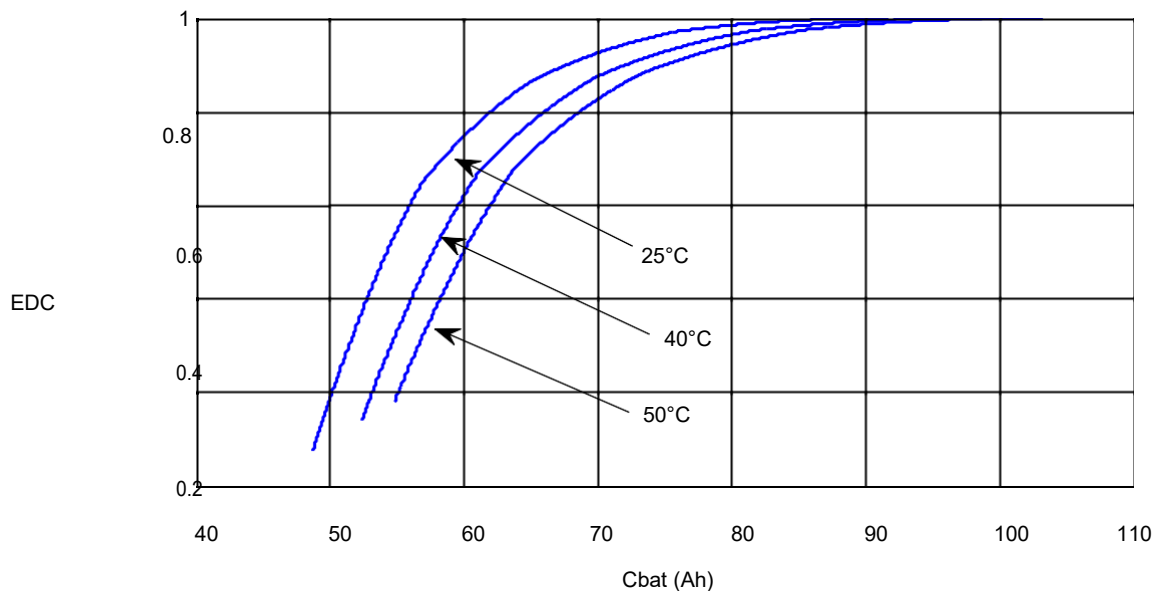


Figure(III.17) Puissance de sortie du Panneau PV

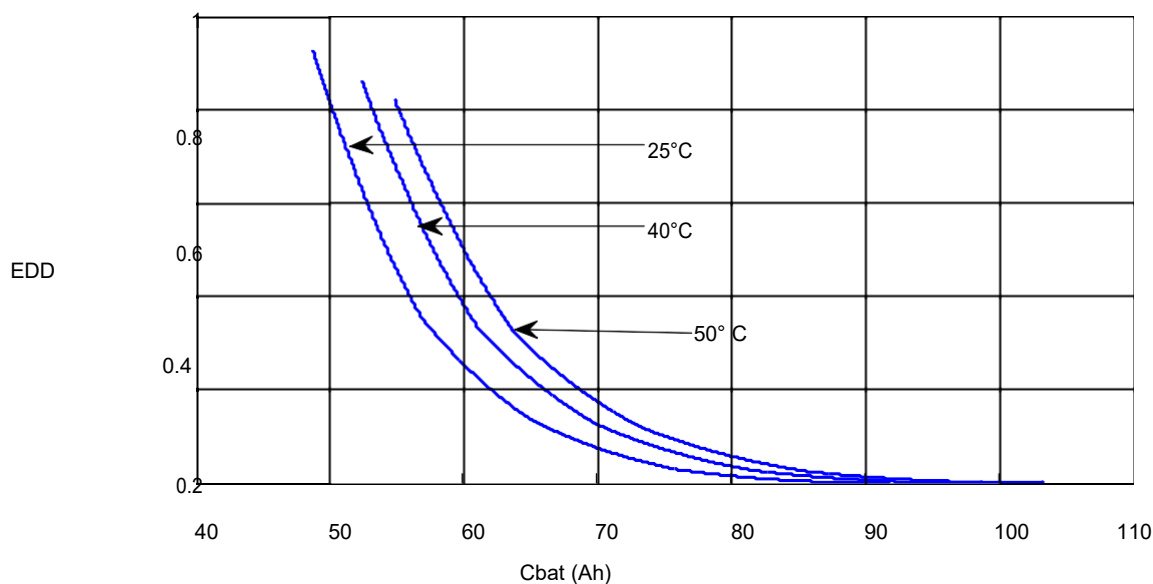
Pour une variation de la valeur de La charge utilisée sur le côté (DC) est une résistance idéale

($R=10\Omega$ jusqu'à $R=400\Omega$) en remarque que la puissance de sortie de système PV est a même plage, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte la puissance générée par le panneau PV à la charge, ce qui assure un transfert d'énergie à puissance maximale.

[3] Sur l'état charge et décharge de la batterie avec une variation de la température du milieu



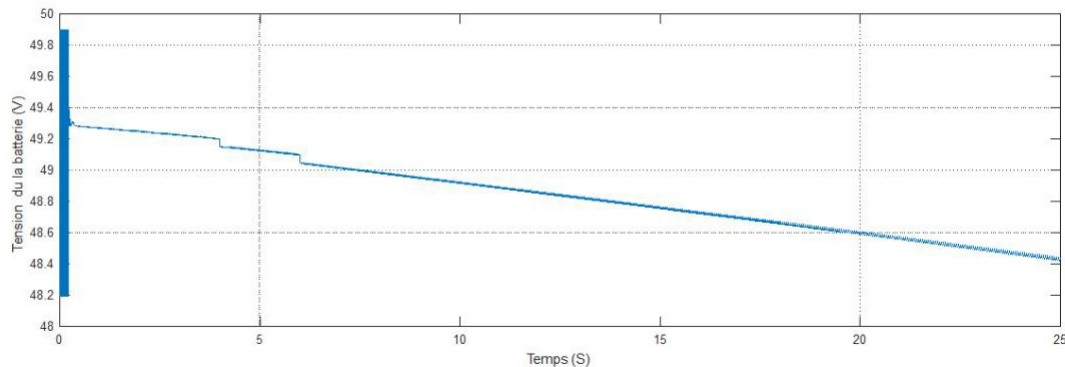
Figure(III.18) : Variation l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures.



Figure(III.19) : Influence de la température sur l'état de décharge.

Nous donnons dans la figure (III.18) la variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie, pour différentes températures, tel que pour une température de 25°C l'état de charge commence presque 0 alors que pour une température de 50°C l'état de charge commence de 0.2.

La figure(III.19) montre l'évolution de la capacité de la batterie en fonction du courant pour différentes températures. On remarque qu'une diminution de la température est accompagnée d'une diminution de la capacité.



Figure(III.20) : Tension aux bornes de la batterie.

La figure (III.20), représente la tension aux bornes de la batterie et L'influence de la température sur la tension est claire.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque menu de la commande MPPT « perturbation et observation » avec stockage sont représenté par les figures précédentes.

Ces résultats montrent que l'hacheur élévateur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles à travers l'évolution des grandeurs tensions et puissance.

L'hacheur élévateur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le panneau PV à la charge donc le transfert de la puissance maximale fournie par le panneau PV.

La batterie ajoute leur puissance pour compléter le manque de puissance de générateur photovoltaïque. Quand le générateur PV n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge.

Le module supervision a pour rôle de réguler le processus de charge/décharge de La batterie (système stockage).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation du système étudié. Nous avons utilisé une méthode MPPT pour extraire le maximum de puissance et d'énergie. Globalement la simulation nous a permis d'évaluer le comportement général de l'ensemble des composants.

L'utilisation d'un système de gestion permet de faire fonctionner le système dans les meilleurs délais, avec la stratégie de contrôle qui a été établie, il détermine la puissance disponible par le générateur photovoltaïque et la puissance de charge demandée. Quand le générateur photovoltaïque n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge, les batteries ajoutent leurs puissances pour compléter le manque de puissance du générateur photovoltaïque.

Conclusion générale :

Dans notre travail présenté dans ce mémoire nous avons étudié l'amélioration de la gestion d'un système photovoltaïque avec stockage.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques en général. Leur principe de fonctionnement et les différentes cellules qui constituent le module photovoltaïque, et les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie. Ainsi que les les systèmes de stockage, et Les différents types de Batteries les plus utilisées

Dans le deuxième chapitre on a présenté le modèle du générateur photovoltaïque (le modèle a une diode). La modélisation et simulation des différents composants du système photovoltaïque (le hacheur boost (DC/DC), la batterie) a été présentée.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbe et observe, cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant [4] la puissance maximale. Et on a montré l'importance d'un système de stockage et l'efficacité d'un algorithme de gestion dans ce type d'installation. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – charge – batterie pour une variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

Bibliographie

[1] Akassewa Tchapo SINGO, « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome », Université Henri Poincaré, Thèse De Doctorat Soutenue Le 3/02/2010.

A. Singo. <<Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome >>. Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.

[2] L. Abbassen. «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire De Magister, Université de Mouloud Mammeri Tizi Ouazou,Soutenue 2011.

[4] D. Bellala. « Contribution A L'optimisation Des Systèmes De Conversion D'énergie Application Aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université De Batna, 2006

[5] A. Cid Pastor, << Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electrique >> . Thèse De Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées, Toulouse, 2006

[6] A. Labouret, M. Viloz. <<Energie solaire photovoltaïque>>. 3rd Edition DUNOD 2006, Pp 5-75-87.

[7] [Http://Www.Iufmrese.Cict.Fr/Catalogur/2006/Toulouse/PV/A_](http://Www.Iufmrese.Cict.Fr/Catalogur/2006/Toulouse/PV/A_)

[8] MEZIANI Zahra. <<Modélisation de modules photovoltaïques >> . Mémoire de magister, Université de Batna 2012.

[9] [Http://213-Info.Com/Des-Chercheurs-Algeriens-Developpent-Une-Nouvelle-Technique-De-Production-De-Silicium/.](http://213-Info.Com/Des-Chercheurs-Algeriens-Developpent-Une-Nouvelle-Technique-De-Production-De-Silicium/)

[10] L. Abbasen.<< Etude De La Connexion Au Réseau Electrique D'une Centrale Photovoltaïque >>. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Mémoire De Magistère Soutenus 05/05/2011.

- [11] F. Jackson. <<Planning and installing photovoltaic systems green dragon energy>>. A Guide For Installers, Architects And Engineers Second Edition Berlin October.2007
- [12] <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/avantage-inconvenient.html>.
- [13] A.Belhoucine et S.Zaidi. <<Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome>>. Mémoire de master II. Université de Bejaia 2012
- [14] http://www.wikipedia.org/wiki/machine_électrique
- [15] L.Debou et D.Maghribi. <<Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie >> . Mémoire d'ingénieur d'état. Université de bejaia2008
- [16] C.Bernard, C.Serao-Oliveira, B.Laval et C.Vaudouer. <<Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue>> . Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiène, 2009.
- [17] https://fr.Wikipedia.org/Wiki/Cellule_Photovolta%C3%Afrrique
- [18] S. Bensmail, « Contribution à la modélisation Et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques ». Mémoire De Magister, Université De A. Mira-Bejaia 2012.
- [19] Corinne Alonso Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [20] N-O Cherchali , A. Morsli , M. S. Boucherit, L.Barazane and A. Tlemcani. <<Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque>>. Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique.
- [21] D. Sera ,R. Teodorescu,T. Kerekes. <<Teaching maximum power point trackers using a photovoltaic array model with graphical user interface>>. Instates of energy technology, Aalborg pontoppidanstreade 101DK-9220,Aalborg, Denmark.
- [22] I.Vechiu. <<Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome>>. Thèse de doctorat de l'université du havre, France,2005.

[23] O. Gergaud, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur »; Thèse Doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan-France, 9 décembre 2002.

[24] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque. », thèse doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier-France, 15 décembre 2008.

[25] S. OuldAmrouche. «Contribution à l'étude du conditionnement de puissance dans les systèmes photovoltaïques>>. Thèse de Doctorat. Université A. Mira-Bejaïa; 27 mai 2012.

[26] S. Lalouni. « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque éolien) de production d'énergie électrique>>, Thèse de doctorat, Université A.Mira-Bejaïa, octobre 2009

[27] C. L. H, J. Wu, M. Zhang, J. M. Yang and J.P. Li. «Application of adaptive algorithm of solar cell battery charger ». Proceeding IEEE International Conference on Electric Utility de regulation Restructuring Power Technologies, pp. 810-813, 2004.

[28] M. Akbaba, I. Qamber et A. Kamal. « Matching of separately excited DC motors to photovoltaic generators for maximum power output», Solar Energy, Vol. 63(6), pp.375-385,1998.

[29] S. Siner, B. Rozen shtein and S. Saurazi, «Charaterisation of PV array output using a small number of measured parameters», Solar Energy, Vol. 32(5), pp. 603-607, 1984.

[30] G.J.Yu «A novel two mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithm», Solar Energy 76 pge 455-463, 2004.

[31] R. Chenni « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.

[32] Bouzid Allah El Moubarak. <<Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme(Etude de l'onduleur triphasé li à cette application)>>,mémoire

d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,2008.

[33] J.Royer,T.Djiako, E.Schiller et B.S.Sy. <<Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens>>, université d'otatawa,1998.

[34] S. Lalouni « optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie », Mémoire de Magister, université de Bejaia 2005.

[35] Anne Labouret-Michel Villoz, «Energie solaire photovoltaïque le manelle professionnelle», édition dunot, Paris2003

