

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique
**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par : RECIOUI Lobna et HACINI Mohammed Ali

Thème

**Gestion et commande d'un système photovoltaïque
connecté avec batterie**

Soutenu le 20 /06 /2021

Devant le jury :

Mr:/ BECHOUAT Mohcene	M.C.A	Univ Ghardaïa	Examineur
Mr:/ BENAOUICHA Karim	M.A.A	Univ Ghardaïa	Examineur
Mr:/ BAHRI Ahmed	M.A.A	Univ Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

*Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé
pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions notre encadreur Ahmed Behri pour les effets
et le temps qu'il nous a consacré, il nous a beaucoup aidés
par ses conseils, son expérience et ses encouragements, nous
lui sommes très reconnaissants.*

*Notre reconnaissance va également à nos enseignants pour
leur honorable tâche durant notre période d'études.*

*Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour
accomplir ce travail.*

Dédicace

A mes chers parents préférés dans cet univers, pour l'amour et l'affection qu'ils m'ont offert, pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués, grand merci.

A ma grand sœur Nadjat merci beaucoup Elle m'a soutenu dans tout.

A mes frères : Ayoub, Sami, Firass

A toute la famille RECIQUI

A tous les amis ...

A tous ceux qu'on aime ...

Et à tous ceux qui me sont chers.

RECIQUI Lobna

Dédicace

Je dédie ce mémoire A mes chers parents ;

Ma mère et mon père pour leur patience, leur amour

Leur soutien et leurs encouragements.

A mes très chères frères et sœurs.

A mes Mes professeurs de l'Université de Ghardaïa, Professeur Behri

Ahmed,

À tous ceux qui m'ont aidé Et si un bon mot

À mes chers amis

A mes amis et mes est collègues

Sans oublier tous les enseignants qui ont

Contribué à mon CURSUS DE FORMATION UNIVERSITAIRE

HACINI Mohammed Ali

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة نظام تسيير مع تخزين البطارية في نظام كهروضوئي المستقل، استنادا على المحول (خافض - رافع) ثنائي الاتجاه لضمان توفر الطاقة بشكل مستمر، وقد تم تطوير نظام تسيير من أجل تحسين عمر نظام من هذا الأخير. يعمل هذا النظام في الاستطاعة القصوى مع استخدام محول تيار مستمر - تيار مستمر (رافع) التي تسيطر عليها تقنية MPPT .

تم تناول جانب المحول (تيار مستمر - تيار متناوب) من قبل تحكم، بعد الدراسة والمحاكاة والنتائج التي تم الحصول عليها يمكننا التحقق من صحة الدراسة النظرية.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي مع بطارية، نظام تسيير وتحكم للطاقة، تقنية MPPT، محول ثنائي الاتجاه (خافض - رافع)، محول (تيار مستمر - تيار متناوب)، محاكاة.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude d'un système de gestion avec stockage de batterie dans le système photovoltaïque autonome, se basant sur un convertisseur (dévolteur – survolteur) bidirectionnel pour assurant la disponibilité d'énergie de façon continue, un système de gestion a été développée afin d'optimiser la durée de vie de système de ce dernier. Ce système fonctionne à une puissance maximale avec l'utilisation d'un convertisseur DC-DC (survolteur) commandé par technique MPPT.

Le coté d'un convertisseur (DC-AC) a été abordé par une commande, après l'étude et la simulation et les résultats obtenue on put valider l'étude théorique.

Mots clés : système photovoltaïque avec batterie, système de gestion et commande d'énergie, technique MPPT, convertisseur bidirectionnel (dévolteur - survolteur), Convertisseur (DC-AC), simulation.

Abstract

The objective of this work is the study of a management system with battery storage in the autonomous photovoltaic system, based on a bidirectional (Buck-boost) converter to ensure the availability of energy continuously, a management system has been developed in order to optimize the system life of the latter. This system works at optimal power with the use of a DC-DC converter (boost) controlled by MPPT technique.

The side of a converter (DC-AC) was addressed by a command, after the study and simulation and the results obtained we could validate the theoretical study.

Keywords : photovoltaic system with battery, energy management and control system, MPPT technique, bidirectional converter (Buck-boost), Converter (DC-AC), simulation.

Liste des figures		
Figure	Titre	Page
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈM HYBRIDE AUTONOME		
Fig.I.1	Schéma simplifié d'un système PV	3
Fig.I.2	Systèmes photovoltaïque autonome	4
Fig.I.3	Système photovoltaïque raccordé au réseau	5
Fig.I.4	Système photovoltaïque hybrid	6
Fig.I.5	Architecture d'un système hybride avec DC bus	7
Fig.I.6	Architecture d'un système hybride avec AC bus	8
Fig.I.7	Architecture d'un système hybride avec DC bus et AC bus	9
Fig.I.8	Description d'une photopile	10
Fig.I.9	Cellules monocristallines	11
Fig.I.10	Cellule poly cristallin	11
Fig.I.11	Cellules amorphes	12
Fig.I.12	Structure d'une cellule photovoltaïque	13
Fig.I.13	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	13
Fig.I.14	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	15
Fig.I.15	Regroupement de ns cellules en série	16
Fig.I.16	Regroupement de Np cellules en parallèle	17
Fig.I.17	Principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique	19
Fig.I.18	Construction d'une batterie monobloc	21
CHAPITRE II : MODÉLISATION DES CONVERTISSEUR DC-DC ET DC-AC		
Fig.II.1	Étage d'adaptation entre un GPV et une charge	25
Fig.II.2	Symbole d'un convertisseur DC-DC	26
Fig.II.3	Forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur	27
Fig.II.4	Circuit typique d'un convertisseur dévolteur	29
Fig.II.5	Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur, état 1 : interrupteur fermé	29
Fig.II.6	Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur, état 2 : interrupteur ouvert	30
Fig.II.7	Circuit typique d'un convertisseur survolteur	31

Fig.II.8	Circuit équivalent d'un convertisseur survolteur, état 1 : interrupteur fermé	32
Fig.II.9	Circuit équivalent d'un convertisseur survolteur, état 2 : interrupteur ouvert	32
Fig.II.10	Circuit typique d'un convertisseur dévolteur-survolteur	33
Fig.II.11	Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur-survolteur, état 1 : interrupteur fermé	34
Fig.II.12	Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur-survolteur, état 2 : interrupteur ouvert	34
Fig.II.13	Symbole d'un convertisseur continu alternatif	35
Fig.II.14	Onduleur MLI triphasé de tension	37
CHAPITRE III : TECHNIQUE DE COMMANDE D'UN SYSTÈME HYBRIDE AUTONOME		
Fig.III.1	Système hybride autonome à base de Panneaux photovoltaïques	39
Fig.III.2	Principe de la commande MPPT	40
Fig.III.3	Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O	41
Fig.III.4	Organigramme de la méthode P&O	43
Fig.III.5	Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond	44
Fig.III.6	Organigramme de la méthode IncCond	46
Fig.III.7	Structure de base de la commande floue	47
Fig.III.8	Principe de méthode de la tension de circuit ouvert	49
Fig.III.9	Divergence de P&O et IncCond classiques lors des changements de L'éclairage	50
Fig.III.10	Organigramme de P&O modifié	51
Fig.III.11	Organigramme d'IncCond modifié	53
Fig.III.12	Convertisseur bidirectionnelle connectée avec batterie	54
Fig.III.13	Modèle de la batterie	55
Fig.III.14	Schéma de la boucle externe de la tension	56
Fig.III.15	Contrôle de Convertisseur DC-DC	57
Fig.III.16	Plage de fonctionnement pour la batterie	58
Fig.III.17	Algorithme de gestion et de contrôle du système hybride	59
CHAPITRE IV : SIMULATION ET RÉSULTAT		
Fig.IV.1	Systèmes PV connectés avec batterie	61

Fig.I.V.2	Schéma bloc sous Simulink du système global	62
Fig.IV.3	Modèle de simulation du G_{pv}	62
Fig.IV.4	Caractéristique (V-I) et (P-V) du Panneaux PV	63
Fig.IV.5	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	64
Fig.IV.6	L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	64
Fig.IV.7	Modèle de simulation l'hacheur Boost	65
Fig.IV.8	Schéma de block de la commande MPPT	66
Fig.IV.9	Schéma de block de batterie avec convertisseur Bidirectionnelle	66
Fig.IV.10	Schéma de block de commande d'un convertisseur Bidirectionnelle	67
Fig.IV.11	Schéma de block DC/AC	67
Fig.IV.12	La variation de l'éclairement	68
Fig.IV.13	Courbe de courant I_{pv} de G_{pv}	68
Fig.IV.14	Courbe de Tension V_{pv} de G_{pv}	69
Fig.IV.15	Courbe de Puissance P_{pv} de G_{pv}	69
Fig.IV.16	Courbe de Tension de sortie du Boost V_{dc}	70
Fig.IV.17	Signal d'une commande MPPT	70
Fig.IV.18	Courbe de Tension de bus continue	71
Fig.IV.19	Courbe de Courant I_b	72
Fig.IV.20	Courbe de Tension V_b	72
Fig.IV.21	Courbe de Puissance P_b	73
Fig.IV.22	Courbe de Etat de charge d'une batterie	73
Fig.IV.23	Signale d'Interrupteur S_1	74
Fig.IV.24	Signale d'Interrupteur S_2	75
Fig.IV.25	Courbe des Variation des Puissances (Charge/Décharge)	75
Fig.IV.26	Signale de commande de convertisseur DC-AC	77
Fig.IV.27	Courbe des courant de ligne d'onduleur	77
Fig.IV.28	Courbe des tensions de ligne d'onduleur	78

Liste des tableaux		
Tableau	Titre	Page
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈM HYBRIDE AUTONOM		
Tab.I.1	Caractéristique D'un élément accumulateur Plomb – acide	20
Tab.I.2	Caractéristique D'un élément accumulateur Ni – Cd	22
Tab.I.3	Caractéristique D'un élément accumulateur Ni-Mh	23
Tab.I.4	Caractéristique D'un élément accumulateur lithium (Li-ion)	24
CHAPITRE III : TECHNIQUE DE COMMANDE D'UN SYSTÈME HYBRIDE AUTONOME		
Tab.III.1	Principe de l'algorithme P&O	42
Tab.III.2	Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue	48
Tab.III.3	Différent mode de fonctionnement	58
CHAPITRE IV : SIMULATION ET RÉSULTAT		
Tab.IV.1	Caractéristique électrique du panneau solaire	63

Liste des Symboles

Symboles	Nomination	Unité
T	Température	(C°)
E	Eclairement solaire	(W/m ²)
V	Tension	(V)
V _{pv}	Tension photovoltaïque	(V)
V _{mpp}	Tension de circuit ouvert	(V)
V _b	Tension de batterie	(V)
V _{dc}	Tension de bus continue	(V)
I	Courant	(A)
I _{cc}	Courant de court-circuit	(A)
I _{mpp}	Courant de circuit ouvert	(A)
I _b	Courant de batterie	(A)
I _d	Courant diode	(A)
P _{pv}	Puissance photovoltaïque	(W)
P _b	Puissance de Batterie	(W)
P _{ch}	Puissance de charge	(W)
P _{mpp}	Puissance au point de puissance maximale	(W)
α	Rapport cyclique	
L	Inductance	(H)
C	Condensateur	(F)
f _p	Fréquence de la porteuse	

Liste des abréviations	
Abréviations	Nomination
G _{pv}	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum power point tracking
CS	Convertisseur statique
DC	Courant continu
DC/DC	Continue / Continue
AC	Courant alternatif
DC/AC	Continue/alternatif
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor
PI	Proportionnel-Intégrale
MLI	Modulation de la Largeur d'Impulsion
SOC	State Of Charge
SOC _{max}	Etat de charge maximale des batteries
SOC _{min}	Etat de charge minimale des batteries

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicace	II
المخلص	IV
Résumé	IV
Abstract	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Liste des Symboles	X
Liste des abréviations	XI
SOMMAIRE	XII
INTRODUCTION GENERALE	1
<u>CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈM HYBRIDE AUTONOME</u>	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités sur le système photovoltaïque	3
I.2.1. Les systèmes photovoltaïques	4
1. système autonome	4
3. système hybride	5
1. Topologies du système hybride	6
1.1. Le Couplage DC	6
1.2. Le Couplage AC	7
1.3. Le couplage mixte DC/AC	8
I.2.2. L'effet photovoltaïque	9
I.2.3. Cellule photovoltaïque	10
1. différents types des cellules	10
2. Principe d'une cellule photovoltaïque	12

3. Caractéristique électrique d'une cellule	13
2. Caractéristique Courant-Tension	14
I.2.4. Module photovoltaïque.....	15
I.2.4.1 L'association en série des cellules	15
I.2.4.2 L'association en parallèle des cellules	16
I.2.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV	17
1. Avantages.....	17
2. Inconvénients.....	18
1.3. Généralités sur le système de stockage	18
I.3.1. Les Caractéristiques des batteries	18
I.3.2. Principe de fonctionnement des batteries.....	19
I.3.3. Différents types D'accumulateur	20
1. Accumulateur au plomb.....	20
2. Accumulateur Nickel -Cadmium	21
3. Accumulateur Nickel Métal Hydrure.....	22
4. Accumulateur Au lithium	23
I.4 Conclusion	24
<u>CHAPITRE II : MODÉLISATION DES CONVERTISSEUR DC-DC ET DC-AC</u>	
II.1 Introduction	25
II.2 Etage d'adaptation Entre Gpv Et Charge	25
II.2.1 Convertisseurs DC-DC.....	26
II.2.1.1 Convertisseur dévolteur (Buck)	28
II.2.1.2 Convertisseur survolteur (boost).....	30
II.2.1.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-boost).....	32
II.3 Modélisation de convertisseur DC/AC.....	34
II.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	35
II.3.1.1 Onduleur triphasé.....	35

II.3.2 La commande à MLI	35
II.3.2.1 Caractérisation de la modulation	36
II.3.2.2 Modèle de l'onduleur triphasé de tension	36
II.4 Conclusion	38

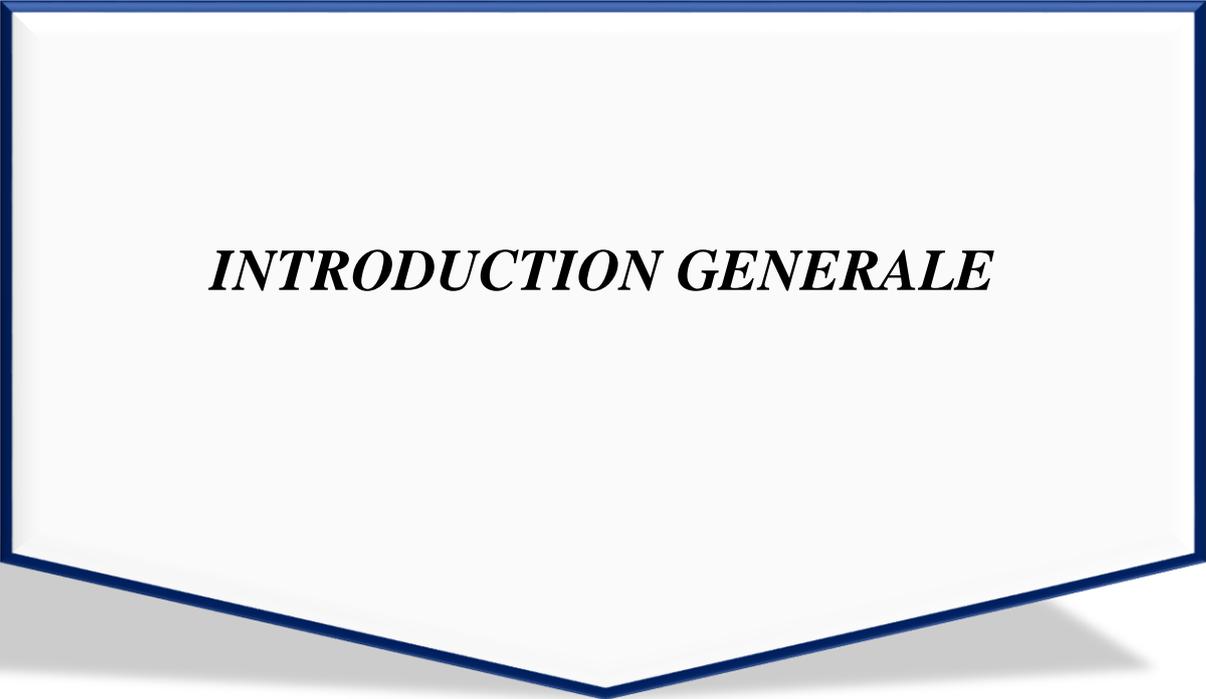
CHAPITRE III : TECHNIQUE DE COMMANDE D'UN SYSTÈME HYBRIDE
AUTONOME

III.1 Introduction	39
III.1.1 Schéma du système à étudier	39
III.2 Méthodes de poursuite de point de puissance maximale MPPT	40
III.2.1 Principe du commande MPPT	40
III.2.2 Les techniques de commande MPPT	41
III.2.2.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O)	41
III.2.2.2 Algorithme d'incrémentement de la conductance	44
III.2.2.3 Commande MPPT par la logique floue	47
III.2.2.4 Méthode de la tension de circuit ouvert	48
III.2.2.5 Méthode du courant de court-circuit	49
III.2.2.6 Commande P&O améliorée	50
III.2.2.7 Commande IncCond améliorée	52
III.3 Stratégies de commande des unités de stockage	54
III.3.1 Contrôle de la tension du bus continu	55
III.3.1.1 Commande de régulateur PI	55
III.3.2 Contrôle de charge et décharge	57
III.3.3 Gestion et contrôle du système hybride autonome	58
III.4 Conclusion	60

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RÉSULTAT

IV.1 Introduction	61
IV.2 Simulation Du Système photovoltaïque Connecté avec Batterie	62

IV.2.1 Simulation D'un Générateur PV	62
IV.2.1.1 Caractéristique D'un Panneaux	63
IV.2.2 Simulation du convertisseur Boost	65
IV.2.3 Simulation du Commande MPPT	65
IV.2.4 Simulation de Batterie Avec Convertisseur Bidirectionnelle	66
IV.2.5 Simulation De Commande Batterie	67
IV.2.6 Simulation De Convertisseur DC/AC	67
IV.2.7 Charge	67
IV.3 Résultats et discussion	68
IV.3.1 Générateur photovoltaïque	68
IV.3.2 Commande MPPT	69
IV.3.2.1 Comparaison entre rapport cyclique et Tension V_{pv}	71
IV.3.3 La Commande Batterie Avec Convertisseur Bidirectionnelle	71
IV.3.4 Convertisseur DC/AC	76
IV.4 Conclusion	79
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	81



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le monde est devenu se tient récemment dépendes sur l'énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, hydraulique) lequel, source importante en la production d'électricité, pour répondre aux besoins de consommateur dans le marché de travail.

Peut la production de l'électricité par un certain système, nous avons une énergie gratuite, grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

Dépende la production de l'énergie photovoltaïque sur des variations des condition climatique (éclairage et température) et des composant et technique pour faciliter d'opération de transformation d'énergie.

Pour préserver la productivité de l'énergie photovoltaïque en jour ou dans la nuit dans système nous utiliser le batterie acide- plomb lequel à grande rôle pour donner la puissance dans la nuit ou absence éclairement solaire, donc nous avons étude dans le cadre de ce travaille, la gestion et commande de système photovoltaïque connectée avec batterie de stockage.

Le travail est présenté en quatre chapitres, le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques et différentes notions de base tel que le système de stockage basée sur les caractéristiques des batteries.

Au deuxième chapitre on étudie quelques types convertisseurs DC-DC et DC -AC vous jouez un rôle important en transformation, nous avons utilisé convertisseur boost pour élever la tension et convertisseur (Buck - boost) pour contrôler des opérations de charge et décharge de batterie par des interrupteur (Fermé - ouvert), et convertisseur DC- AC pour transformer la tension et le courant de continue à alternative par besoin de charge

Dans le chapitre trois nous avons présenté Méthodes de poursuite de point de puissance maximale MPPT qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de panneaux photovoltaïques vers la charge, et des commandes en unité de stockage : les commandes de tension de bus continue et régulateur PI et commande de charge et décharge de batterie.

Le dernier chapitre on étudie une simulation à l'aide de MATLAB Simulink de la commande MPPT (P&O), et commande de batterie avec convertisseur bidirectionnelle, et onduleur.

Et on termine par une conclusion générale qui résume notre travail.

***CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES
SYSTÈM HYBRIDE AUTONOME***

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque (PV) est une technologie solaire qui utilise des cellules solaires pour convertir l'énergie du soleil en électricité. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

Le système photovoltaïque hybride autonome a connu un succès dans le monde, vu sa capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Les deux systèmes qui nous intéressent regroupent il est muni d'un élément de stockage 'batteries d'accumulateurs', pour subvenir aux besoins énergétiques.

Dans ce chapitre nous avons concentrer deux systèmes principaux et présente les bases indispensables à la compréhension du sujet :

- Système photovoltaïque
- Système de stockage

I.2. Généralités sur le système photovoltaïque

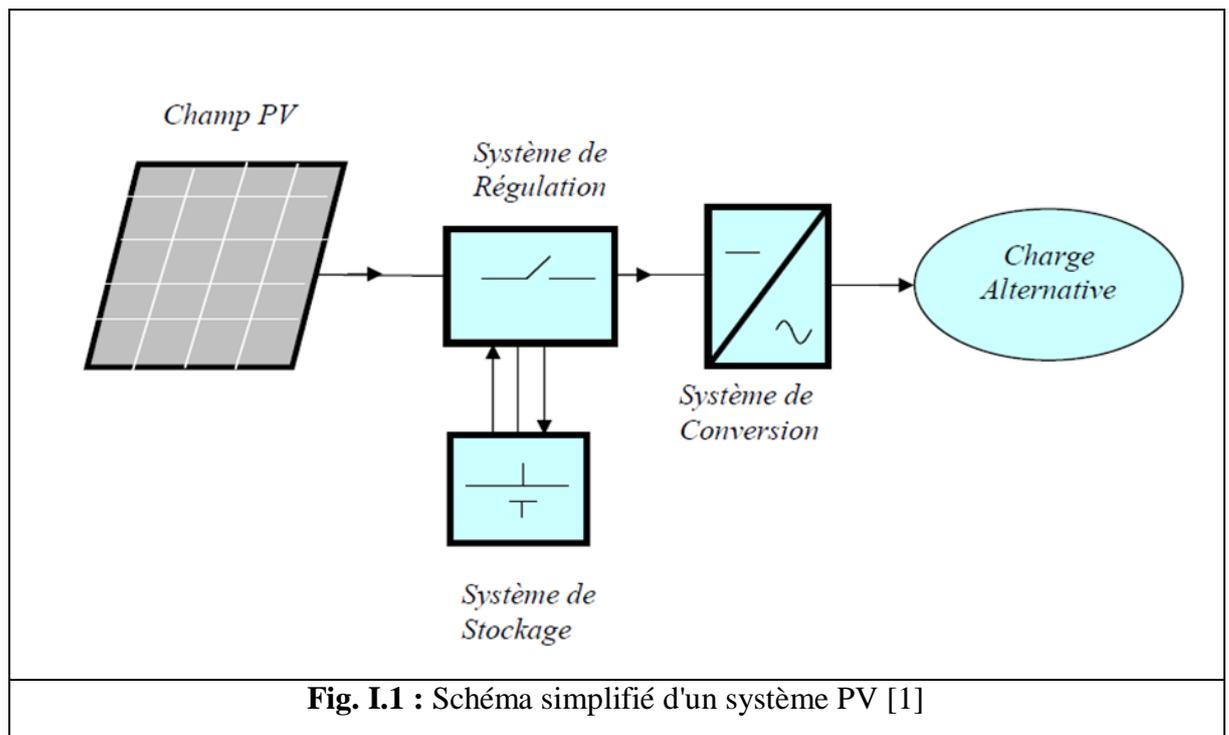


Fig. I.1 : Schéma simplifié d'un système PV [1]

I.2.1. Les systèmes photovoltaïques

On distingue trois systèmes photovoltaïques : autonome, connecté au réseau et hybride :

1. système autonome

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau.

En mode autonome, le système est constitué généralement des éléments suivants :

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement ;
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique ;
- Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par le champ de modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie ;
- Un convertisseur de charge permet l'utilisation d'appareil à courant continu ou à courant alternatif [2].

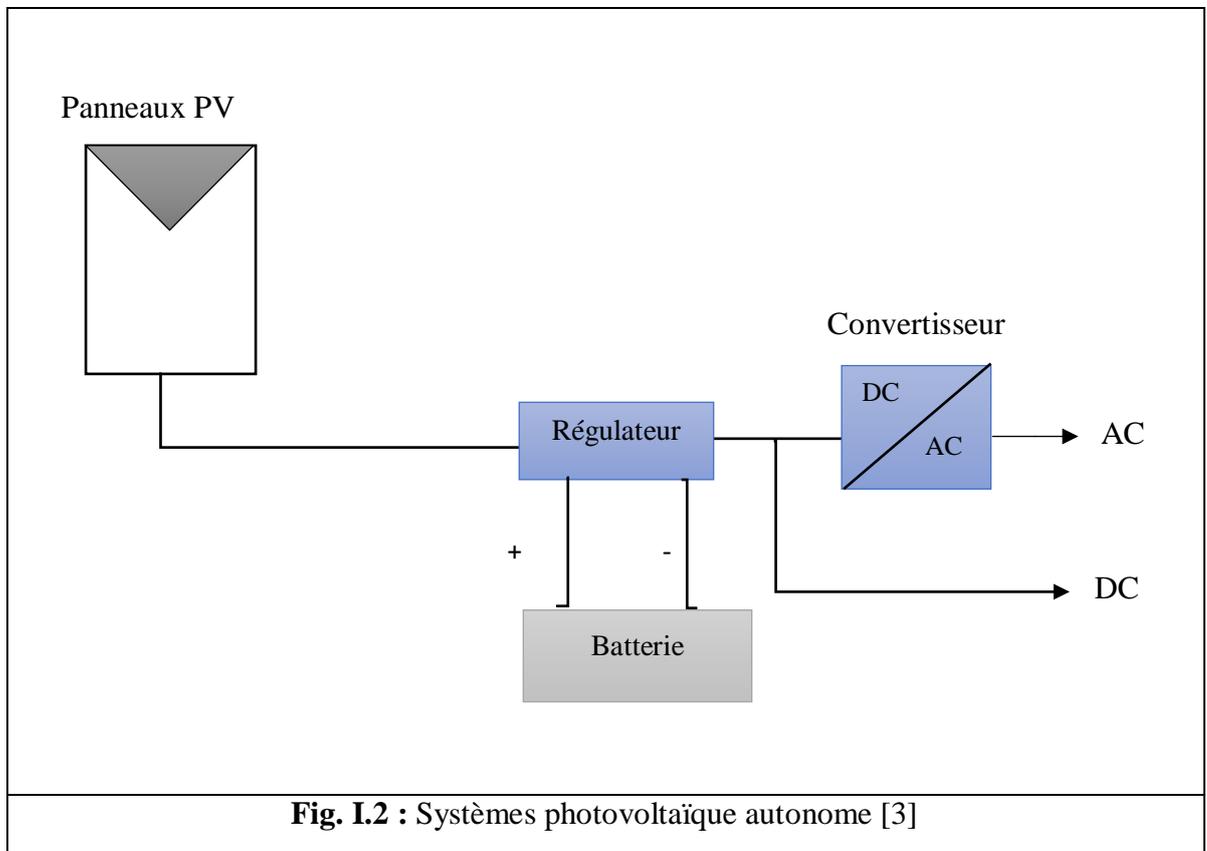
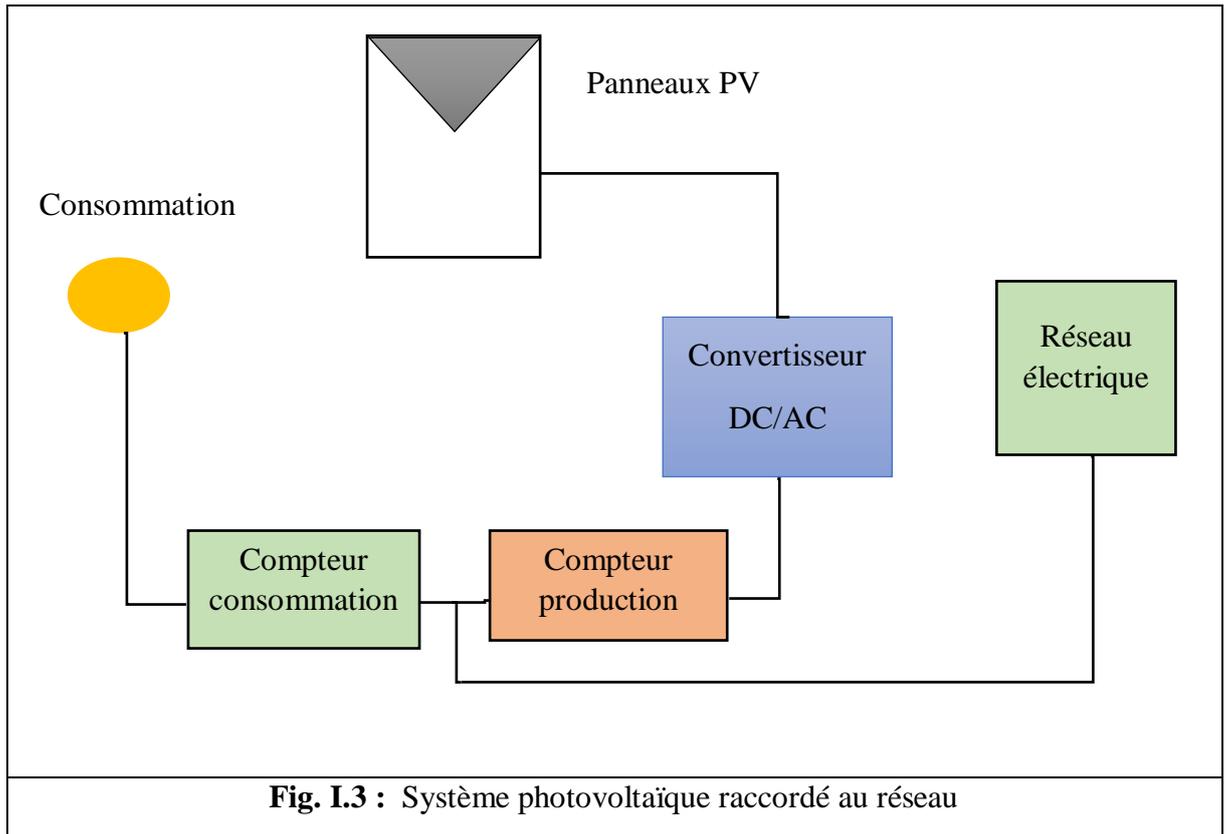


Fig. I.2 : Systèmes photovoltaïque autonome [3]

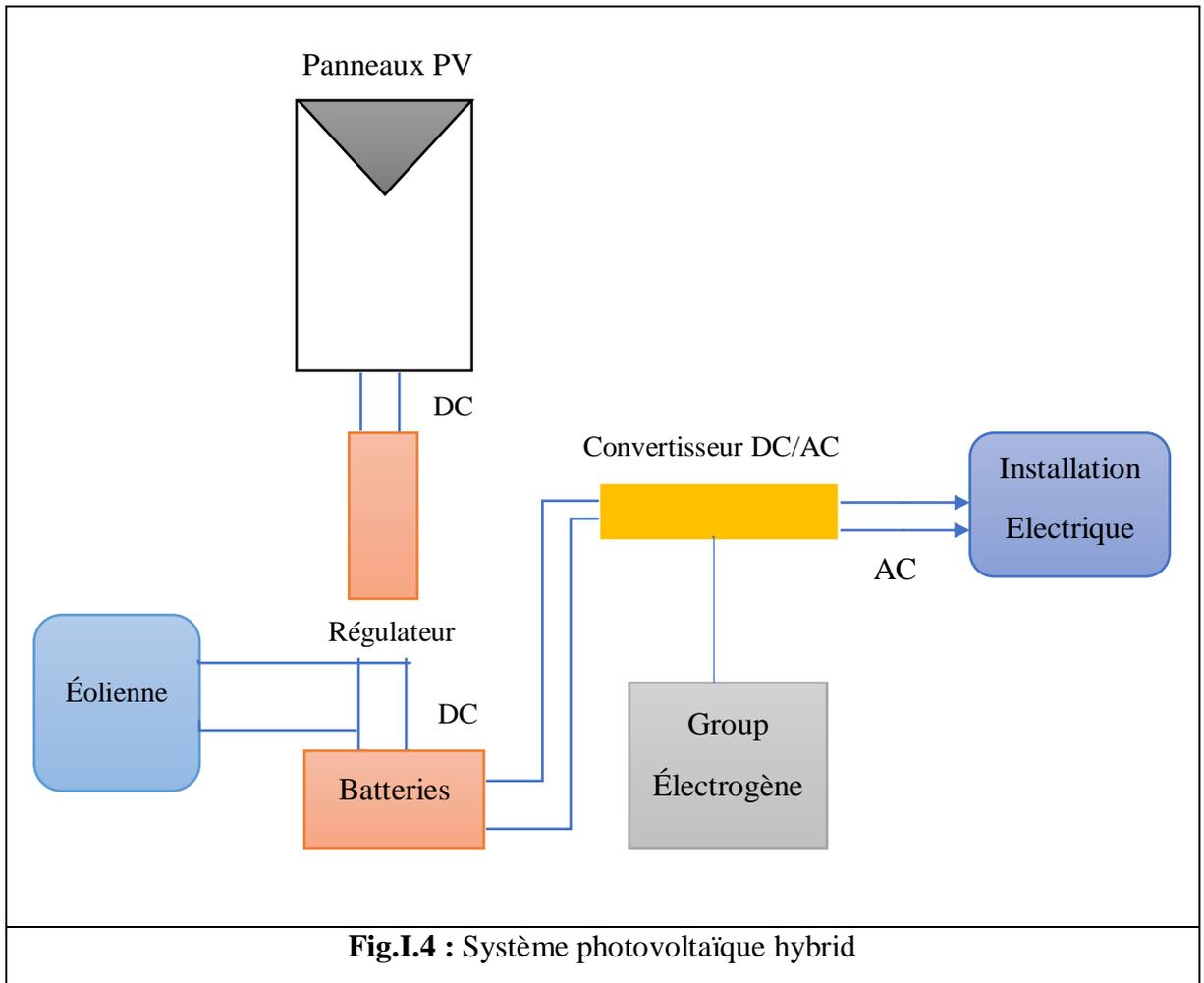
2. système connecté aux réseaux

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique. Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau (accrochage au réseau) comme le montre la figure suivante [4].



3. système hybride

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation. Un exemple d'un système hybride est représenté sur la figure (I.4) [5].



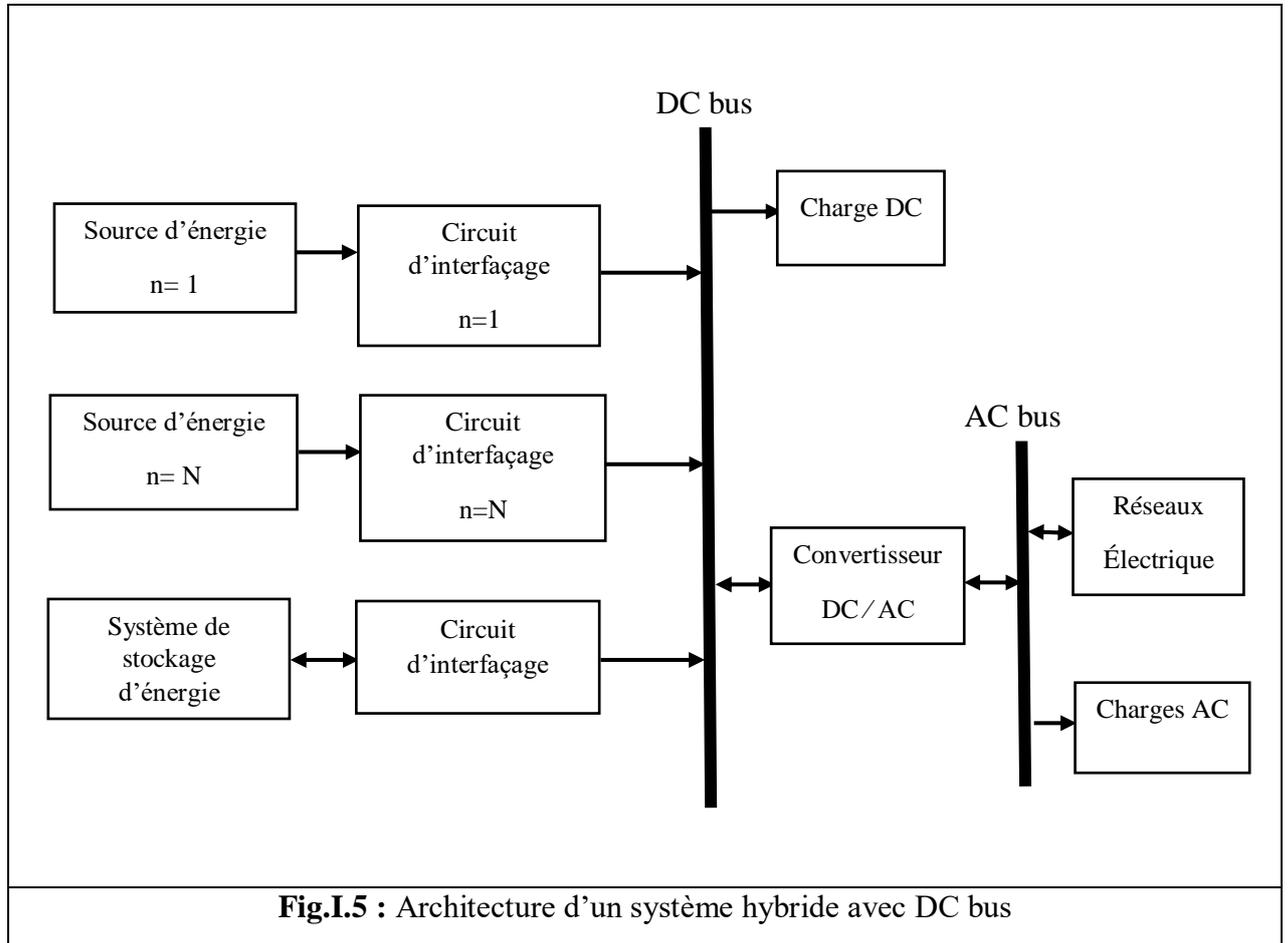
1. Topologies du système hybride [6]

Étant donné que toutes les technologies d'énergie renouvelable ont des caractéristiques de fonctionnement différentes, Il est important de choisir un moyen standard pour les intégrer dans un système hybride. Il existe diverses architectures pour associer différentes sources d'énergie renouvelables dans un système hybride. Ces types peuvent être classés en trois catégories générales ; Couplage dans un bus à courant continu (DC-bus), couplage dans un bus à courant alternatif (AC-bus), et couplage mixte DC/AC bus.

1.1. Le Couplage DC

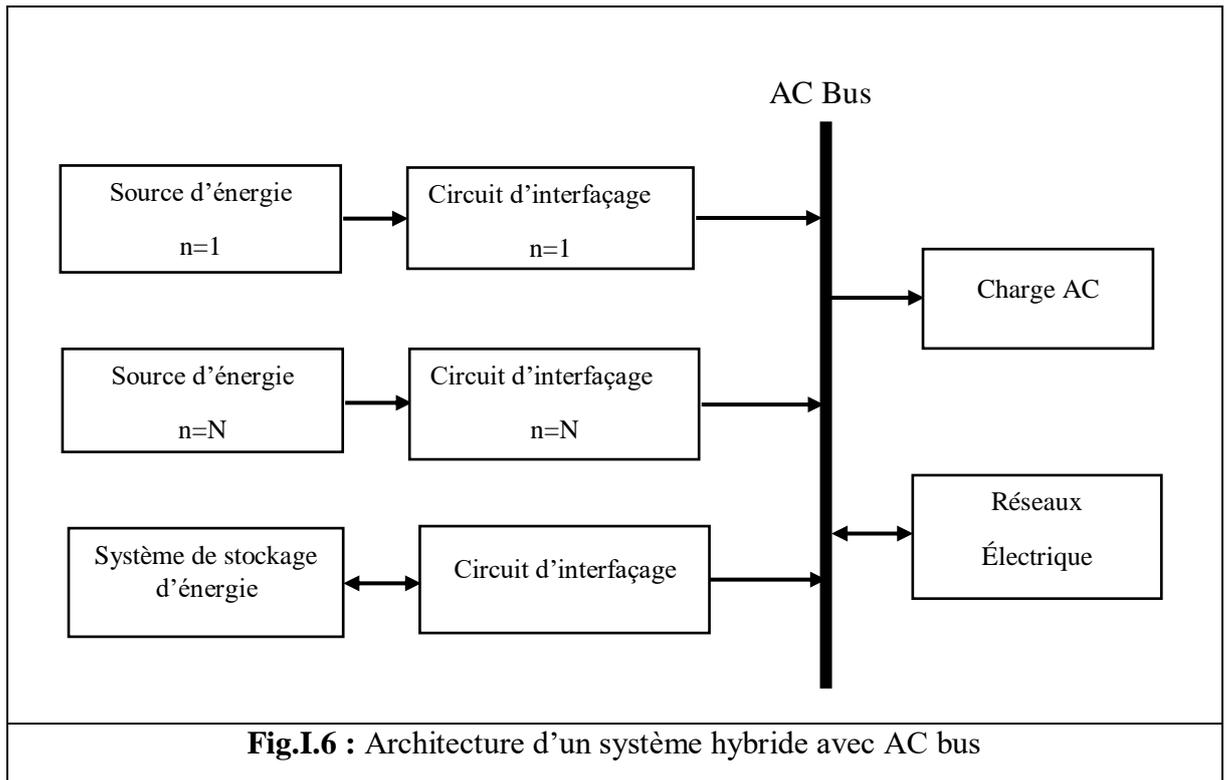
Dans un couplage avec un bus continu comme illustré dans la figure I.5, différentes sources recouvrables sont connectées au DC bus par l'intermédiaire de convertisseurs électroniques appropriés. Des sources à courant continu (CC) on peut directement connecter au DC-bus ou via un convertisseur DC/DC si nécessaire. Des charges à courant continu (CC) peuvent être également connectées au bus DC directement ou par l'intermédiaire d'un convertisseur

amplificateur afin d'obtenir la tension nécessaire pour ces charges. Le système peut fournir de l'énergie à des charges AC ou être interfacé à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC conçu pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance. Le couplage DC est simple et ne nécessite aucune synchronisation pour intégrer les différentes sources.



1.2. Le Couplage AC

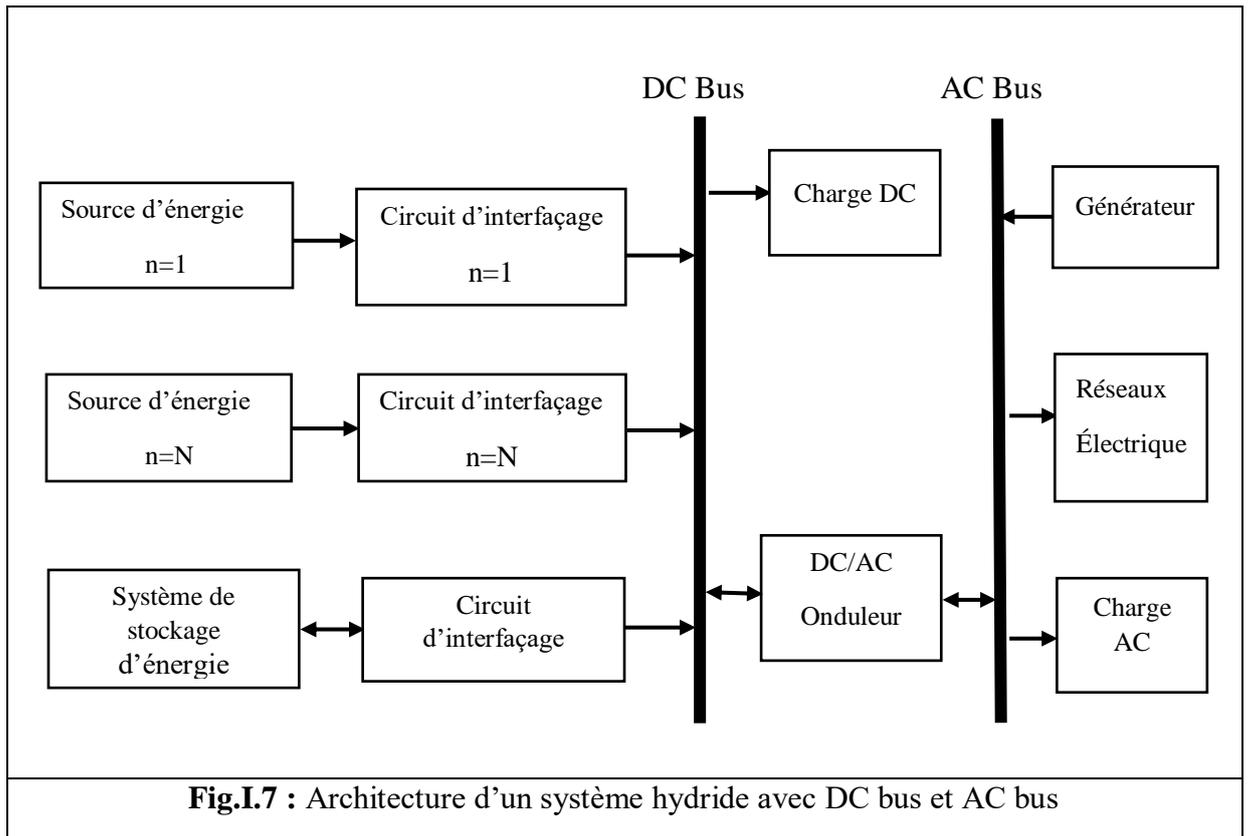
Dans cette configuration comme schématisé sur la figure I.6, diverses sources d'énergie sont intégrées à travers leur circuit d'interface électronique à un AC bus. Des inductances de couplage pourraient être utilisées entre le circuit électronique de puissance et le bus AC pour obtenir la gestion de flux de puissance souhaitée. Dans cette configuration, l'alimentation des charges à CC peut être obtenue via des convertisseurs AC / DC.



1.3. Le couplage mixte DC/AC

L'architecture du système hybride à un couplage mixte DC/AC est présentée dans la figure.1.7.

Dans cette configuration, différents générateurs distribués (GD) peuvent être reliés au DC bus ou AC bus par l'intermédiaire des convertisseurs appropriés. Cependant certaines sources peuvent être connectées directement sans l'utilisation des circuits d'interfaçage. Par conséquent, le système tend à offrir, en même temps, une rentabilité et une plus grande efficacité énergétique. Inversement, le contrôle du système et la gestion de l'énergie dans cette configuration sont plus complexes que dans des couplages DC et AC seules.



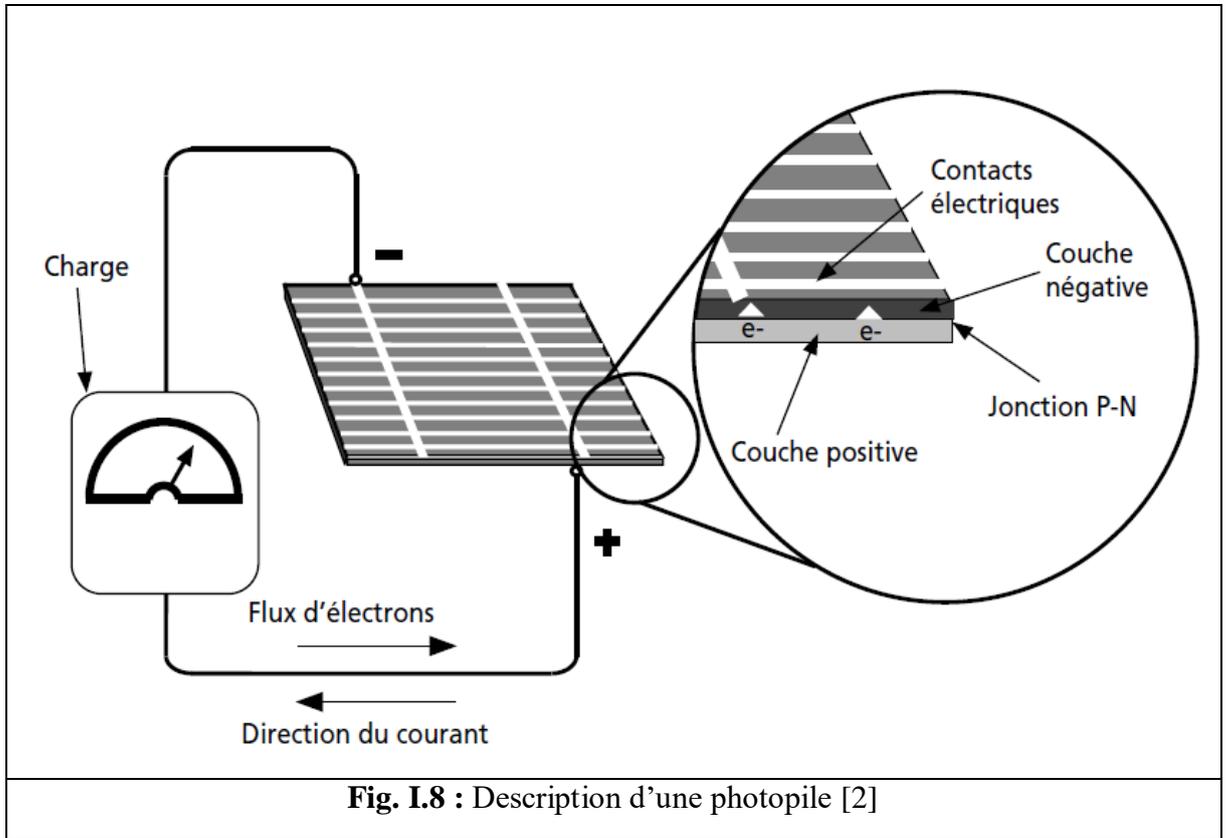
I.2.2. L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

- La photopile

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière [2].



I.2.3. Cellule photovoltaïque

1. différents types des cellules

Les différents types de cellules dépendent des matériaux semi-conducteurs utilisés. Les principaux types sont présentés dans le schéma ci-dessous.

a. Filière du silicium

Cette filière représente aujourd'hui près de 99% de la production mondiale en termes de matériaux photovoltaïques et comporte [7] :

- Le silicium monocristallin : qui représente environ 29% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 17% pour les cellules et de 14,5% pour les modules.

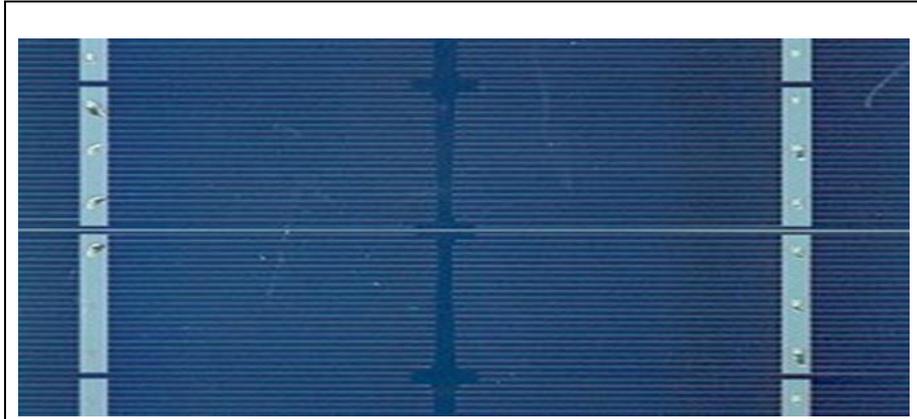


Fig.I.9 : cellules monocristallines [8]

- Le silicium poly cristallin : qui représente environ 62% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 14,5% pour les cellules et de 12,5 pour les modules.

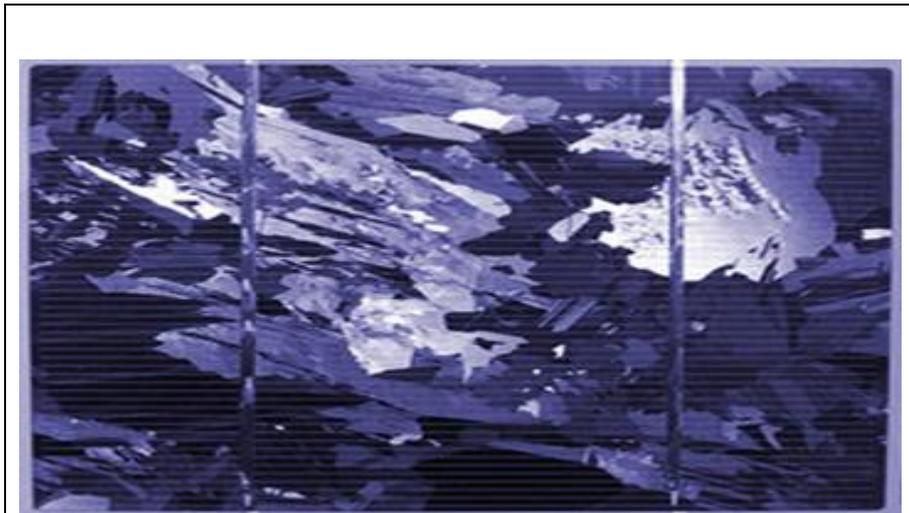


Fig. I.10 : cellule poly cristallin. [8]

- Le silicium amorphe : Avec une épaisseur plus petite, et un coefficient d'absorption plus grand que les filières présentées ci-dessus, le coût du silicium amorphe est réduit mais avec un rendement (pour les produits commerciaux) de 8% ce qui le limite aux applications de très petites puissances.

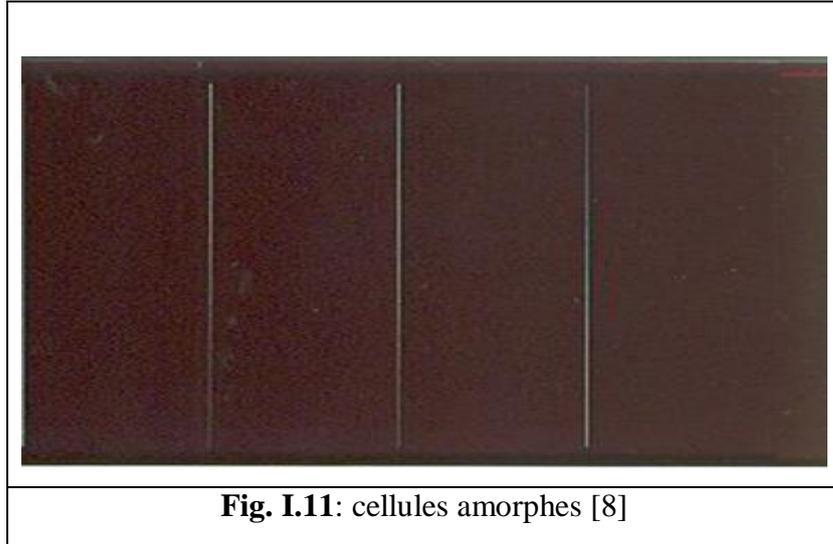
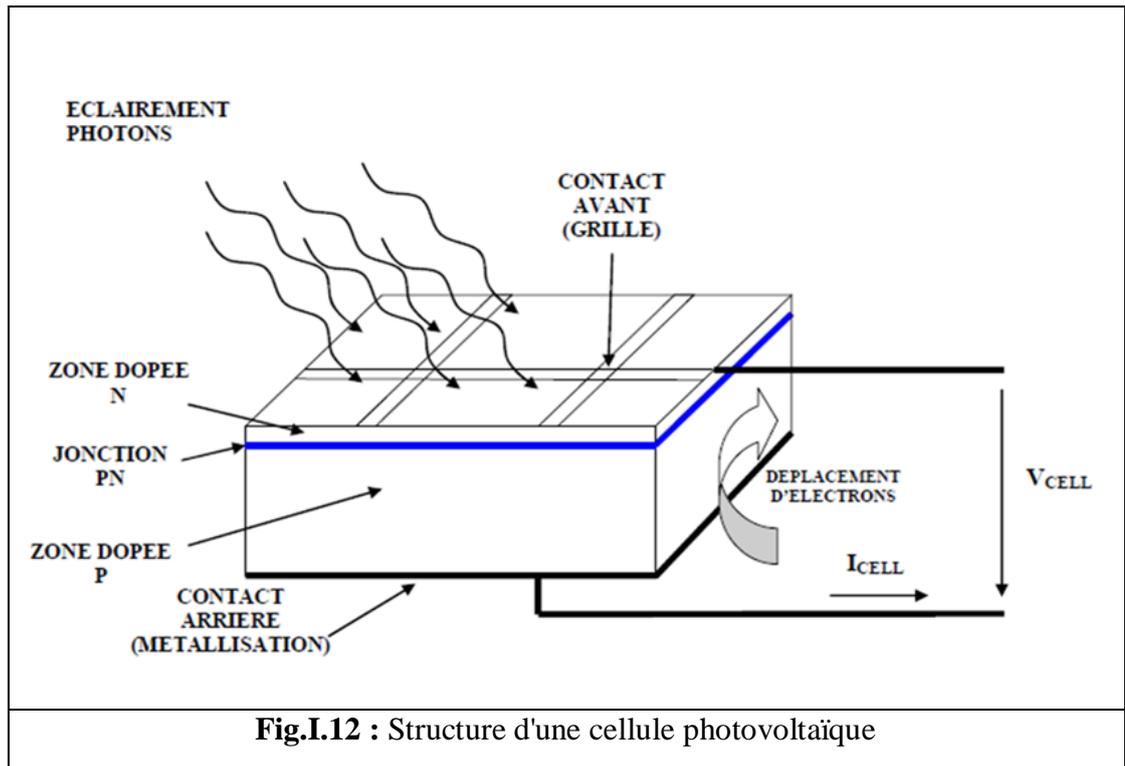


Fig. I.11: cellules amorphes [8]

2. Principe d'une cellule photovoltaïque

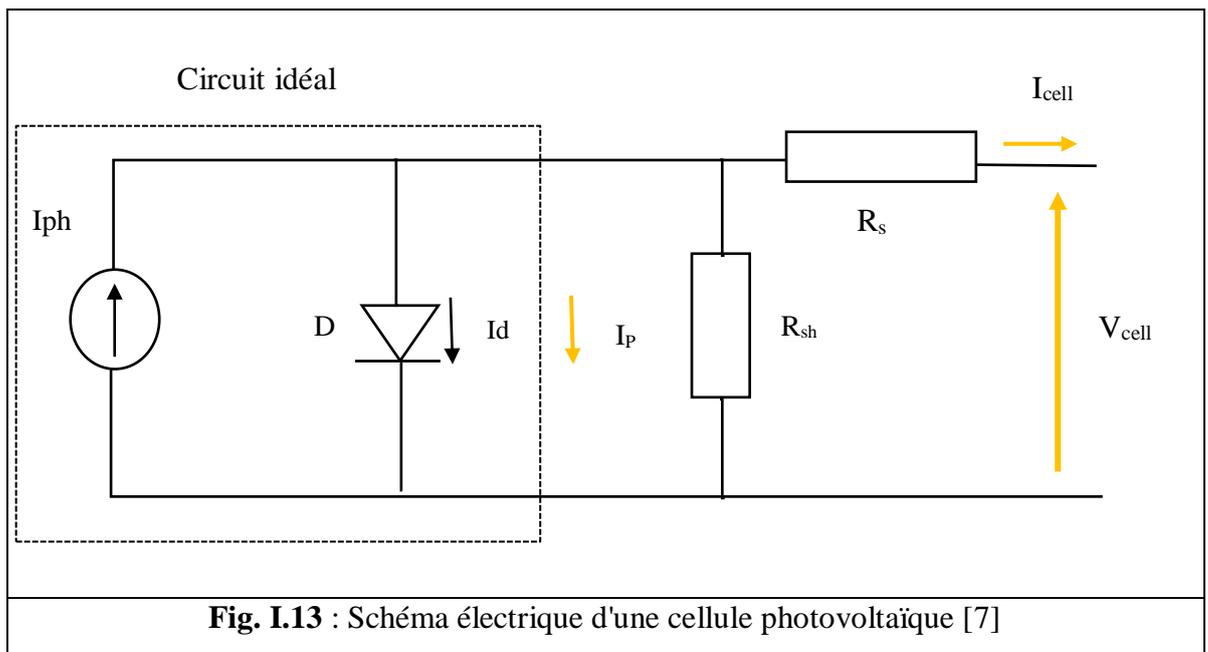
Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La figure I.12 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium [9].



3. Caractéristique électrique d'une cellule

1. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.



La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- **La résistance série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.[10]

- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [10]

Et le courant délivré par la cellule est donné par l'expression suivante :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_0 : Courant de saturation de la jonction (dépend du matériau semi-conducteur).

I_{cell} : Courant fourni par la cellule

R_s : Résistance en série

R_{sh} : Résistance en parallèle

V_{cell} : Tension aux bornes de la cellule

q : Charge de l'électron.

K : Constante de Boltzmann.

A : Facteur d'idéalité de la jonction P-N

T : Température ambiante [°C].

N_s : Nombre de cellules en série.

2. Caractéristique Courant-Tension

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). En effet le fonctionnement des cellules

photovoltaïque dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi chaque courbe courant-tension correspond spécifiquement de fonctionnement [11].

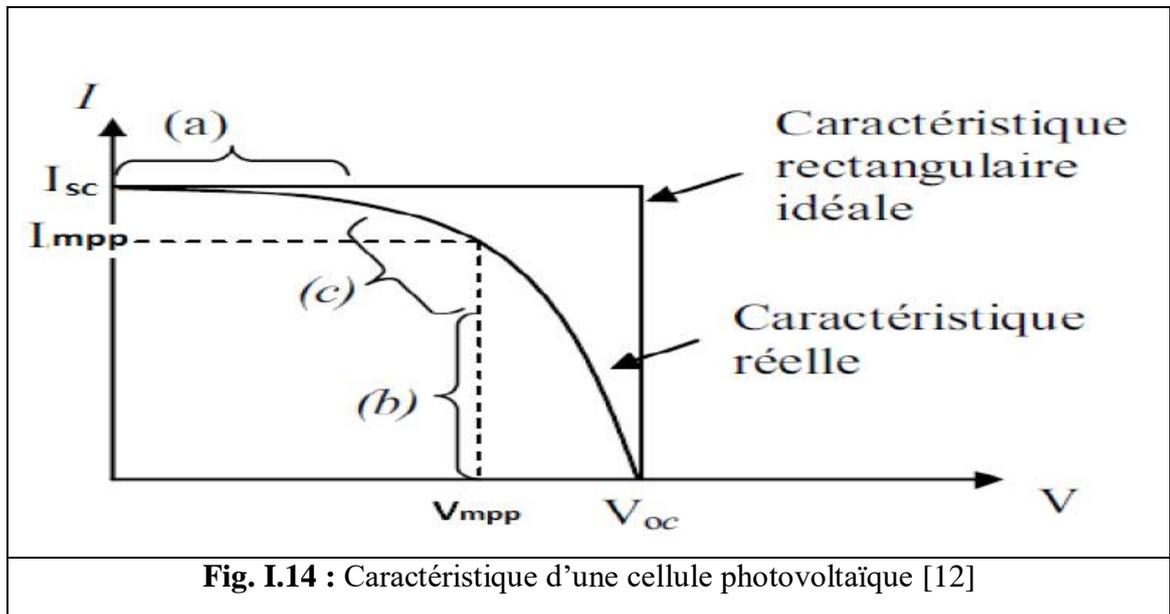


Fig. I.14 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [12]

La caractéristique I-V se divise en trois zones :

- La zone « a » : où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- La zone « b » : où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} .
- La zone « c » : où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

I.2.4. Module photovoltaïque

Les modules peuvent être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [2].

I.2.4.1 L'association en série des cellules

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure (I.15). L'équation (I.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules [13].

Avec :

$$\begin{cases} V_{oc}n_s = N_s V_{oc} \\ I_{cc} = I_{cc} N_s \end{cases} \quad (I.2)$$

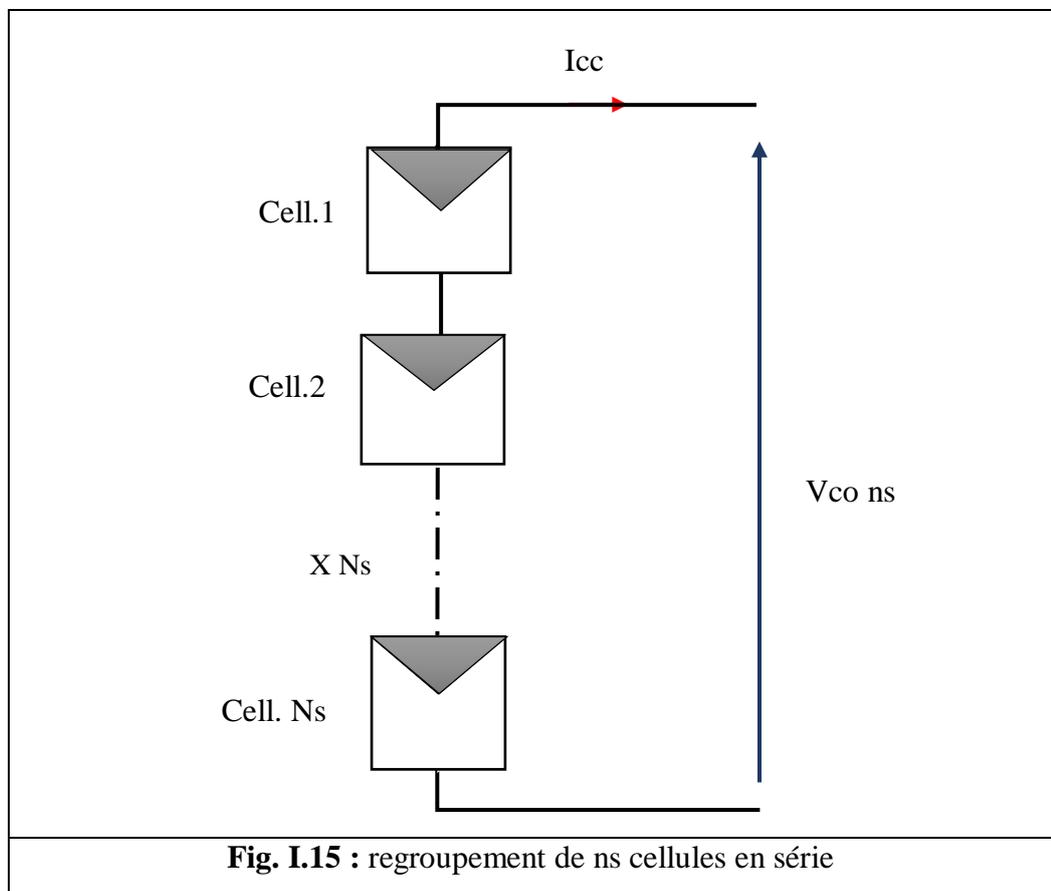
$V_{co} n_s$: Tension aux bornes de N_s cellules en série

N_s : Nombre de cellules en série

V_{co} : Tension aux bornes d'une seule cellule

I_{cc} : Courant traversant une cellule

$I_{cc} n_s$: Courant traversant N_s cellules en série



I.2.4.2 L'association en parallèle des cellules

Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du

groupement est obtenue par addition des courants, Figure I.16. L'équation (I.3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules [13].

Avec :

$$\begin{cases} I_{cc} = N_p I_{cc} \\ V_{ocn_p} = V_{oc} \end{cases} \quad (I.3)$$

$I_{cc} n_p$: Courant traversant N_p cellules en parallèle

N_p : Nombre de cellules en parallèle

$V_{co} n_p$: Tension aux bornes de N_p cellules en parallèle

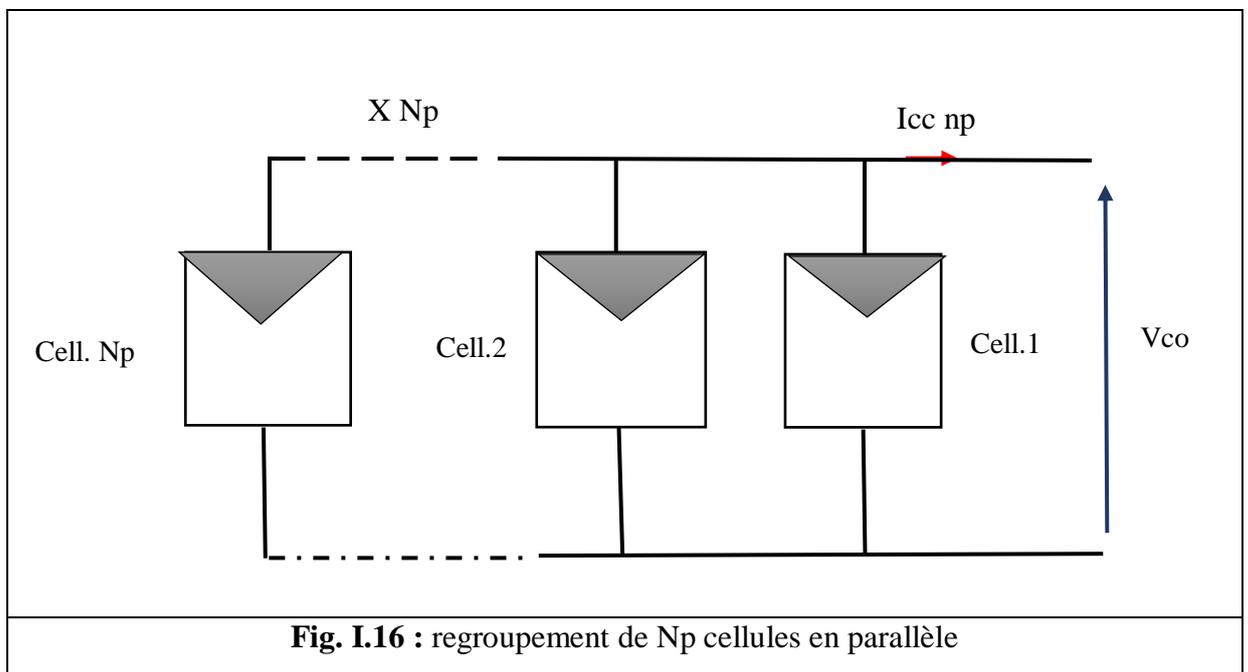


Fig. I.16 : regroupement de N_p cellules en parallèle

I.2.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV [14]

1. Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite 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 puissances allant du *milliWatt* au *MégaWatt*.

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

2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules.

1.3. Généralités sur le système de stockage

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries [18].

I.3.1. Les Caractéristiques des batteries [15]

- **Capacité nominale** : c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah).
- **Tension d'utilisation** : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Durée de vie et cycle de vie** : les deux caractéristiques définissent la durabilité d'un système de stockage. La durée de vie est mesurée en années. D'autre part, la durée de vie du cycle est mesurée dans les cycles de charge-décharge.
- **Profondeur de décharge** : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge.
- **Autodécharge** : définit l'énergie perdue par un système de stockage pendant le temps de non-utilisation. Ce paramètre est mesuré par la relation entre l'énergie perdue pendant

une certaine période de temps (heure, jour ou mois) et la capacité énergétique du dispositif de stockage.

- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- a. **Etat de charge (SOC)** : c'est la quantité d'énergie disponible divisée par la capacité nominale de la batterie. Si $SOC = 1$, la batterie est chargée et quand : $SOC = 0$, la batterie est vide.

1.3.2. Principe de fonctionnement des batteries

Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents.

Durant la décharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel.

Durant la charge, le phénomène s'inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit.

Par convention, on note généralement la réaction chimique d'oxydoréduction dans le sens de la décharge (\rightarrow), la flèche inverse étant le sens de la charge (\leftarrow)

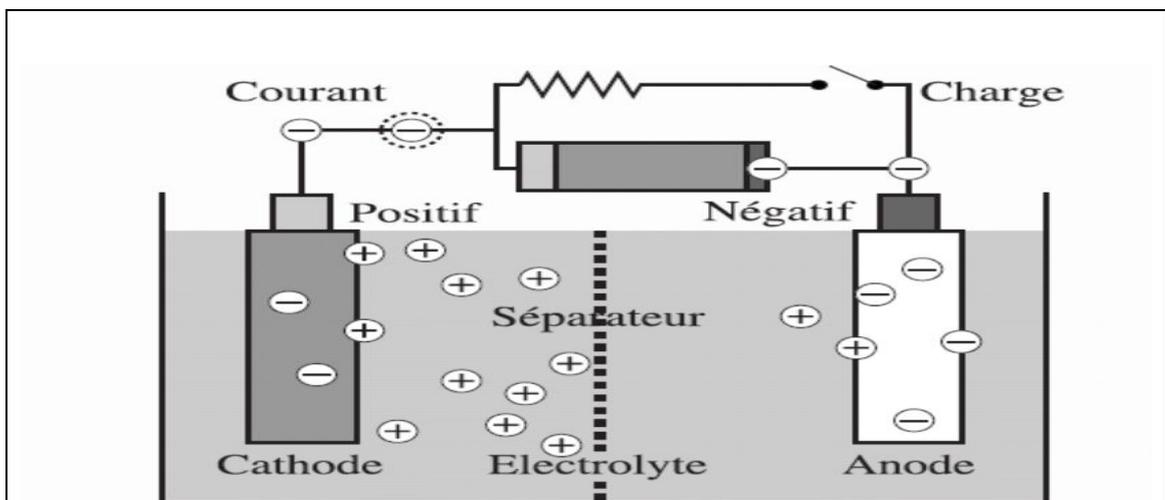


Fig. I.17 : principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique [16]

I.3.3. Différents types D'accumulateur [16]

Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques. Dans les paragraphes suivants est donnée une description des technologies suivantes :

- Accumulateurs au plomb
- Accumulateurs au nickel (Ni-Cd, Ni-MH, Ni-Zn)
- Accumulateurs au lithium (Li-métal, Li-ion, LiP, LiPo)

1. Accumulateur au plomb

L'accumulateur Plomb-acide a été inventé par Gaston Planté en 1859. On distingue différentes technologies d'électrode d'une part (plaques planes ou plaques tubulaires) et d'électrolyte d'autre part (liquide ou gélifié), donnant lieu à une dénomination : batterie ouverte et batterie fermée/étanche (ou batterie à recombinaison, en anglais Valve Regulated Lead Acid battery, VRLA battery).

- Réaction électrochimique



Tab.I.1 : caractéristique D'un élément accumulateur Plomb – acide [16]	
Tension à vide	2 - 2,1V
Capacité spécifique théorique	120Ah.kg ⁻¹
Densité énergétique massique	15 – 40Wh.kg ⁻¹
Densité énergétique volumique	40 – 100Wh.dm ⁻³
Durée de vie	Nombre de cycles = 200 – 400 en version étanche, 600 – 1000 en version tubulaire
Températures d'utilisation	De -20°C à +60°C
Rendement faradique global	Entre 85 et 90%
Autodécharge	De l'ordre de 0,5% par jour

L'avantage de l'accumulateur au plomb est son faible coût (< 1€/kWh restitué).

Ses inconvénients sont les suivants :

- Une faible densité énergétique massique car sa masse est élevée
- Un faible courant de charge

- L'utilisation d'un liquide corrosif (pour l'électrolyte)

1.1 Composition d'une batterie solaire plomb- Acide [17]

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'Ox plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

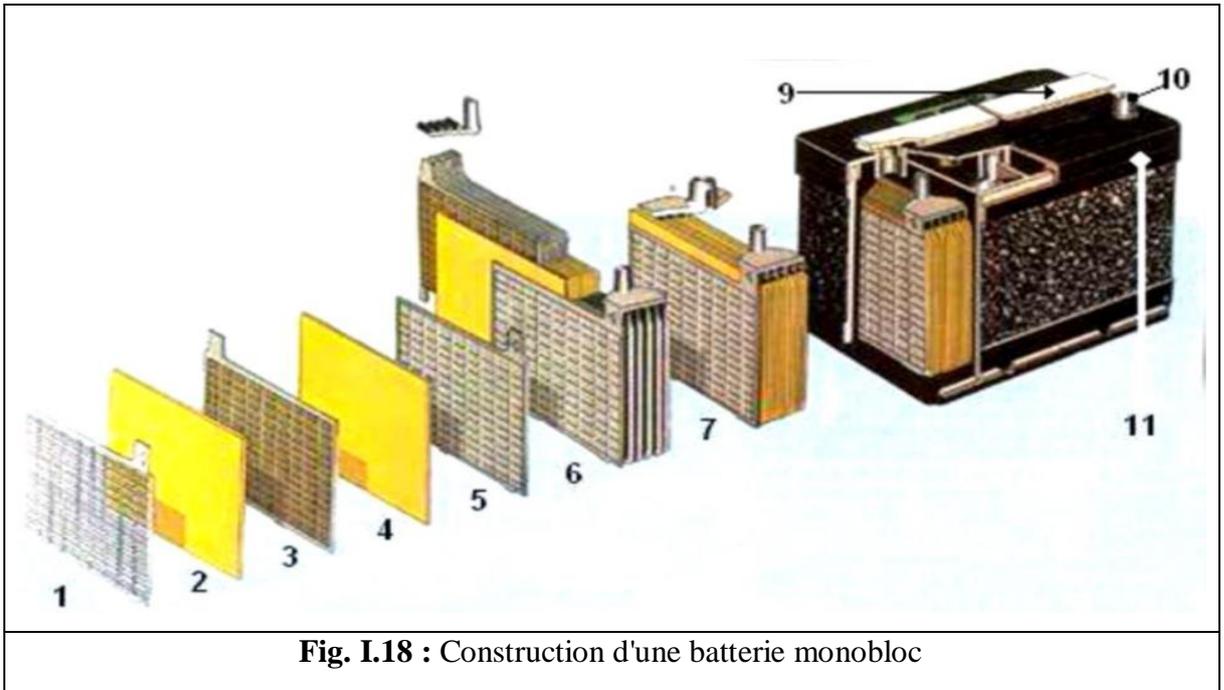


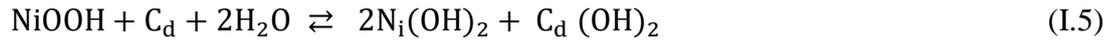
Fig. I.18 : Construction d'une batterie monobloc

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac. |
| 6 : Faisceau négatif. | |

2. Accumulateur Nickel -Cadmium

L'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd) a été découvert par Waldemar Jungner en 1900.

- Réaction électrochimique



Tab. I.2 : caractéristique D'un élément accumulateur Ni – Cd [16]	
Tension à vide	$E^0_+ + E^0_- = 1,26\text{V} \approx 1,3\text{V}$
Capacité spécifique théorique	180Ah.kg^{-1}
Densité énergétique massique	$30 - 60\text{Wh.kg}^{-1}$
Densité énergétique volumique	$80 - 160\text{Wh.dm}^{-3}$
Durée de vie	Nombre de cycles = entre 500 et 1000 quand la profondeur de décharge (DOD) est de 100% à chaque cycle ; entre 5000 et 10000 quand DOD est de 25% à chaque cycle
Températures d'utilisation	> stockage : de -30°C à $+50^\circ\text{C}$ > charge : de 0°C à $+45^\circ\text{C}$ > décharge : de -20°C à $+60^\circ\text{C}$
Rendement faradique global	Entre 75 et 80%
Autodécharge	De l'ordre de 2% par jour

Les avantages de l'accumulateur Ni-Cd sont :

- Une grande capacité
- De bonnes performances à faible température
- Un bon niveau de fiabilité

Ses inconvénients sont les suivant :

- Coût : environ 1,5 fois plus chère que batterie Pb

3. Accumulateur Nickel Métal Hydrure

L'accumulateur Nickel Métal Hydrure (Ni-MH) a été développé dans les années 1970 pour répondre au problème du cadmium dans les accumulateurs Ni-Cd, et remplace depuis les années 1990 l'accumulateur Ni-Cd avec des niveau de performances assez comparables. Il s'agit d'une forme dérivée des accumulateurs Ni-H₂.

- Réaction électrochimique



Tab.I.3 : caractéristique D'un élément accumulateur Ni-Mh [16]	
Tension à vide	$E^0_+ + E^0_- = 1,28V \approx 1,3V$
Capacité spécifique théorique	$205Ah.kg^{-1}$
Densité énergétique massique	$60 - 90Wh.kg^{-1}$
Densité énergétique volumique	$200 - 350Wh.dm^{-3}$
Durée de vie	Nombre de cycles = 400 – 700 pour DOD = 100%
Températures d'utilisation	> stockage : de $-30^\circ C$ à $+40^\circ C$ > charge : de $0^\circ C$ à $+40^\circ C$ > décharge : de $-20^\circ C$ à $+50^\circ C$
Rendement faradique global	Entre 90 et 95%
Autodécharge	De 2% à 4% par jour

Les avantages de l'accumulateur Ni-MH sont :

- Une énergie spécifique environ 2 fois supérieure à celle de l'accumulateur Ni-Cd
- L'utilisation d'un alliage métallique à l'électrode négative est une alternative à l'utilisation du cadmium

Ses inconvénients sont les suivants :

- Coût élevé
- Hystérésis sur la caractéristique tension à vide en fonction de l'état de charge.

4. Accumulateur Au lithium

La technologie Lithium-ion à électrolyte liquide (Li-ion) a été commercialisée en 1991.

- Réaction électrochimique : (M, métal, pouvant être Ni, Co ou Mn par exemple)



Tab. I.4 : caractéristique D'un élément accumulateur lithium (Li-ion) [16]	
Tension à vide	> 3,5V
Capacité spécifique théorique	370Ah.kg ⁻¹
Densité énergétique massique	90 – 180Wh.kg ⁻¹
Densité énergétique volumique	200 – 300Wh.dm ⁻³
Durée de vie	Nombre de cycles = de 500 à 1000
Températures d'utilisation	Stockage : de -20°C à +50°C Charge : de 0°C à +45°C Décharge : de -20°C à +60°C
Rendement faradique global	Entre 90 et 95%
Autodécharge	Environ 0,3% par jour

Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion sont :

- Une densité énergétique massique 2 à 5 fois plus élevée que pour Ni-MH
- Un faible encombrement
- Une faible autodécharge

Ses inconvénients sont les suivants :

- Sécurité : échauffements qui peuvent conduire à l'explosion, nécessite donc un système électronique de protection
- Coût (notamment pour les oxydes de métaux de transition lithiés à base de cobalt et de nickel)

I.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque et système de stockage. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire a la modélisation et l'analyse de ce système.

***CHAPITRE II : MODÉLISATION DES
CONVERTISSEUR DC-DC ET DC-AC***

II.1 Introduction

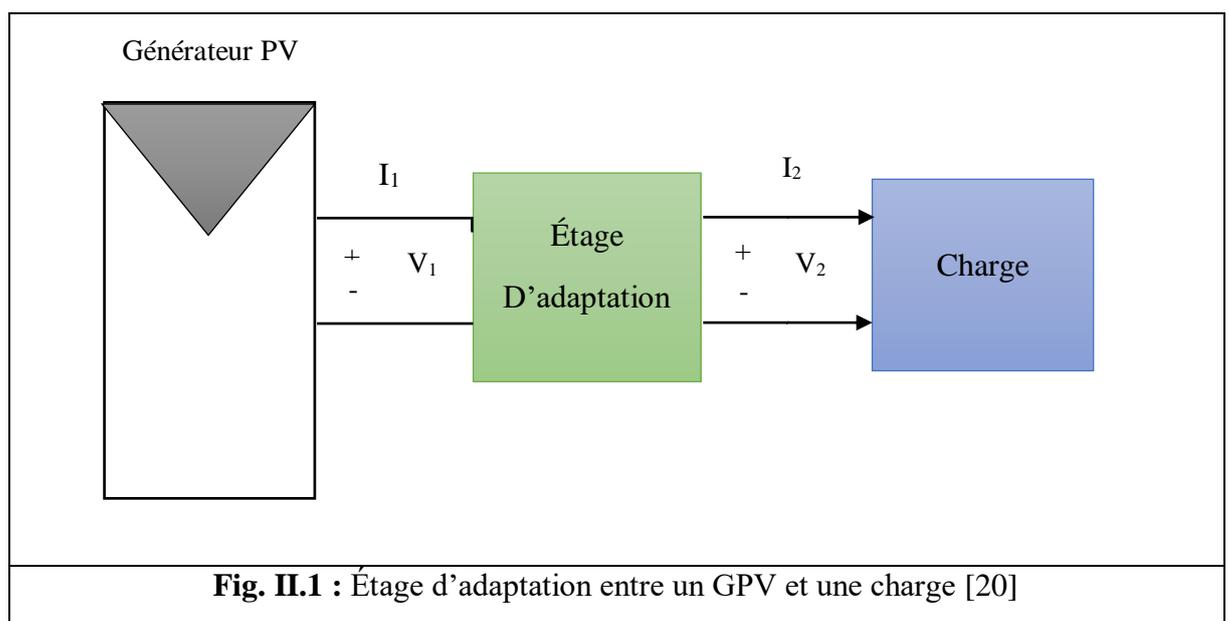
Dans un système hybride autonome la transformation d'énergie, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant continu et inversement. L'étude du convertisseur est intéressante pour aide conversion d'énergie.

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs qu'on peut utiliser dans le système autonome hybride, on a DC/DC et sont différents types et convertisseur DC/AC.

II.2 Etage d'adaptation Entre Gpv Et Charge

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur, l'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter.

Elle peut être survoltrice ou dévoltrice. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir la structure la plus adéquate [19].



II.2.1 Convertisseurs DC-DC

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue 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.

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

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [21].

a) Les Types des convertisseurs DC/DC

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 :

- 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 deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- Hacheur dévolteur (ou Buck)
- Hacheur survolteur (ou boost)
- Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-boost) [22]

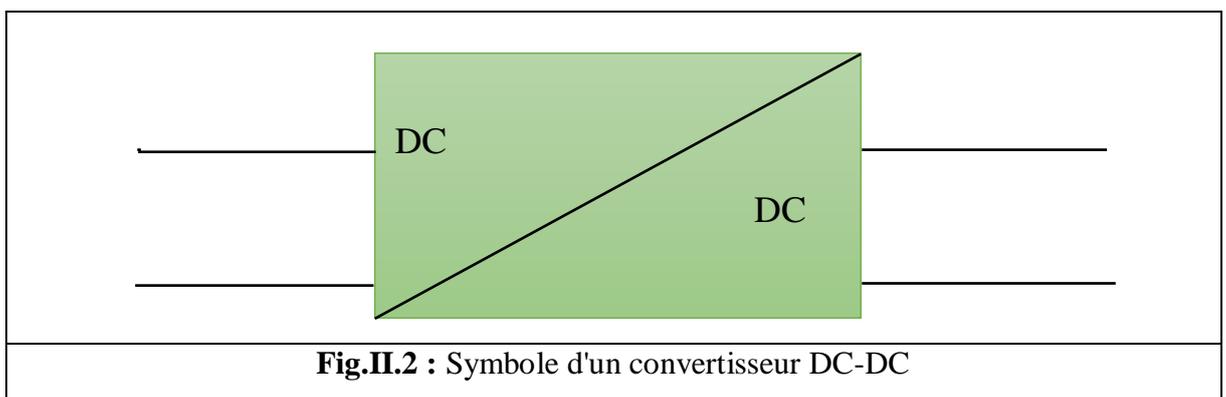


Fig.II.2 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

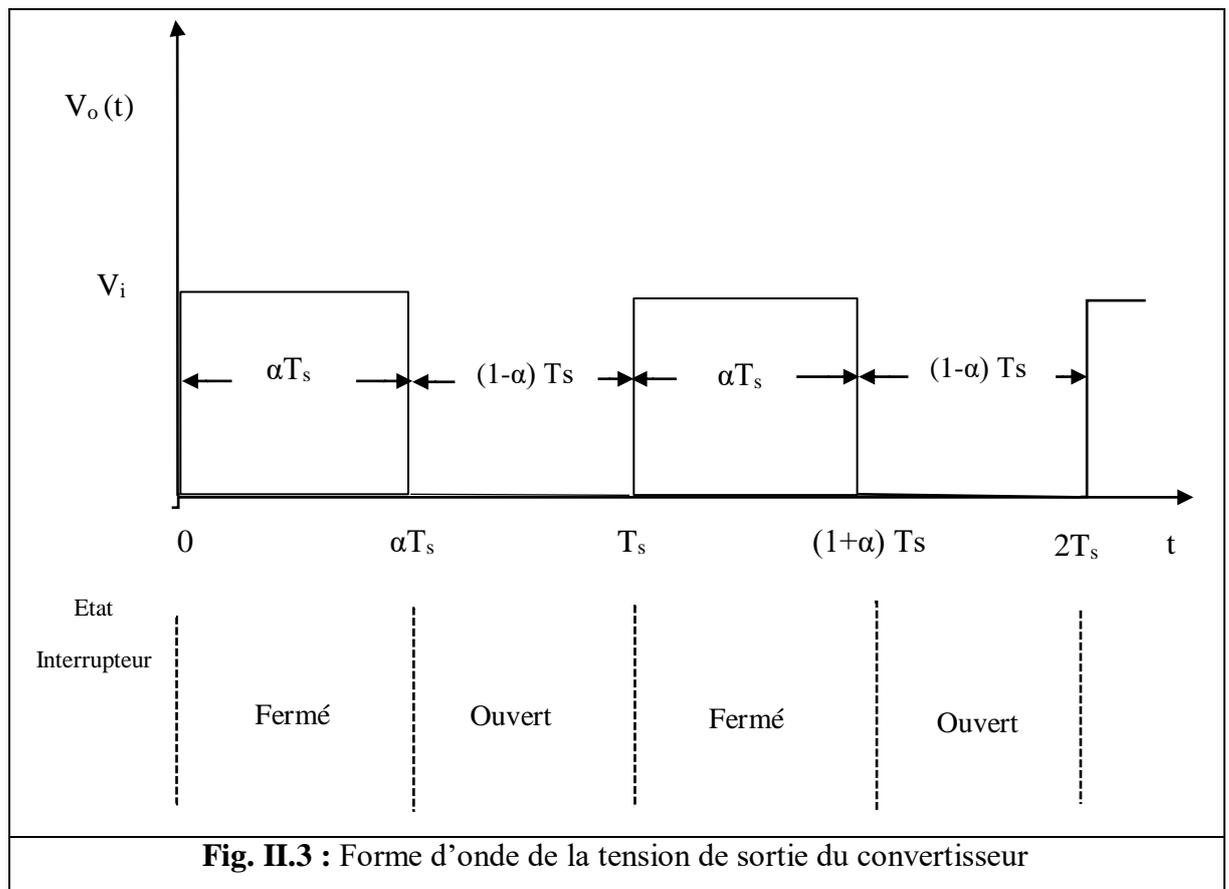
L'interrupteur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur en mode commuté, généralement un transistor MOSFET ou IGBT. Si le dispositif semi-conducteur est à l'état ouvert, son courant est nul et par conséquent il n'y a pas de dissipation de puissance.

S'il est à l'état fermé (c.-à-d. saturé), la chute de tension est presque nulle et par conséquent la puissance dissipée sera très faible.

Durant le fonctionnement du convertisseur, l'interrupteur travaille à une fréquence constante f_s avec un intervalle actif αT_s , où T_s est la période de commutation ($T_s = 1/f_s$) et α est le rapport cyclique du commutateur ($\alpha \in [0 ; 1]$) (Figure. II.3).

La fréquence de commutation f_s se situe généralement dans la plage de 1kHz à 1MHz, dépendant de la vitesse de commutation des dispositifs semi-conducteurs.

Les valeurs moyennes de la tension (V_o) et du courant (I_o) de sortie peuvent être ajustées en variant le rapport cyclique α . [23]



II.2.1.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Un convertisseur Buck est un abaisseur de tension. La Figure.II.4 montre un circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur typique, qui est constitué d'une diode, un interrupteur S, une inductance L et deux condensateurs C₁ et C₂. L'inductance (L) et le condensateur (C₂) fonctionnent comme un filtre pour améliorer la qualité de la tension de et du courant de charge.[23]

a) Modèle mathématique du circuit équivalent

Le circuit de la Figure.II.4 possède deux états de fonctionnement : l'état 1 lorsque l'interrupteur S est fermé et l'état 2 lorsque S est ouvert.

Pour étudier le convertisseur Buck et établir son modèle mathématique, la représentation du circuit équivalent pour les deux différents états de l'interrupteur (ouvert et fermé) doit être analysée. Les circuits équivalents de ces deux états sont représentés sur les Figures.II.5 et 6, respectivement.

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit de la Figure.II.5 (interrupteur fermé) on aboutit au système d'équations suivant :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.1})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (\text{II.2})$$

$$i_{C3}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.3})$$

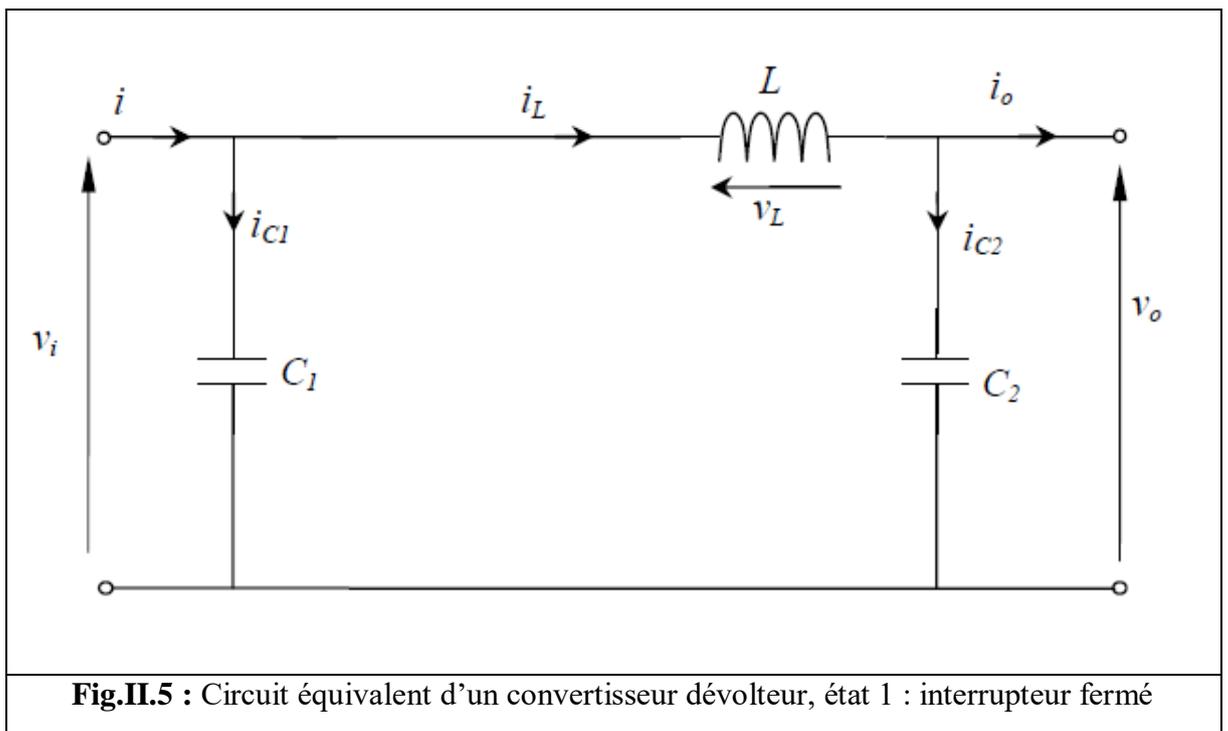
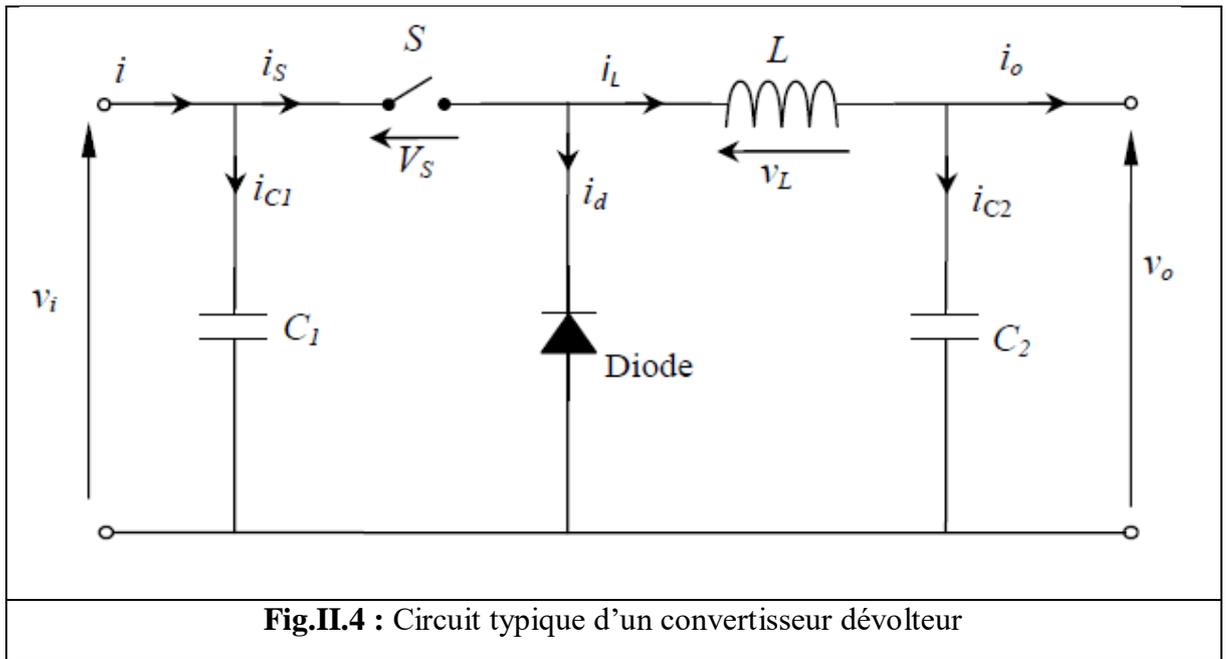
En utilisant la loi de Kirchhoff sur la Figure.II.6 (Interrupteur ouvert), un deuxième système d'équations est obtenu :

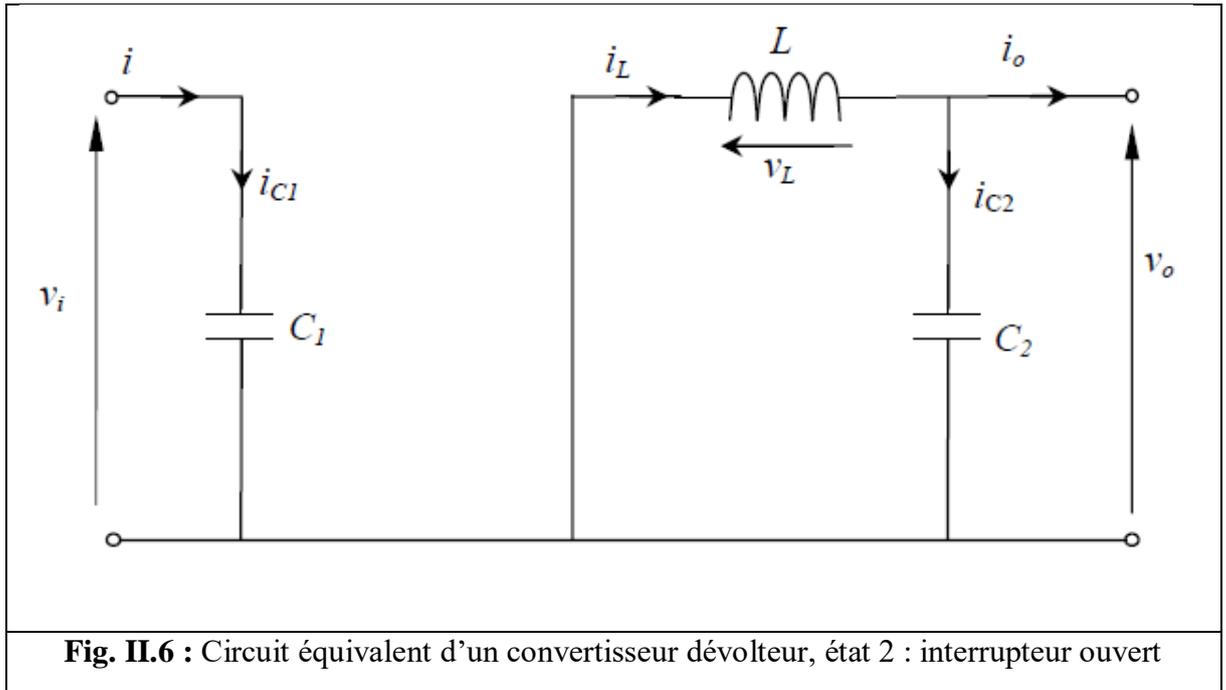
$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) \quad (\text{II.4})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (\text{II.5})$$

$$V_1(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (\text{II.6})$$

Ce sont les équations de base utilisées pour établir l'ensemble des modèles mathématiques décrivant les diverses propriétés du convertisseur Buck [23].





II.2.1.2 Convertisseur survolteur (boost)

La Figure.II.7 montre un convertisseur survolteur. Comme son nom l'indique, son application typique est la conversion d'une basse tension en une tension plus élevée. Par conséquent, son courant de sortie est inférieur à son courant d'entrée en raison de l'équilibre de la puissance [23].

a) Modèle mathématique de circuit équivalent

De même, il ya aussi deux états de fonctionnement : lorsque l'interrupteur S est fermé et Lorsqu'il est ouvert. Les circuits équivalents de ces deux états sont représentés sur les Figures.II.8 et 9, respectivement.

L'application de la loi de Kirchhoff, pendant le premier intervalle αT_s (Figure.II.8), conduit au système d'équations suivantes :

$$i_{C1} = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.7})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (\text{II.8})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.9})$$

Dans ce cas l'inductance L stocke l'énergie de la source d'alimentation alors que le condensateur (C_2) se décharge pour alimenter la charge.

Après que l'interrupteur soit ouvert durant le deuxième intervalle $(1-\alpha) T_s$ de la période de commutation (Figure. II.9), un deuxième système d'équations peut être déduit :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.10})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (\text{II.11})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.12})$$

Dans ce cas, l'énergie stockée dans l'inductance L et celle de la source sont transférés à la charge et au condensateur (C_2) [23].

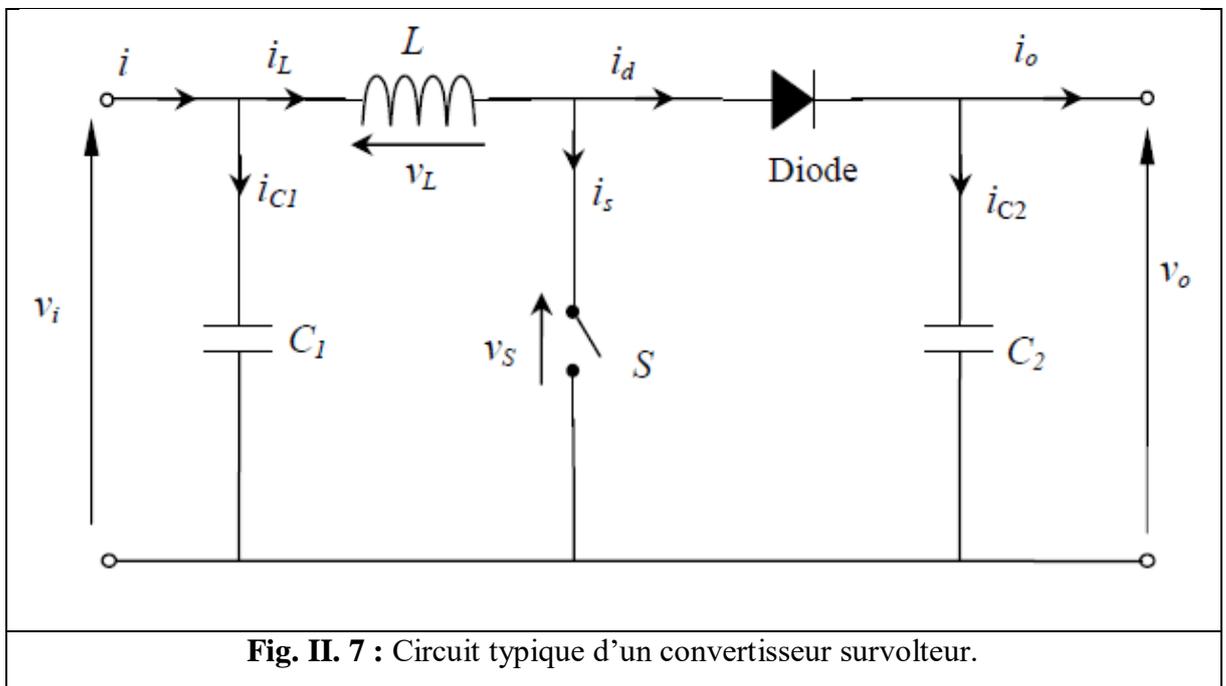
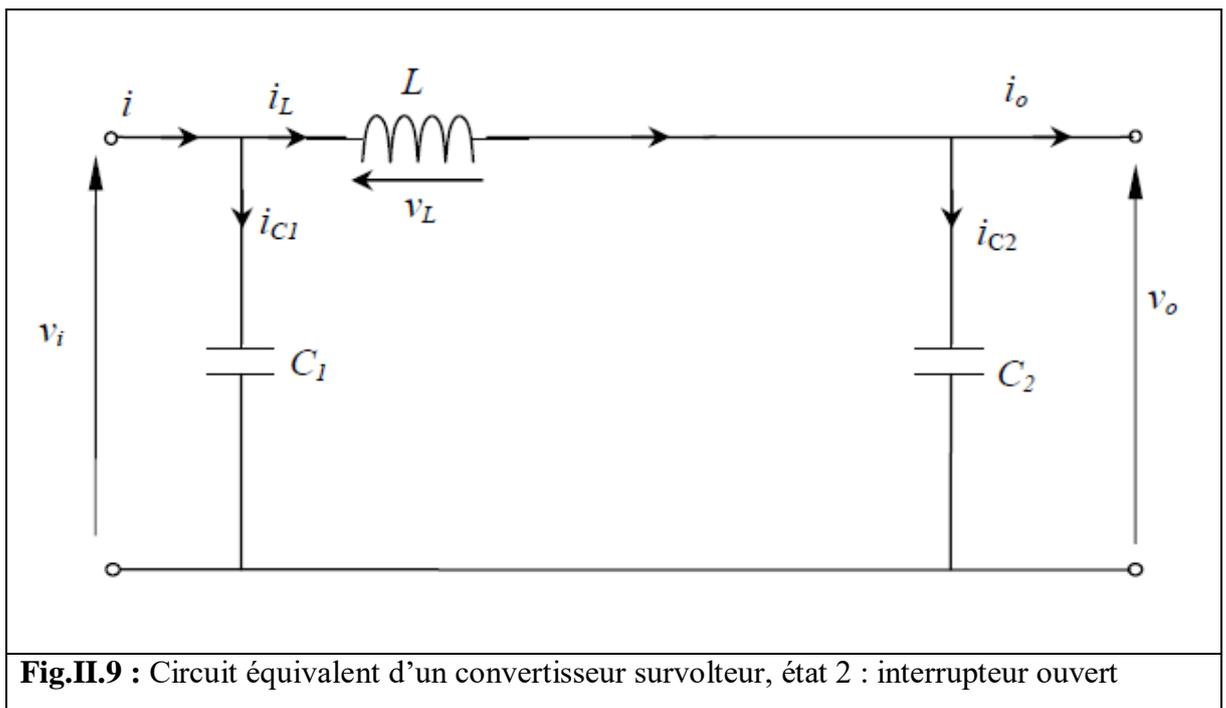
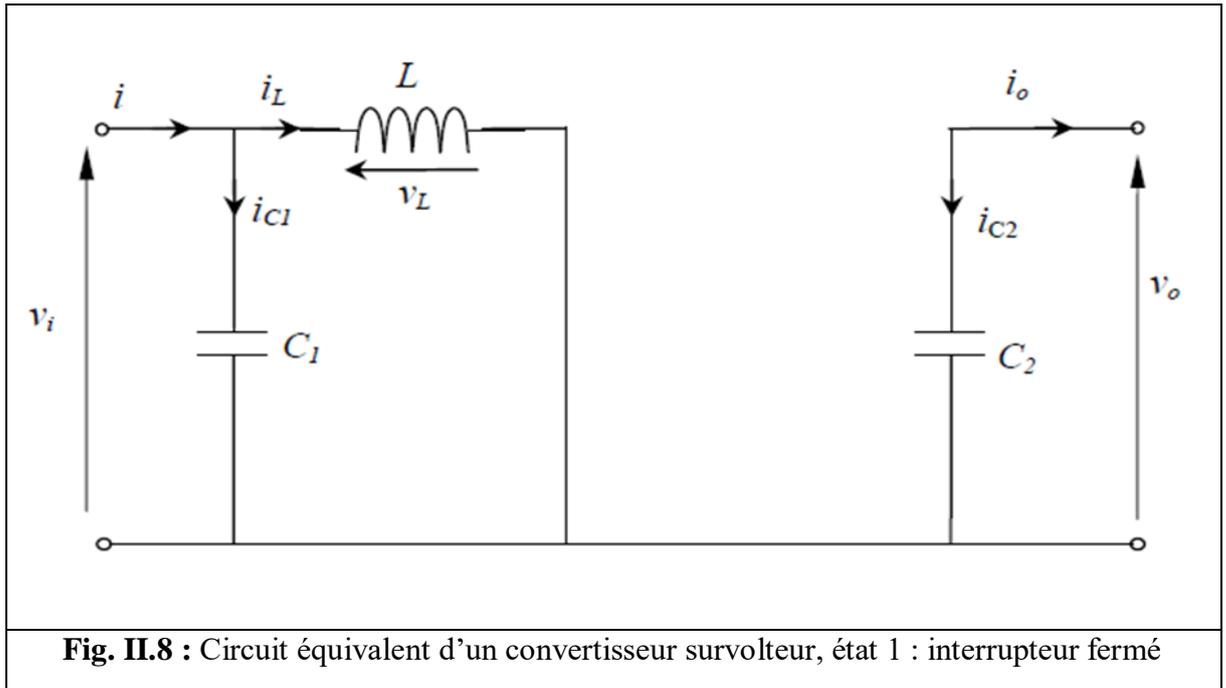


Fig. II. 7 : Circuit typique d'un convertisseur survolteur.



II.2.1.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs Buck et boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension DC d'entrée en n'importe quelle tension DC de sortie désirée [23].

a) Modèle mathématique du circuit équivalent

La Figure.II.10 montre un convertisseur Buck-boost idéal. Les deux circuits équivalents de ce convertisseur pour les deux intervalles de commutation αT_s et $(1-\alpha) T_s$ sont montrés sur la Figure.II.11 et la Figure.II.12 respectivement. Comparé aux convertisseurs dévolteur et survolteur, la tension de sortie (V_0) est de polarité inverse de celle d'entrée (V_i)

En premier intervalle αT_s (Figure.II.11), l'interrupteur S est fermé et un courant commence à circuler traversant l'inductance L, où elle se charge d'énergie jusqu'au début du deuxième intervalle de temps $(1-\alpha) T_s$. Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert (Figure.II.12), l'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la charge. En appliquant les lois de Kirchhoff aux circuits équivalents (Figure.II.11 et Figure.II.12), on obtient [23] :

Pour le premier intervalle de temps αT_s :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.13})$$

$$i_{C2}(t) = L \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \quad (\text{II.14})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.15})$$

Et pour le deuxième intervalle $(1-\alpha) T_s$:

$$i_{C1} = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \quad (\text{II.16})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_L(t) - i_0(t) \quad (\text{II.17})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_0(t) \quad (\text{II.18})$$

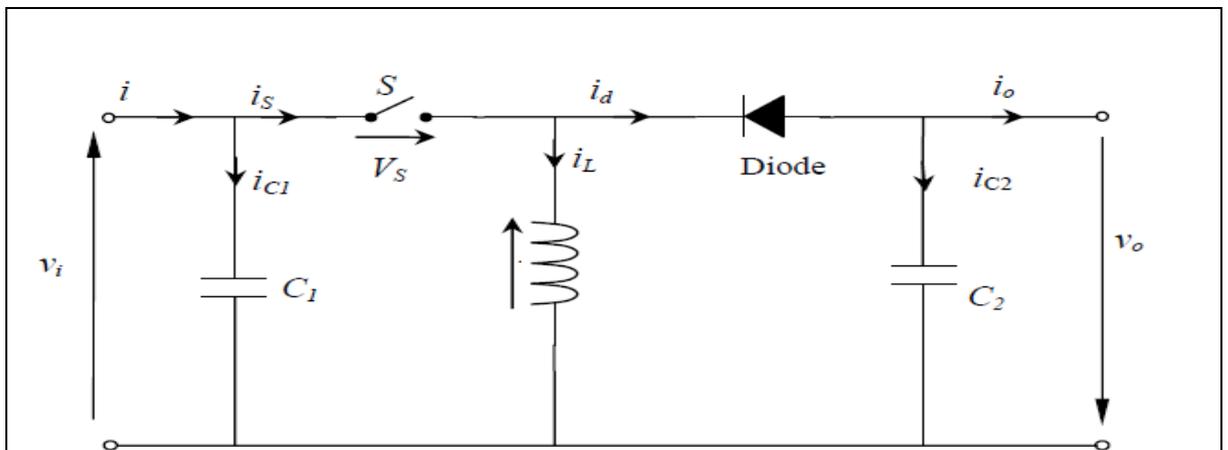


Fig. II.10 : Circuit typique d'un convertisseur dévolteur-survolteur.

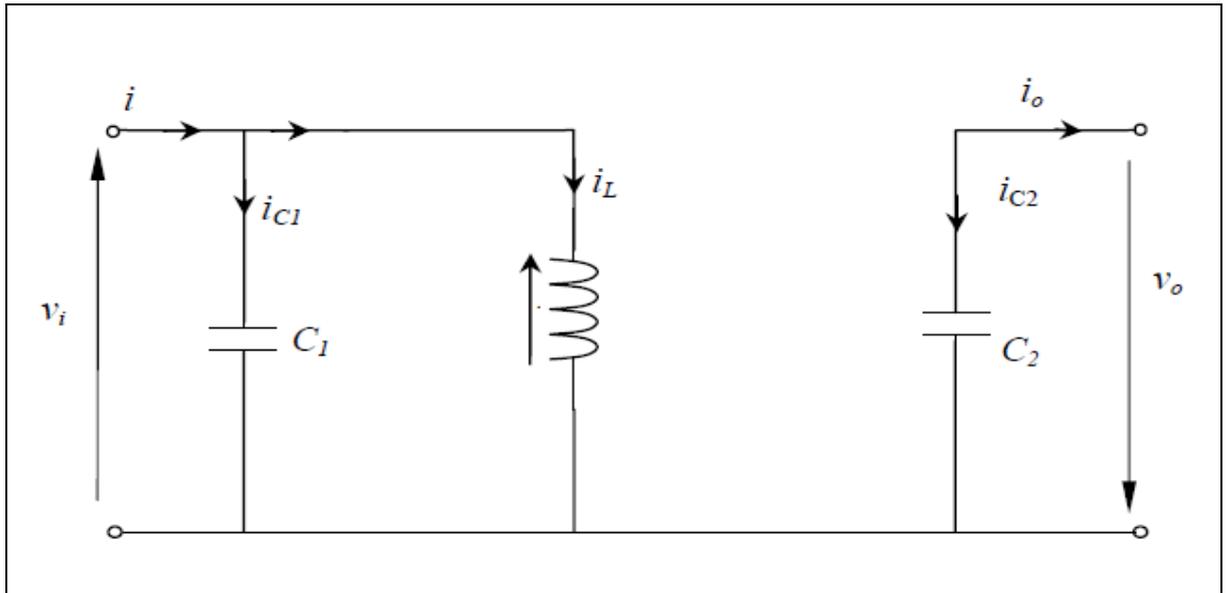


Fig.II.11 : Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur-survolteur, état 1 : interrupteur fermé

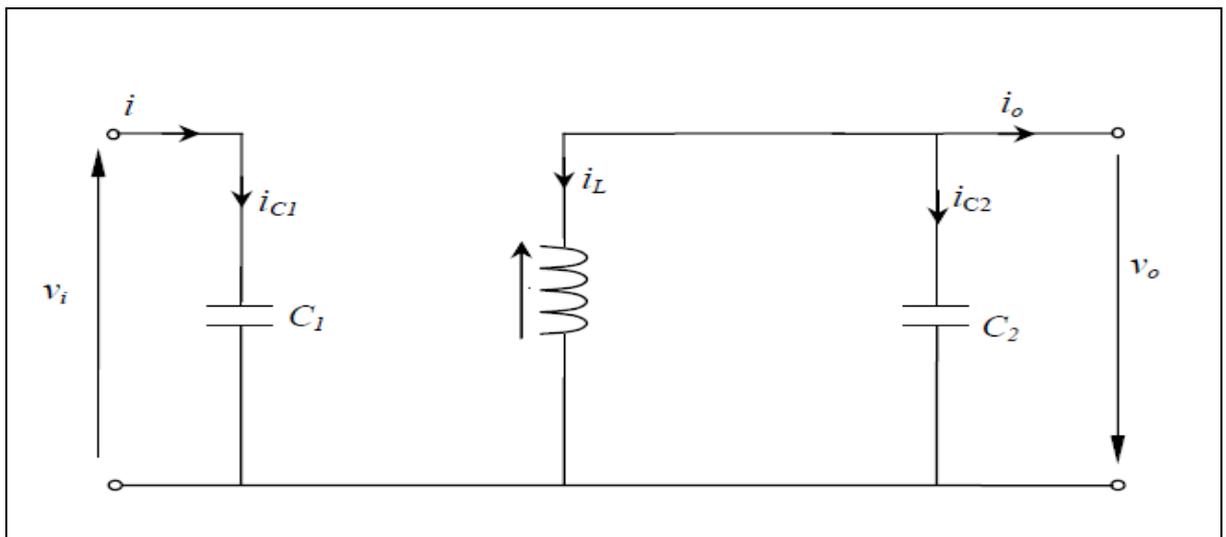
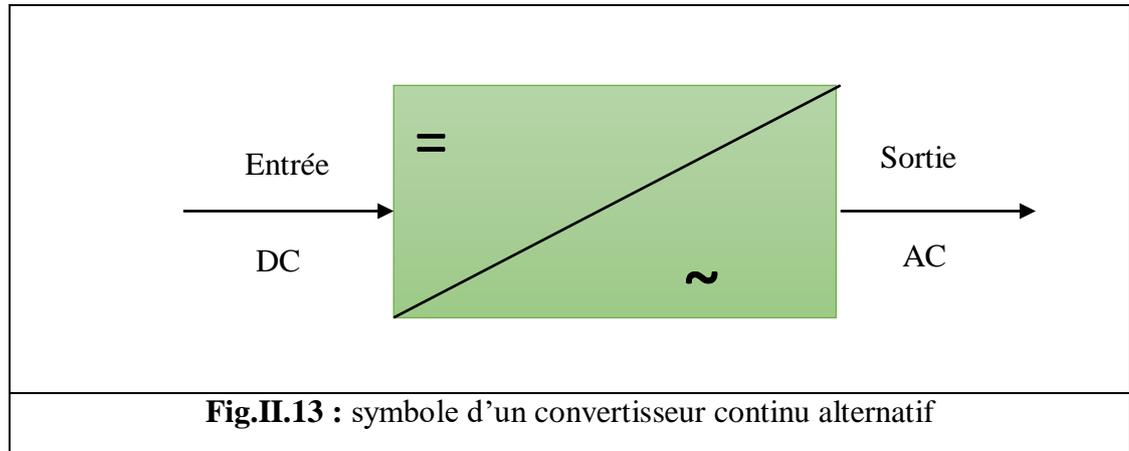


Fig.II.12 : circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur-survolteur, état 2 : interrupteur ouvert

II.3 Modélisation de convertisseur DC/AC

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux

bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [24].



II.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [25].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II.3.1.1 Onduleur triphasé

Afin de convertir la tension à la sortie du générateur photovoltaïque en tension alternative on doit utiliser un onduleur de tension MLI. Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif ; il permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée [21]

II.3.2 La commande à MLI

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse With Modulation ou Modulation de la Largeur d'Impulsion en Français) est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de 120° à la même fréquence f [21].

II.3.2.1 Caractérisation de la modulation

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

- **L'indice de modulation m** , égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de la référence (modulante).

$$m = \frac{f_p}{f_m} \text{ Avec } m > 1 \quad (\text{II.19})$$

On choisit généralement m supérieure à l'unité parce que l'augmentation mène au déplacement des harmoniques vers des fréquences élevés. Dans la simulation on constate que les valeurs très élevées de m provoquent une augmentation des déchets de tension, ce qui nous oblige à optimiser la valeur de m .

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.20})$$

- **Le coefficient de réglage en tension ' r '**, égal au rapport de l'amplitude de la tension de la référence sur celle de la porteuse [21].

II.3.2.2 Modèle de l'onduleur triphasé de tension

Le modèle typique d'un onduleur MLI de tension triphasée est présenté dans la figure II.14. S_1 à S_6 représentent les six interrupteurs de puissances qui forment la sortie. Ces interrupteurs sont contrôlés par les signaux de commandes a , a' , b , b' , c et c' . Vu la symétrie de construction, la commande c est faite par bras. Ce dernier comporte deux interrupteurs qui sont

complémentaires. Ainsi pour le premier bras, nous pouvons écrire [26] :

$a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé.

$a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.

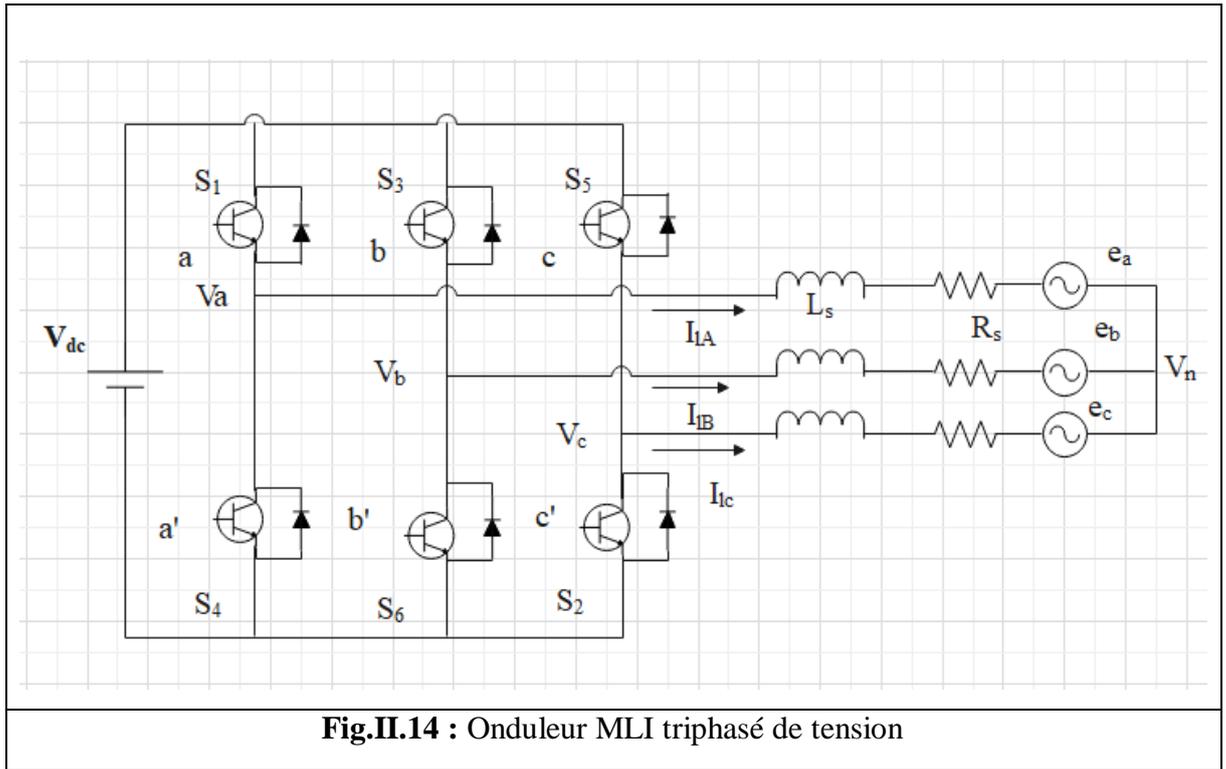


Fig.II.14 : Onduleur MLI triphasé de tension

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc} (a - b) \\ V_{bc} = V_{dc} (b - a) \\ V_{ca} = V_{dc} (c - a) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

La relation entre le vecteur de variables d'interruptions $[a, b, c]^t$ et les tensions composées $[V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ca}]^t$ est exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Également, la relation entre le vecteur de variables d'interruptions $[a, b, c]^t$ et les tensions simple de phase $[V_a \ V_b \ V_c]^t$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les convertisseurs continu-continu et les types de convertisseur, Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur.

Lorsque on a un système raccordé avec batterie nous avons utilisé convertisseur (Boost-Buck) pour assurer le transfert d'énergie dans les deux sens (charge/décharge). Et aussi L'onduleur triphasé à MLI est nécessaire dans le système d'énergie hybride, afin d'alimenter les charges AC.

***CHAPITRE III : TECHNIQUE DE
COMMANDE D'UN SYSTÈME HYBRIDE
AUTONOME***

III.1 Introduction

Les performances d'un système hybride autonome sur des conditions d'éclairement et de température et aussi dépendent essentiellement de la technique de régulation et contrôle adoptée, et pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques.

Pour optimiser le fonctionnement du système hybride autonome, nous avons employons la technique de commande appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. et d'autre part La batterie est le principal élément dans un système hybride autonome, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur. Sa durée de vie est étroitement liée une technique de commande de la manière dont elle est chargée et déchargée.

Ce chapitre sera consacré à des méthodes de poursuite du point de puissance maximal appliquées au système et des Stratégies de commande des unités de stockage (batteries)

III.1.1 Schéma du système à étudier

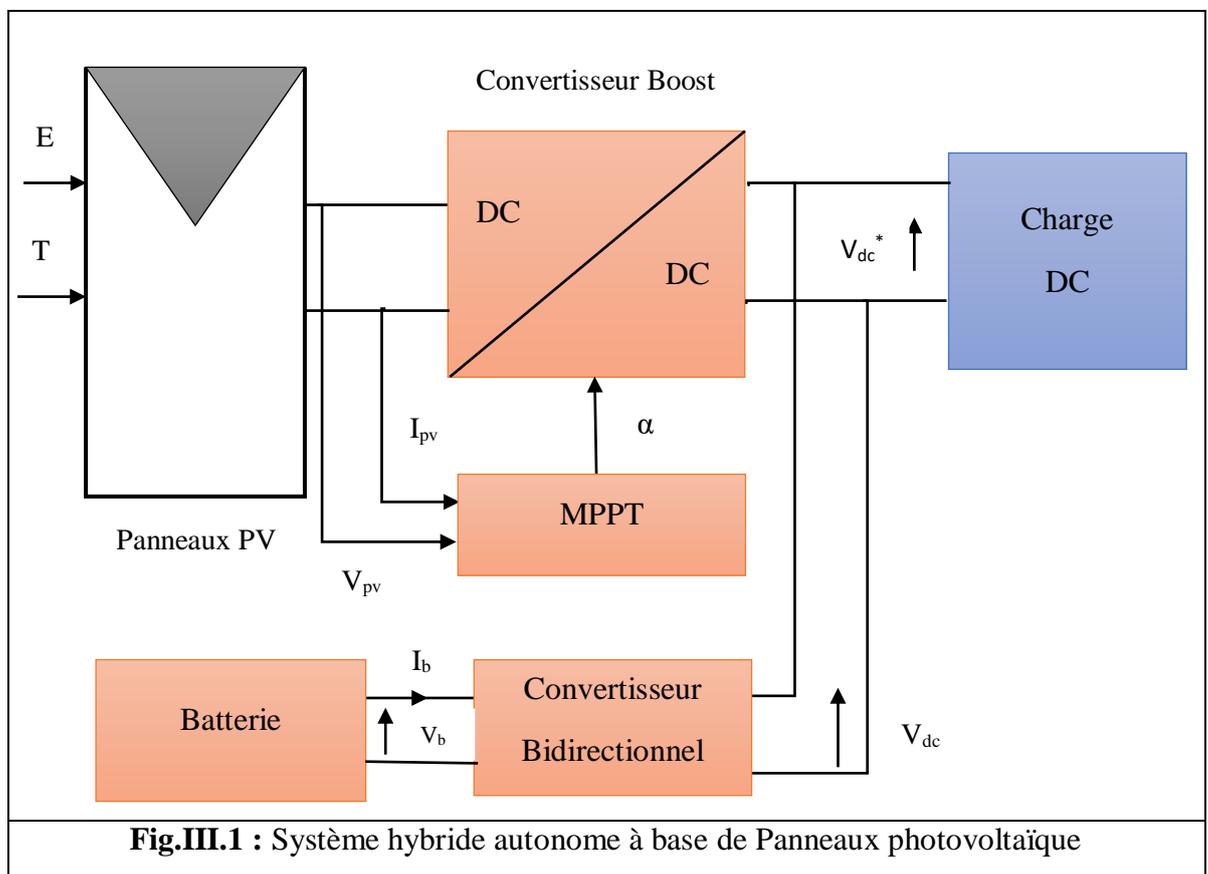


Fig.III.1 : Système hybride autonome à base de Panneaux photovoltaïque

III.2 Méthodes de poursuite de point de puissance maximale MPPT

III.2.1 Principe de commande 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, quelles que soient les conditions météorologiques (température éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [27]

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

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique α du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [28].

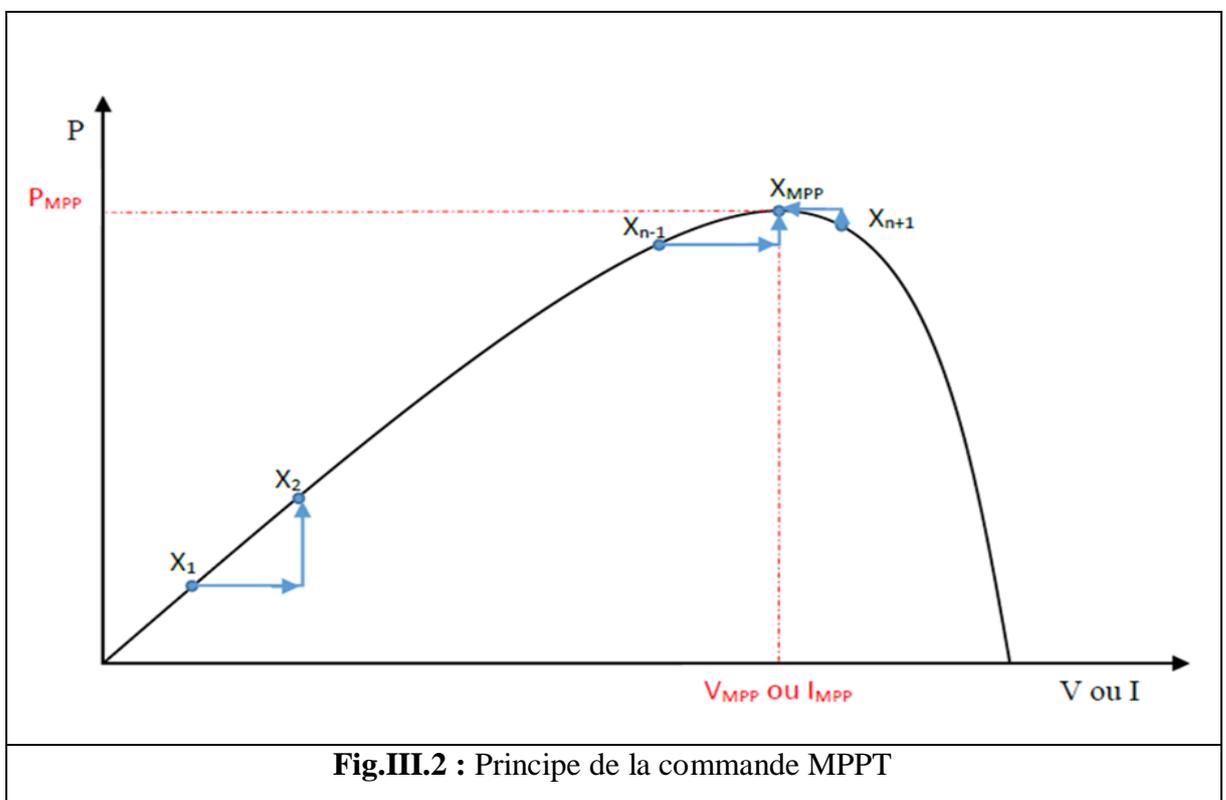


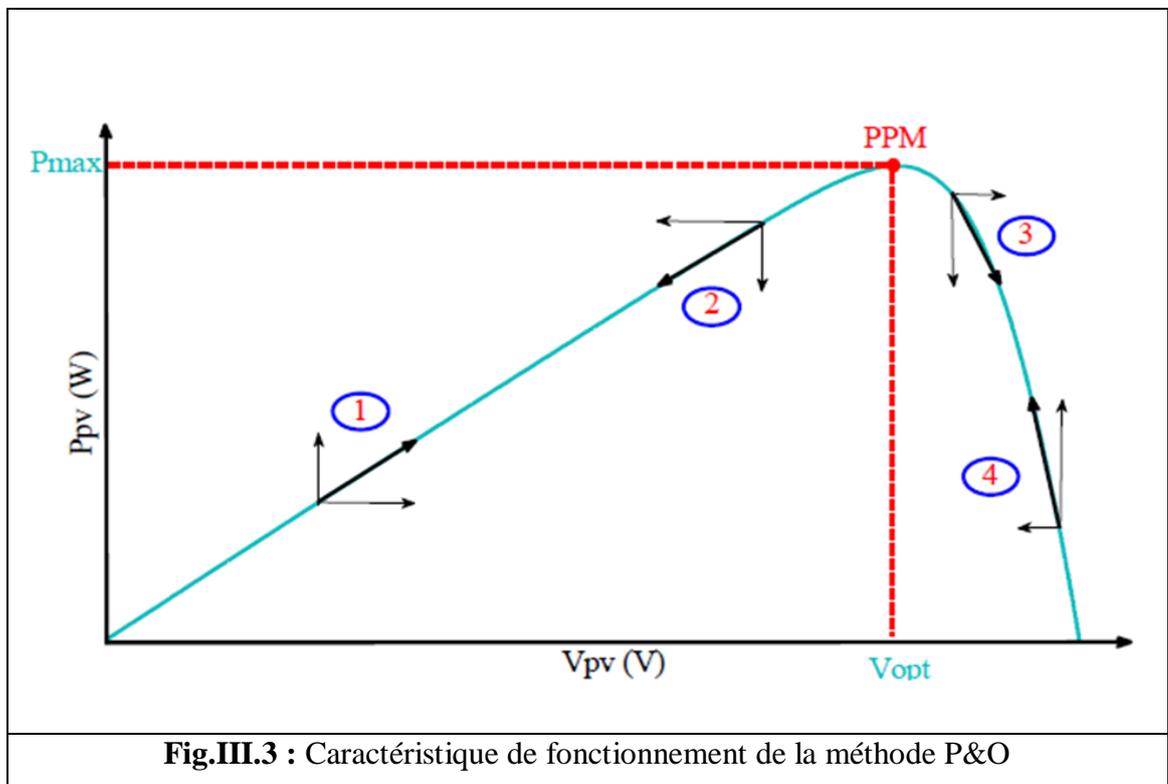
Fig.III.2 : Principe de la commande MPPT

III.2.2 Les techniques de commande MPPT

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance. Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont [29]

III.2.2.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O)

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est de type « hill climbing » (mot anglais qui veut dire « grimper une colline »). Il est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure III.3 et récapitulés dans le Tableau III.1 [30]



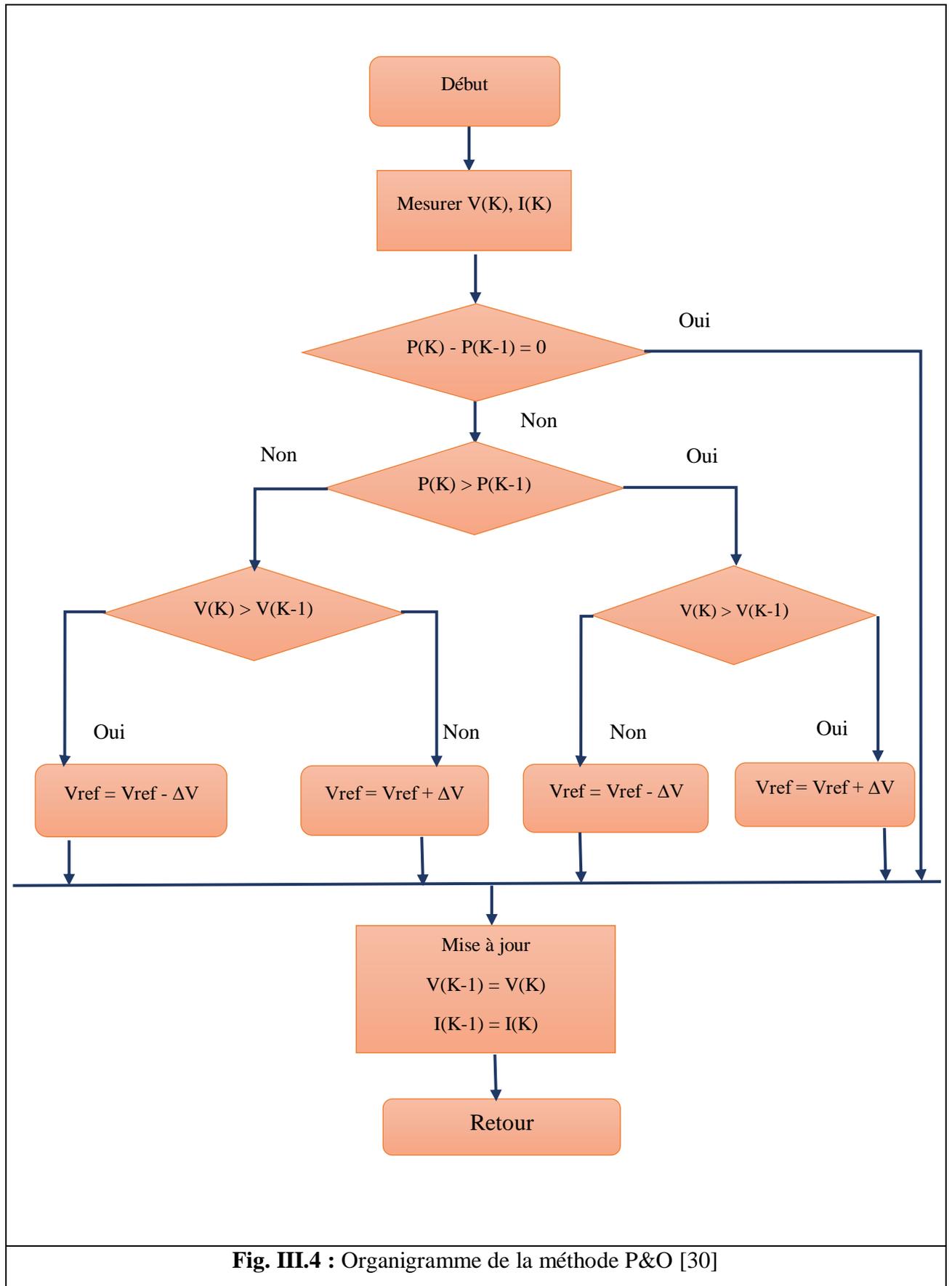
Tab.III.1 : Principe de l'algorithme P&O [30]

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la Poursuite	Action de Contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

L'algorithme P&O (Figure III.4) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est :

- L'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentement mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.



III.2.2.2 Algorithme d'incrémentation de la conductance

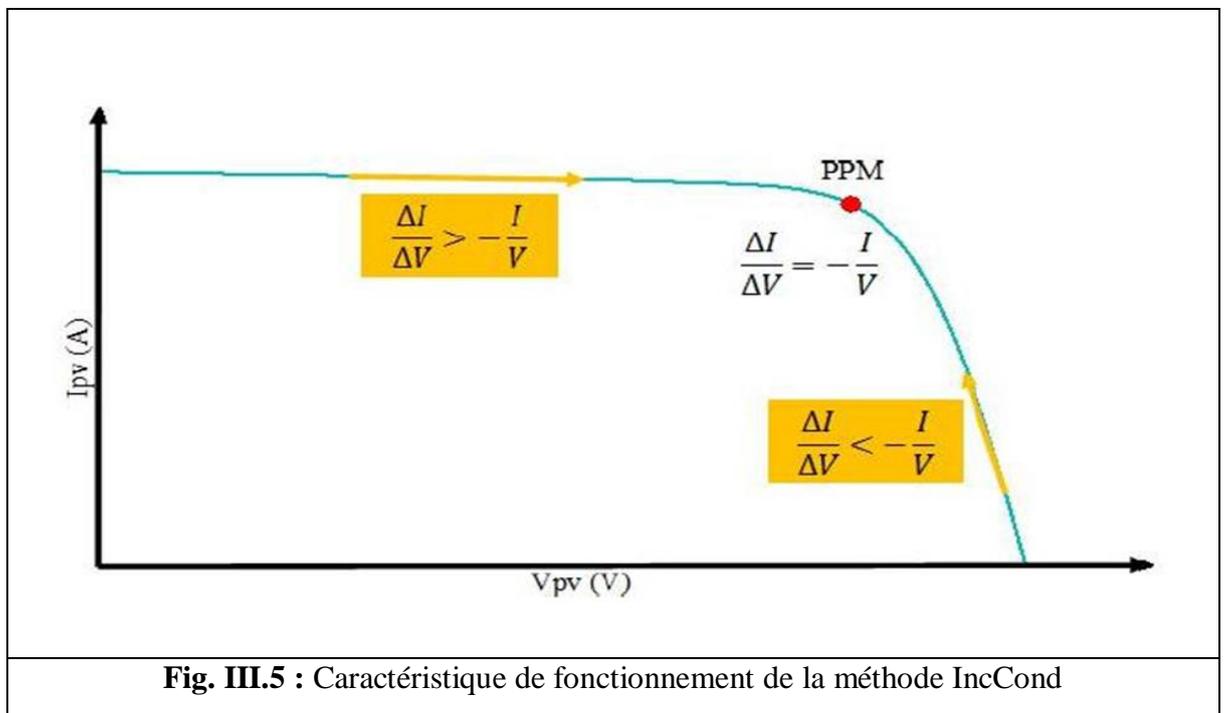
L'algorithme d'incrémentation de conductance (IncCond), appelée dans la littérature anglo-saxonne « Incremental Conductance », est aussi l'une des techniques de « HC » où la commande MPPT essaye de faire monter le point de fonctionnement (PF) du GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Elle permet la recherche du PPM en se basant sur l'égalité de la conductance [30].

($G = I/V$) et de l'incrément de la conductance ($\Delta G = \Delta I / \Delta V$) (voir la figure III.5). Cet algorithme nécessite la connaissance de la valeur initiale du PF (V_{ref}) et le pas de mise à jour de la tension de référence (ΔV) (Figure III.6).

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule :

$$\frac{dp}{dv} = v \frac{di}{dv} + I \simeq v \frac{\Delta I}{\Delta v} + I \quad (\text{III.1})$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées [30] :



$$\text{Si } \frac{dP}{dV} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ le PF est sur le PPM}$$

Si $\frac{dp}{dv} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta v} > -\frac{I}{\Delta}$, le PF est à gauche du PPM

Si $\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{\Delta}$, le PF est à droite du PPM

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Ceci peut être un remède au problème de l'algorithme P&O. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide. Autrement dit, l'exécution de la commande IncCond nécessite plus de temps par rapport P&O.

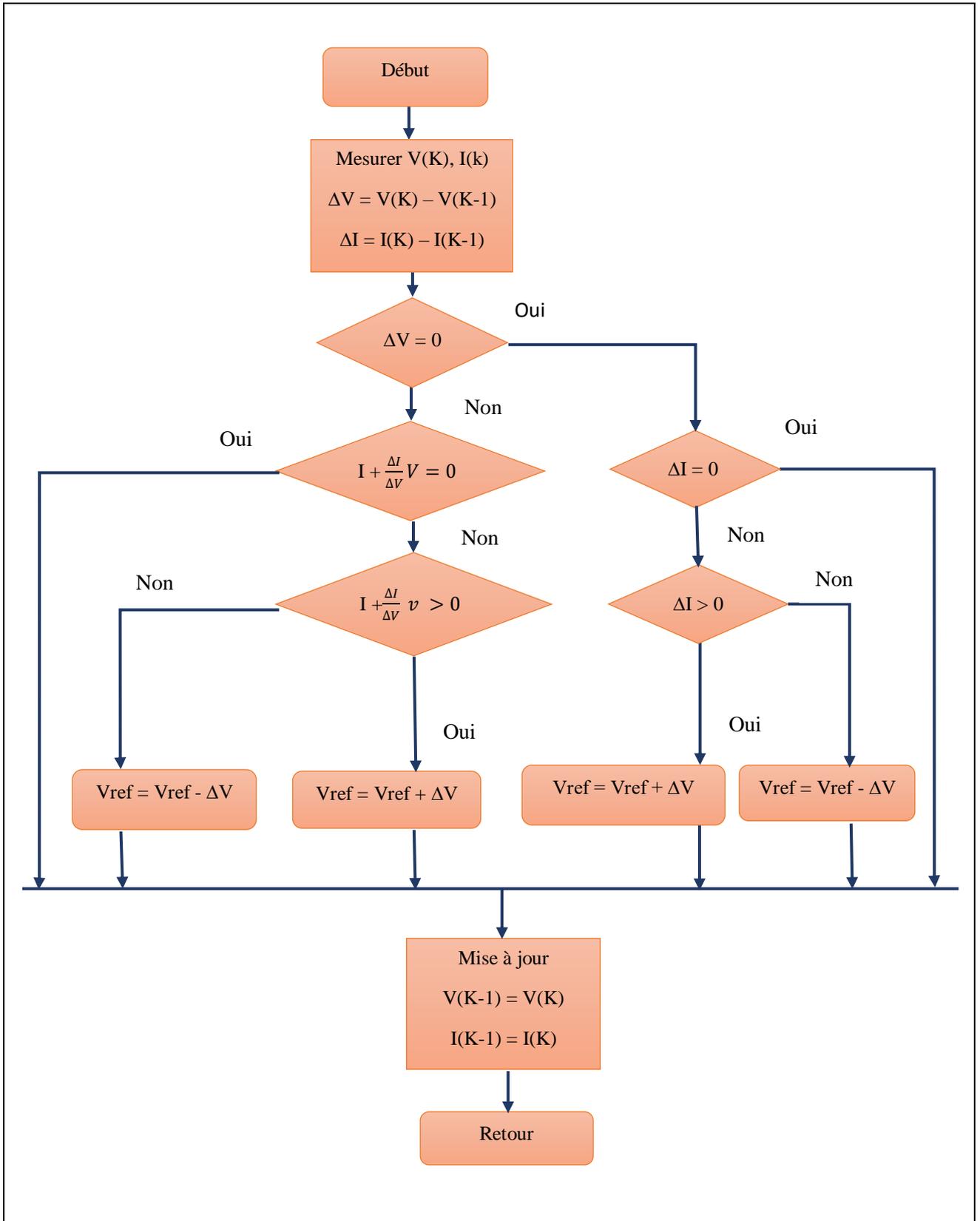


Fig. III.6 : Organigramme de la méthode IncCond

III.2.2.3 Commande MPPT par la logique floue

La mise en œuvre de la commande logique floue (Fuzzy Logic Control) se fait en trois étapes : la fuzzification, la lecture de la table de vérité et la défuzzification. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et la variable de sortie est la variation du rapport cyclique $\Delta\alpha$. En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur E et le changement d'erreur ΔE sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit [30] :

$$E_{(n)} = \frac{P_{(n)} - P_{(n-1)}}{V_{(n)} - V_{(n-1)}} \quad (\text{III.2})$$

$$\Delta E_{(n)} = E_{(n)} - E_{(n-1)} \quad (\text{III.3})$$

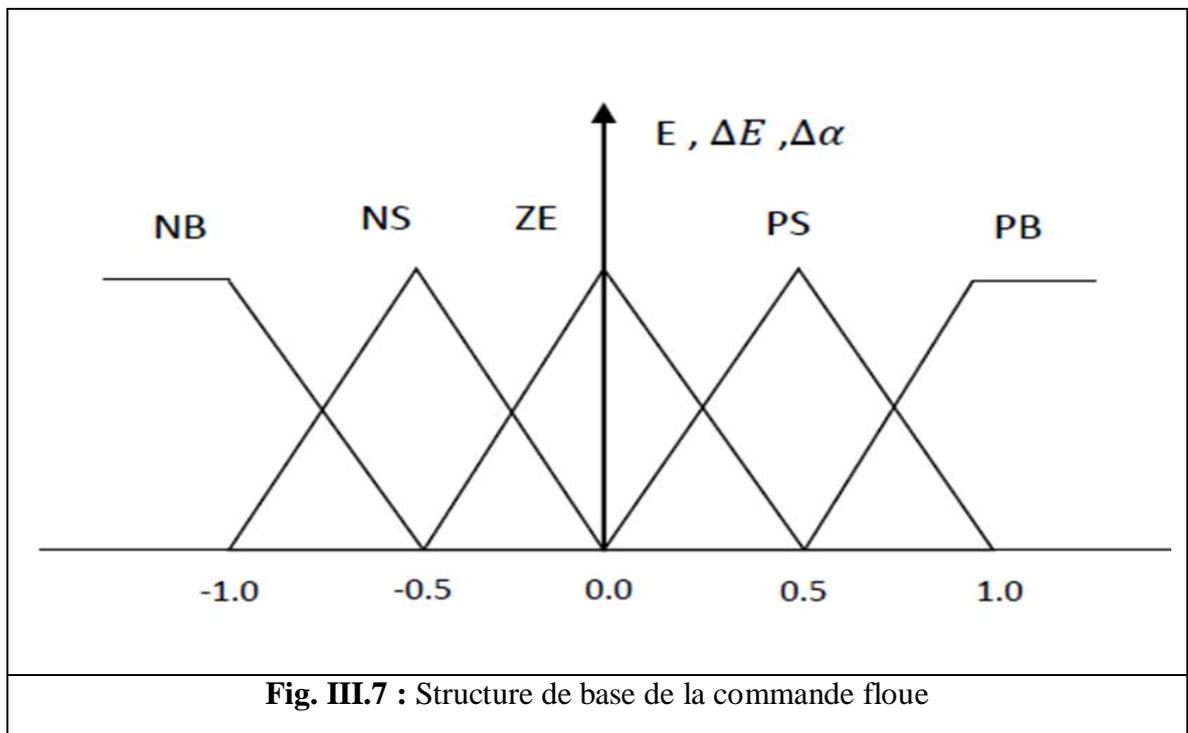


Fig. III.7 : Structure de base de la commande floue

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre les cinq valeurs suivantes (Figure III.7) : NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big). Il existe des commandes qui ajoutent aux valeurs précédentes deux autres valeurs qui sont : NM (Negative Means) et PM (Positive Means).

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta\alpha$.

Tab.III.2 : Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue [30]

ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
E					
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un PF très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le PF et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La défuzzification, consiste à convertir la variable de sortie $\Delta\alpha$ d'une variable linguistique en une variable numérique.

III.2.2.4 Méthode de la tension de circuit ouvert

Sous différents niveaux d'ensoleillement et de température, la tension du générateur PV au point de puissance maximale V_{mpp} peut être considérée comme une fraction constante de sa tension en circuit ouvert V_{oc}

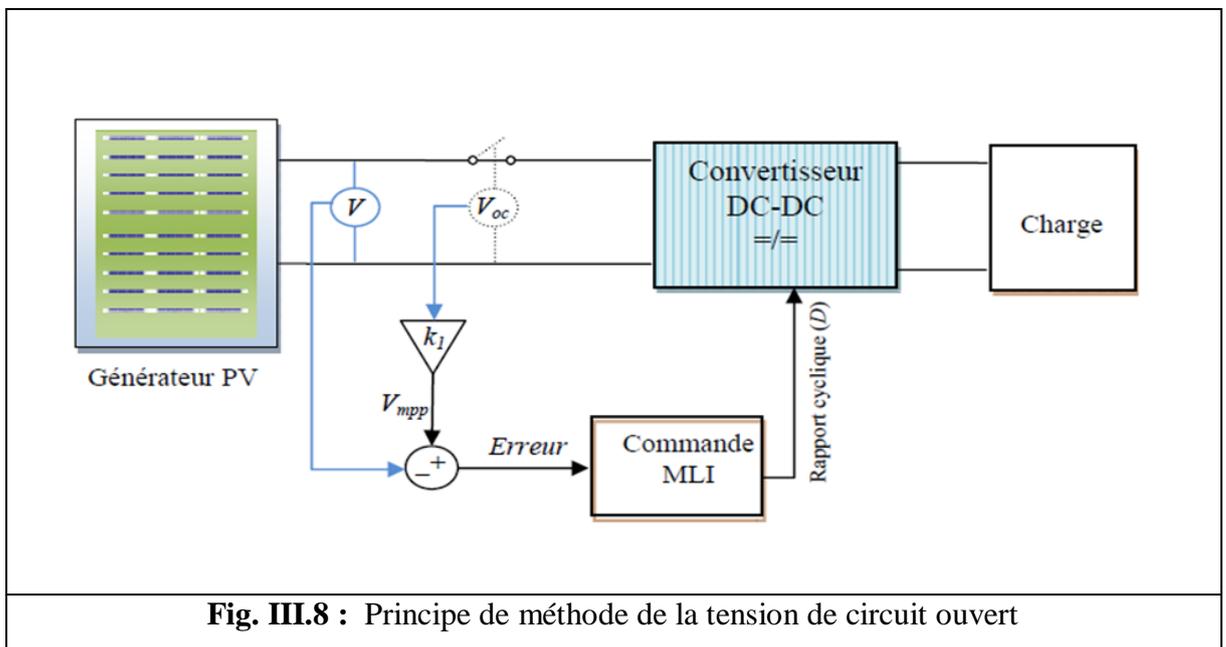
$$V_{mpp} \approx K_1 V_{oc} \quad (III.4)$$

Où k_1 est un facteur de proportionnalité. Vu que k_1 est fonction des paramètres du module PV utilisé, il doit être généralement calculé préalablement en déterminant empiriquement V_{mpp} et V_{oc} pour un module PV spécifique sous différentes valeurs d'ensoleillement et de température. Il est constaté que la valeur de k_1 varie entre 0,71 et 0,92.

Une fois k_1 connu, la tension V_{mpp} est calculée en utilisant l'équation (III.4), avec V_{oc} mesuré périodiquement en déconnectant le convertisseur DC-DC pour une fraction de seconde.

La tension de référence (V_{mpp}) est comparée avec la tension de fonctionnement du générateur PV pour générer un signal d'erreur qui est utilisé comme entrée pour la commande MLI (modulation de largeur d'impulsion) du convertisseur DC-DC, (Figure III.8).

Cette méthode peut être facile à implémenter analogiquement. Cependant, l'efficacité de poursuite de la MPPT est faible par rapport à celle des autres méthodes. La principale raison est la perte temporaire d'énergie (pendant la mesure de la tension de circuit ouvert) et ainsi, la tension V_{mpp} n'est pas toujours à un pourcentage fixe de V_{oc} . Pour éviter ce problème, des cellules pilotes sont utilisées à partir de laquelle V_{oc} peut être obtenue [23].



III.2.2.5 Méthode du courant de court-circuit

Cette méthode est similaire à la méthode précédente ; mais elle fonctionne avec le courant au lieu de la tension. Dans ce cas, le courant optimal I_{mpp} du générateur PV est un pourcentage fixe du courant de court-circuit I_{sc} dans différentes conditions atmosphériques.

$$I_{mpp} = K_2 I_{sc} \quad (III.5)$$

Où k_2 est une constante de proportionnalité, et varie entre 0,78 et 0,92. La mesure du courant I_{sc} pendant le fonctionnement pose des problèmes. Un commutateur supplémentaire doit généralement être ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter périodiquement le générateur PV de telle sorte que I_{sc} puisse être mesurée en utilisant un capteur de courant. Cela augmente le nombre de composants et le coût.

Pour garantir une bonne performance de cette méthode en présence de multiple maxima locaux, on peut mettre à jour le K_2 en balayant périodiquement la tension du générateur PV du point de circuit ouvert jusqu'au point de court-circuit [23].

III.2.2.6 Commande P&O améliorée

La commande P&O classique recherche le PPM en faisant une perturbation sur la tension du G_{PV} .

Si la tension est perturbée dans une direction donnée, et cette perturbation engendre une Augmentation de la puissance. Cela signifie que le PF est déplacé vers le PPM. Par conséquent, la tension de fonctionnement doit être encore perturbée dans la même direction. Sinon, si la puissance diminue, le PF s'éloigne du PPM ; et par conséquent, la direction de la perturbation doit être inversée. La procédure continue jusqu'à ce que le PPM soit atteinte et le PF reste oscillant autour de ce PPM.

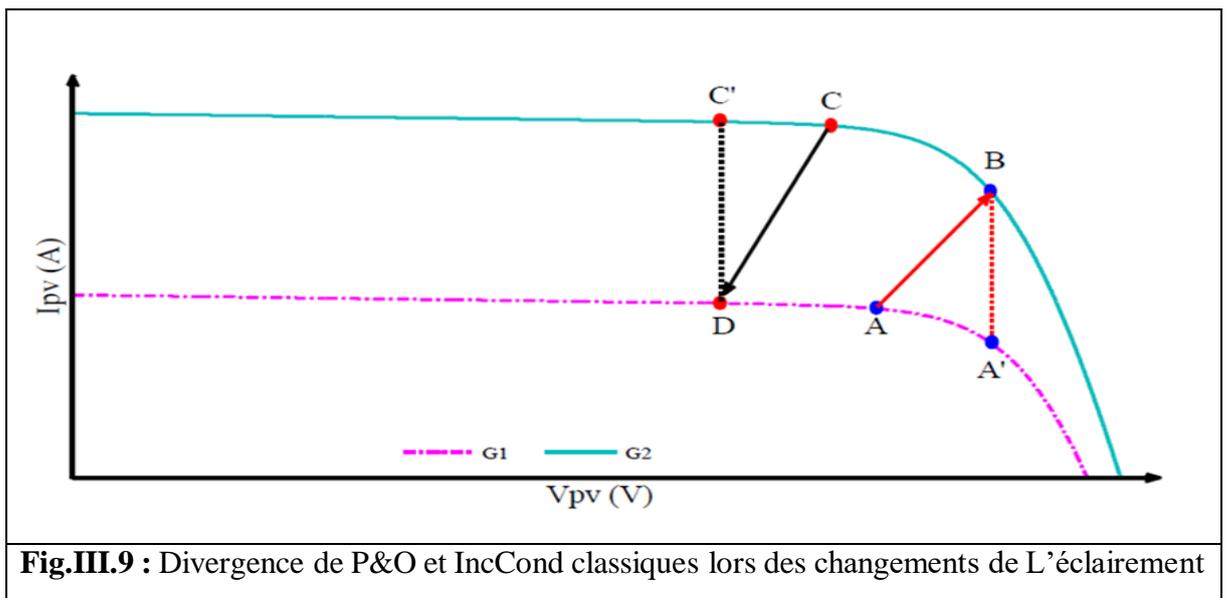


Fig.III.9 : Divergence de P&O et IncCond classiques lors des changements de L'éclairement

La technique P&O améliorée utilise le principe de la caractéristique I-V du panneau solaire pour éviter la divergence dans le cas de changement brusque des conditions atmosphérique. Pour des conditions de fonctionnement fixes d'éclairement et de température, une perturbation sur la tension engendre une perturbation de sens opposé sur le courant, comme le montre la figure. Sinon, le système s'est déplacé en changement rapide des conditions climatiques. Par conséquent, il est obligatoire de changer la direction de perturbation pour éviter la divergence. Ce principe est expliqué dans la figure, considérant deux niveaux d'ensoleillement $G_1 < G_2$. Si

le PF se déplace de A vers A' ou de C vers C', le système est dans des conditions normales. Cependant, si le PF se déplace de A vers B ou de C vers D, le système est dans des conditions de changement brusque. La figure illustre l'organigramme de P&O modifié [30].

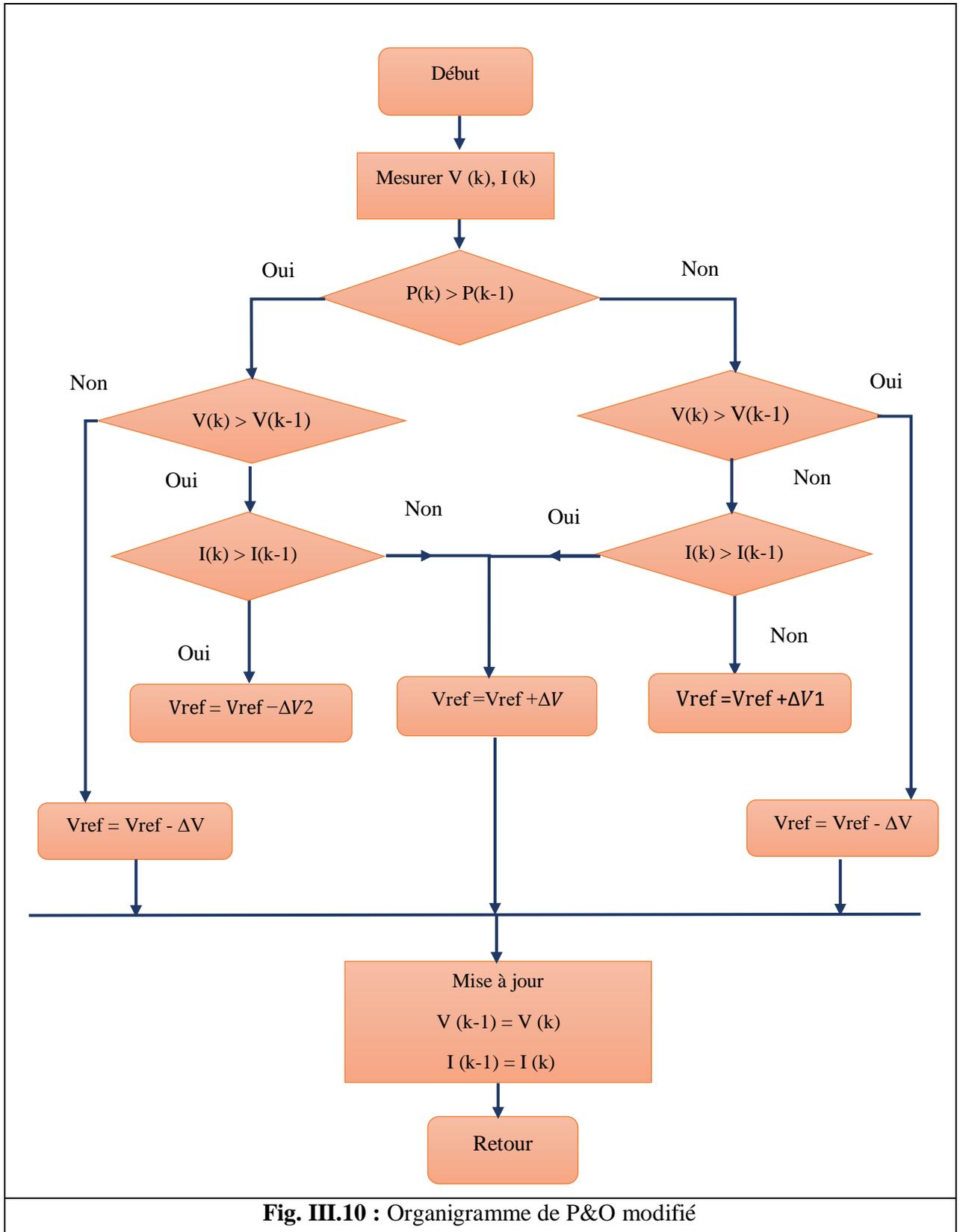


Fig. III.10 : Organigramme de P&O modifié

III.2.2.7 Commande IncCond améliorée

La commande IncCond modifiée améliore la poursuite du PPM par rapport à la commande IncCond classique en utilisant le principe de la caractéristique courant-tension illustré dans la figure. Si en faisant une perturbation positive ou négative sur la tension du panneau et on observe respectivement une variation positive ou négative sur le courant, on dit que le système est dans le cas de changement rapide. Par conséquent, l'acte à appliquer doit être le contraire de celui de l'algorithme classique. Plus de détails est présenté sur l'algorithme de la figure III.11[30].

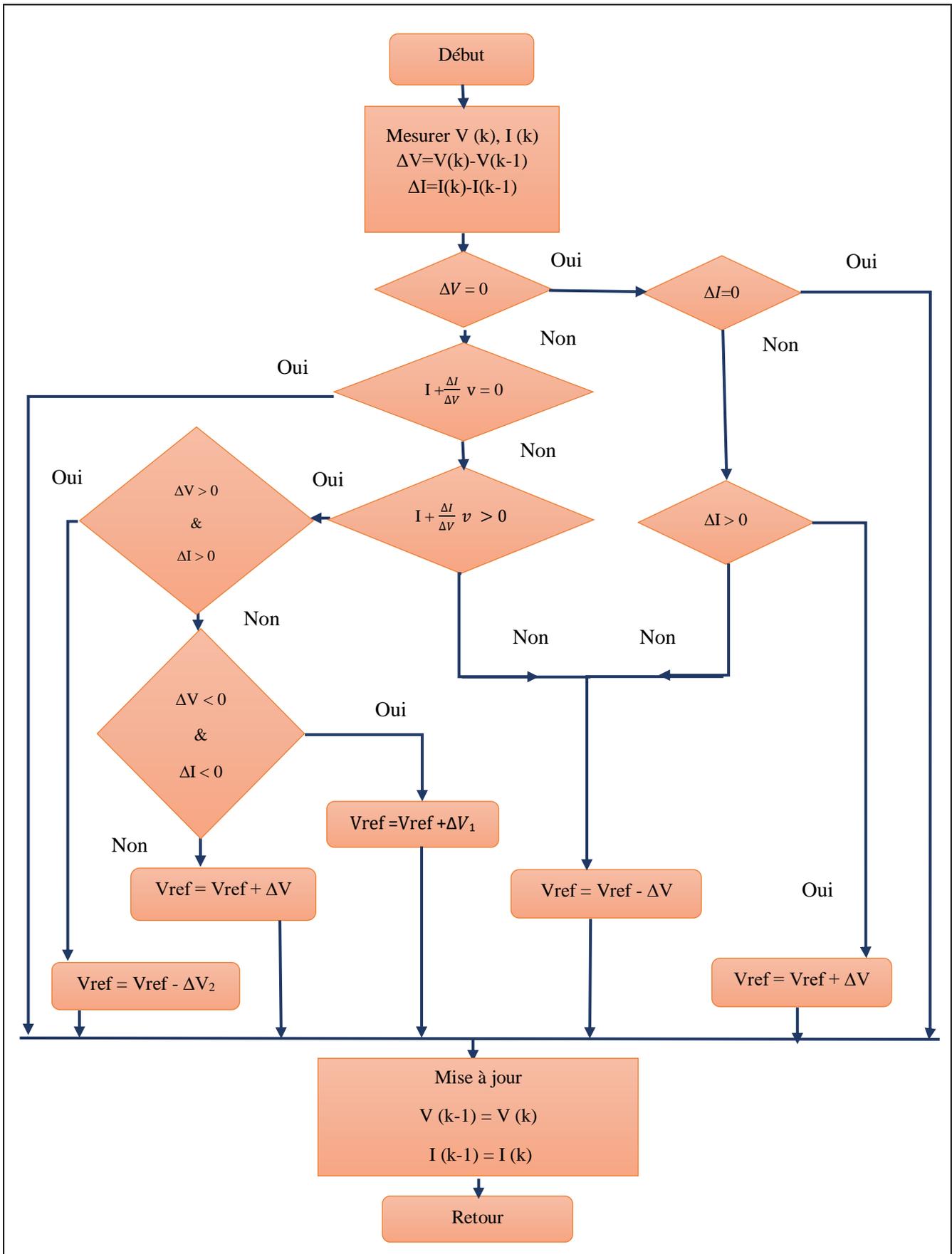


Fig.III.11 : Organigramme d'IncCond modifié

III.3 Stratégies de commande des unités de stockage

Pour la conception d'un système hybride autonome avec stockage, une étude est nécessaire, Nous allons présenter en cette partie un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de contrôler les échanges d'énergies entre les différents composants. Ce système de gestion permet aussi le contrôle de l'état de charge de la batterie, pour une protection contre les surcharges et les décharges profondes.

Dans la figure (III.12) ce dernier a deux modes de fonctionnement d'un convertisseur bidirectionnel :

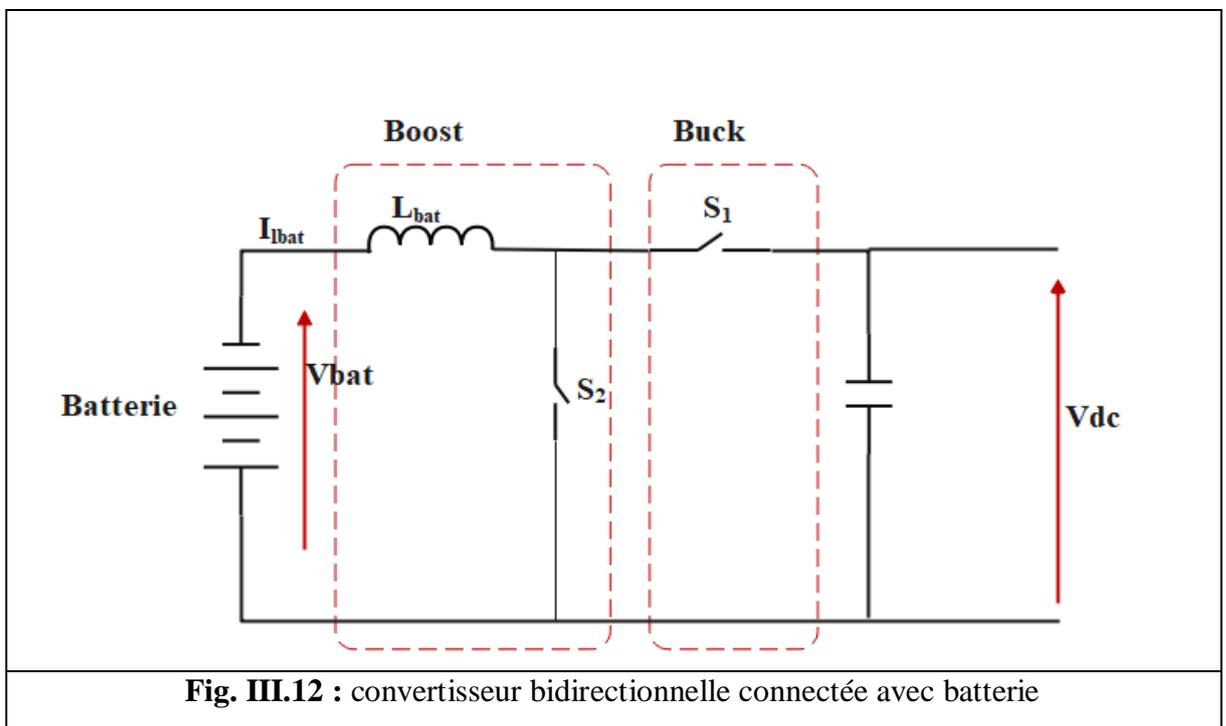


Fig. III.12 : convertisseur bidirectionnelle connectée avec batterie

- Le mode de fonctionnement Boost ou (mode de décharge des batteries) : Dans ce dernier, nous cherchons que la tension du bus continu soit bien réglée, en utilisant des contrôleurs P-I, en cherchons aussi une séquence de décharge des batteries plomb acide et une protection de tous les composants du convertisseur Buck-Boost contre les surtensions et les surintensités [31].
- Le mode de fonctionnement Buck ou (mode de charge des batteries) : Dans ce dernier, le convertisseur Buck assure le transfert d'énergie fournie par les modules photovoltaïques aux batteries Plomb Acide, en plus il limite le courant de charge des batteries, ce dernier objectif est atteint par l'utilisation d'un contrôleur à hystérésis [31].

III.3.1 Contrôle de la tension du bus continu

Afin de maintenir la tension du bus continu dans une valeur fixe et exigée par le réseau, une batterie plomb-acide a été utilisée et interconnectées par un convertisseur élévateur- abaisseur bidirectionnel en courant permettant de contrôler. Le contrôle de la tension du bus continu sera effectué, et on a un modèle simplifié de cette batterie [6].

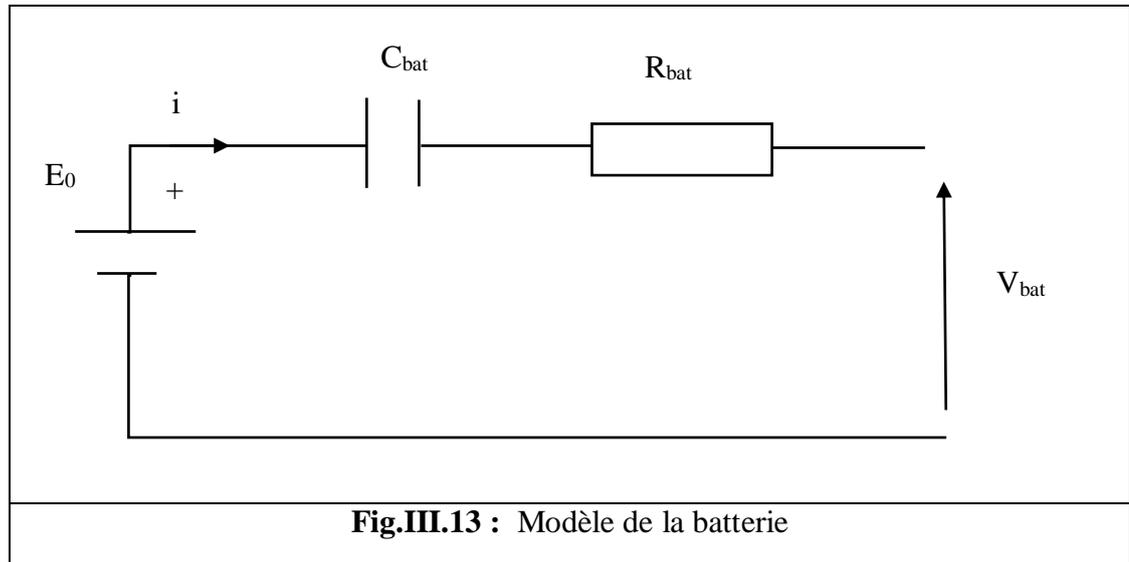


Fig.III.13 : Modèle de la batterie

L'équation pour le calcul de la tension de la batterie est la suivante :

$$V_{batt} = E_0 - iR_{in} - K \frac{Q}{Q-Q_{act}} + A \times \frac{Q-Q_{acr}}{Q} \quad (III.6)$$

E_0 : Tension à vide

A : Constante de fitting

R_{in} : La résistance interne

K : Constante de fitting

i : Courant de la batterie

Q : Capacité nominale

V_{batt} : Tension de la batterie

Q_{act} : Capacité actuelle de la batterie

Ce modèle calcule la tension aux bornes de la batterie, son état de charge EDC (State of Charge en anglais) et les pertes. On suppose que les pertes sont purement ohmiques pour simplifier le calcul on met ;

$$V_{batt} = E_0 - iR_{in} \quad (III.7)$$

III.3.1.1 Commande de régulateur PI

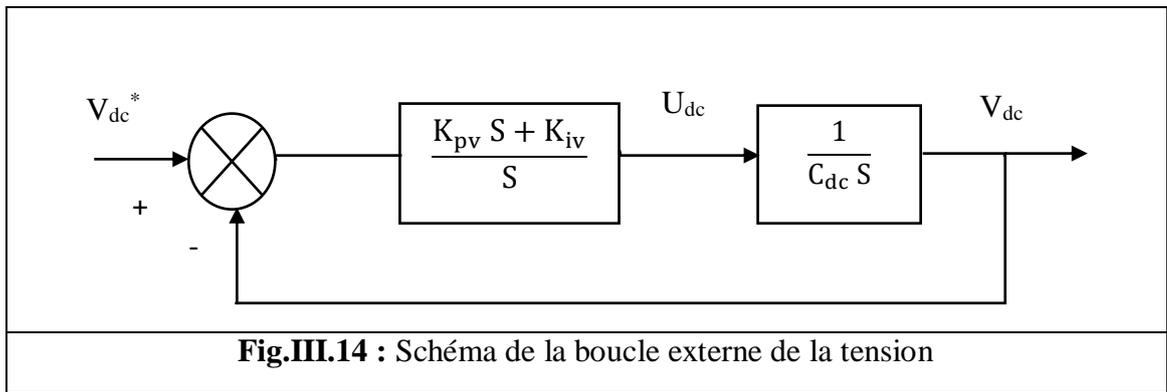
Le régulateur PI est beaucoup utilisé en raison de sa simplicité d'implémentation et sa

Possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique, quand ses paramètres sont bien réglés. Il va élaborer la commande de l'hacheur réversible en courant à partir du signal qui correspond à l'écart évalué entre la tension V_{dc} et la référence V_{dc}^* [15].

a) Boucle de régulation de la tension du bus DC

L'analyse de la boucle de tension est basée sur l'équation (4.12), on définit u comme étant l'entrée équivalente [32].

$$U_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (III.8)$$



Où

V_{dc} : L'erreur de tension V_{dc} ,

V_{dc}^* : la référence de tension V_{dc} .

La fonction de transfert G_v du régulateur s'écrit comme suite :

$$G_v = \frac{U_{dc}}{V_{dc}} K_{pv} \frac{S + \frac{K_{iv}}{K_{pv}}}{S} \quad (III.9)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{V_{dc}(S)}{V_{dc}^*(S)} = 2\xi\omega \frac{S + \frac{\omega}{2\xi}}{S^2 + \xi\omega S + \omega^2} = \frac{\frac{K_{pv}S + K_{iv}}{C_{dc}}}{S^2 + \frac{K_{pv}}{C_{dc}}S + \frac{K_{iv}}{C_{dc}}} \quad (III.10)$$

Par identification, on trouve :

$$K_{pv} = 2\xi\omega C_{dc} \quad (III.11)$$

Et :

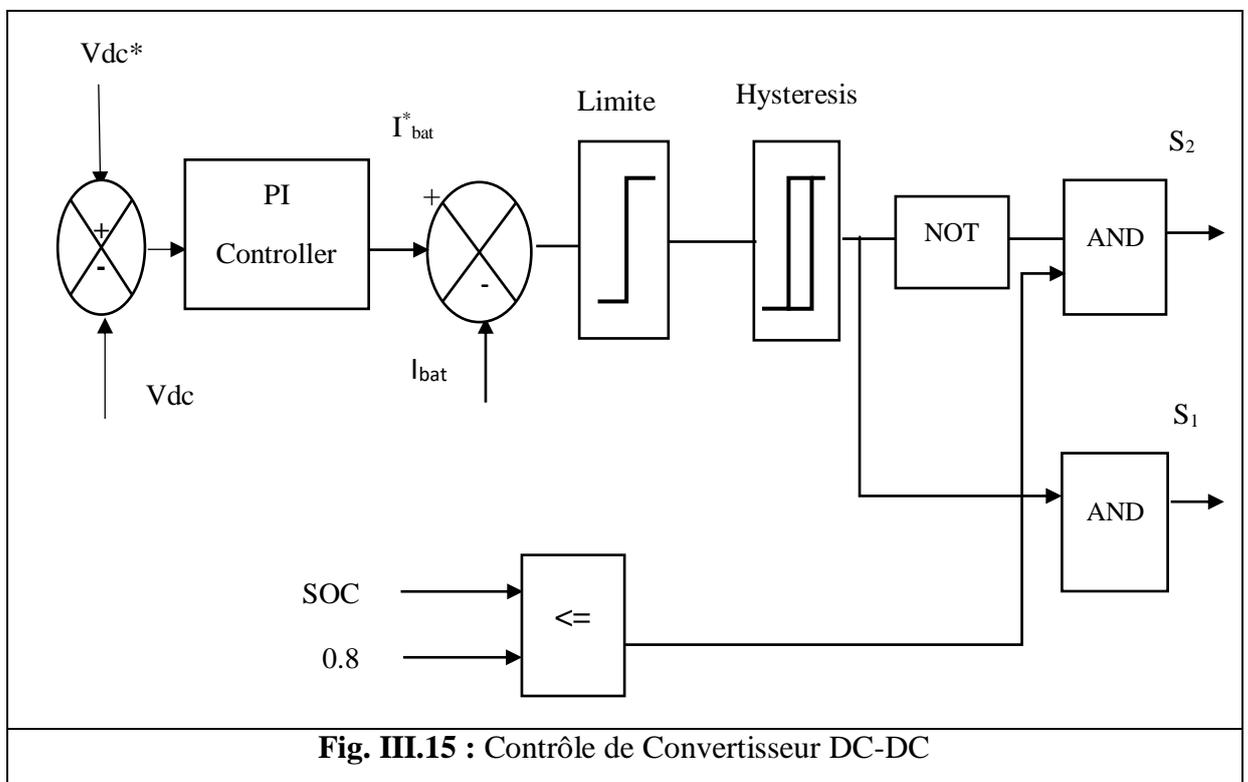
$$K_{iv} = \omega^2 C_{dc} \quad (\text{III.12})$$

III.3.2 Contrôle de charge et décharge

Le contrôleur de charge de la batterie est un dispositif très important dans la régulation des tensions de la batterie et du bus continu. Il a pour fonction principale la charge et la décharge en toute sécurité d'une batterie à décharge profonde aux taux de charge corrects et de protéger la batterie contre les surcharges et les surdécharges. La méthode de contrôle de la tension et du courant proposée pour le Système stockage est présentée à la (figure III.15). L'objectif est de maintenir la tension continue au niveau souhaité et d'obtenir la puissance requise. Le système stockage fonctionnera en mode de chargement ou de déchargement en fonction des besoins des besoins en énergie [33].

Lorsque la tension V_{dc} est inférieure à la tension V_{dc}^* , alors le courant de référence généré par le régulateur PI est positif, ce qui impose une décharge de la batterie c'est activer l'interrupteur S_2 .

Si maintenant la tension V_{dc} est plus grande que V_{dc}^* , on a un courant de référence négatif, on va alors activer l'interrupteur S_1 ce qui va permettre à la batterie de se charge



Le tableaux III.3 suivants résumer l'état des interpréteurs du convertisseur (Buck-boost) :

Tab. III.3 : différent mode de fonctionnement		
Mode	Etas des interrupteurs (0 ou 1)	
	S₁	S₂
Mode 1	OFF	ON
Mode 2	ON	OFF

L'énergie manquante est obtenue à partir de la batterie, à condition que l'état de charge de la batterie se trouve dans les limites prédéfinies. Typiquement, l'état de charge (SOC) de la batterie plomb-acide est compris entre 20 % et 80%. En effet, dans cette étude, pendant le fonctionnement normal de la batterie, le SOC est considéré dans la plage (SOC min = 20%) <SOC< (SOC max =80%). Au contraire, quand il existe un excès d'énergie, la tension du bus continu devient supérieure à la valeur de référence, donc nous chargeons la batterie à partir de cet excès [15].

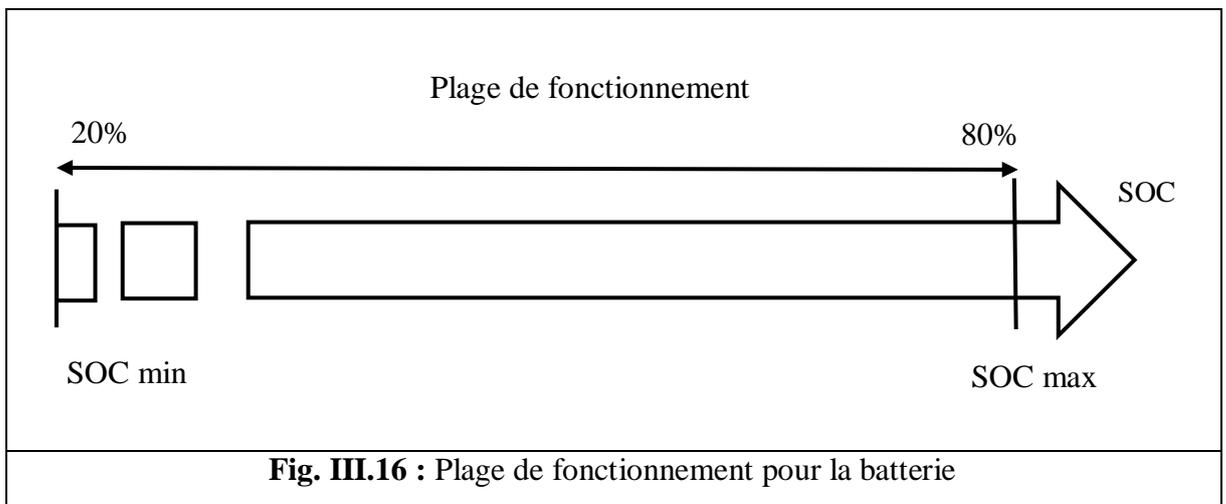


Fig. III.16 : Plage de fonctionnement pour la batterie

III.3.3 Gestion et contrôle du système hybride autonome

L'algorithme de gestion d'énergie commence par l'initialisation des grandeurs mesurées (V_{dc} , SOC, I_{pv} , V_{pv}), qui consiste à vérifier la tension de Bus continu, si cette dernière est supérieure à 640 V c'est le convertisseur Boost associé avec les modules photovoltaïques qui fournit l'énergie au système hybride autonome. Dans cette étape l'algorithme vérifie et actualise à chaque instant l'état de charge des batteries (SOC), si elle est inférieure à 80 % le convertisseur associé avec les batteries rentre en service en mode de fonctionnement Buck et

charge les batteries à son courant maximale, sinon le convertisseur Buck est mis hors service et le convertisseur boost se contente à fournir l'énergie électrique aux charges résistives seulement.

Si la tension de bus continu est inférieure à 640 V le convertisseur boost associé avec les modules PV est mis hors service. Dans ce cas, c'est le convertisseur associé avec les batteries qui prend le relais en mode de fonctionnement boost et la tension du bus continu est asservie à une valeur égale à 640 V par un contrôleur P-I classiques. Afin de protéger les batteries contre les décharges profondes le SOC de ces dernières est vérifiée est vérifiée et actualisée à chaque instant, s'il est supérieur à 20% le convertisseur boost est en service sinon le système est en standby j jusqu'à que la tension du Bus continu soit supérieur à 640 V [31].

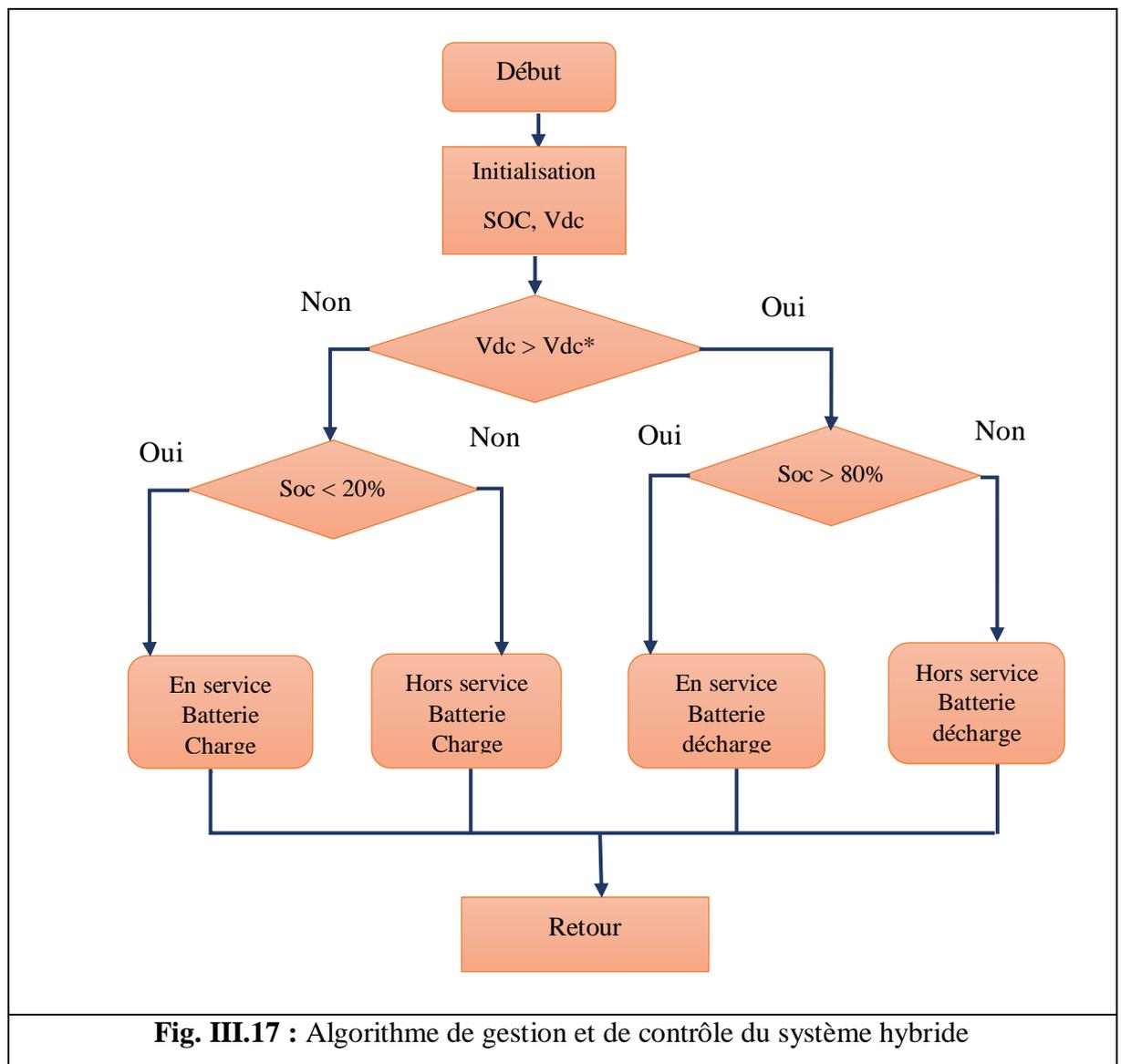


Fig. III.17 : Algorithme de gestion et de contrôle du système hybride

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la description des Méthodes de poursuite de point de puissance maximale MPPT d'un système hybride autonome. Pour extraire un maximum de puissance du générateur photovoltaïque, on a eu recours à la commande MPPT qui est la méthode P&O et l'incrémentale & conductance, elle permet de suivre le point de puissance maximale pendant la variation brusque de l'ensoleillement et de température.

Les performances de stratégie de la gestion d'énergie de système autonome hybride dépende des commandes, on a la commande de tension bus continue, et commande de régulateur PI et le rôle de commande d'un convertisseur (Buck-boost) pour l'ouverture et fermeture d'interrupteur pour opération de charge et décharge de batterie.

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RESULTAT

IV.1 Introduction

Matlab /Simulink est un programme pratique pour étude théoriques d'un certain système. En effet, ce dernier peut être utiliser sous des conditions facilement contrôlables. Simulink offre également la possibilité de composé des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un système.

Dans ce chapitre nous présentons modèle pour un système photovoltaïque connecté avec batterie à travers des convertisseurs de puissance DC/DC et d'un onduleur DC/AC, dans ce modèle on a fixé la condition de température et l'éclairement solaire est variable dans ce cas on a utilisé le logiciel MATLAB/Simulink pour la modélisation des différents composants d'une système photovoltaïque connectée avec batteries, Le but de la modélisation et la simulation des composants de la système grâce au logiciel MATLAB est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement des systèmes PV connectés au batterie. Ces critères permettent de déduire et d'estimer les valeurs de paramètre de système.

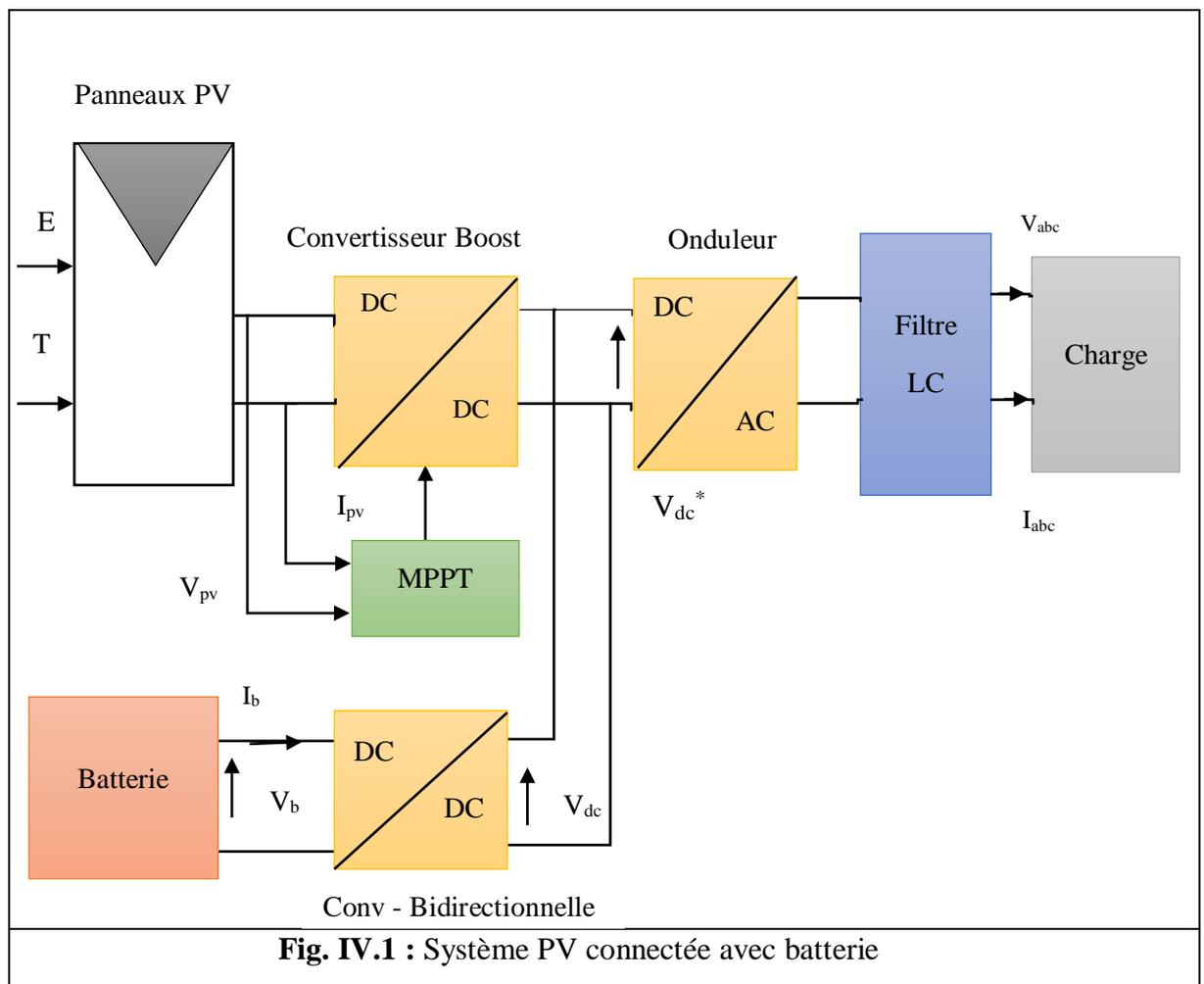


Fig. IV.1 : Système PV connectée avec batterie

IV.2 Simulation Du Système photovoltaïque Connecté avec Batterie

La Figure IV.2 Donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : GPV, DC-DC, MPPT, Batterie, DC/AC, Filtre et charge

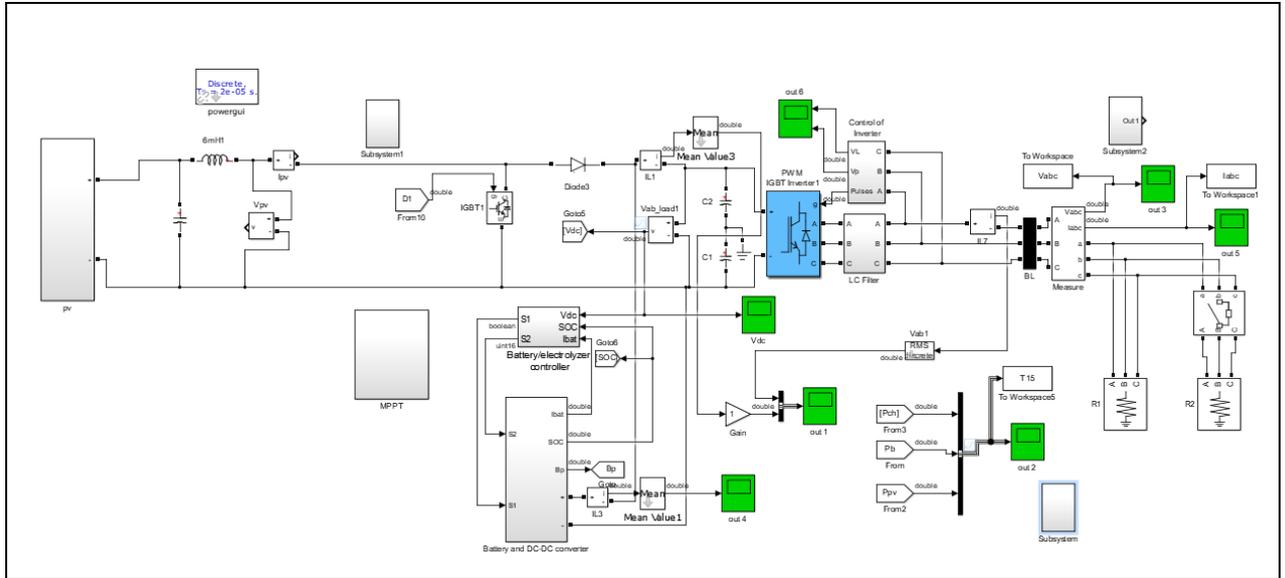


Fig. IV.2 : Schéma bloc sous Simulink du système global

IV.2.1 Simulation D'un Générateur PV

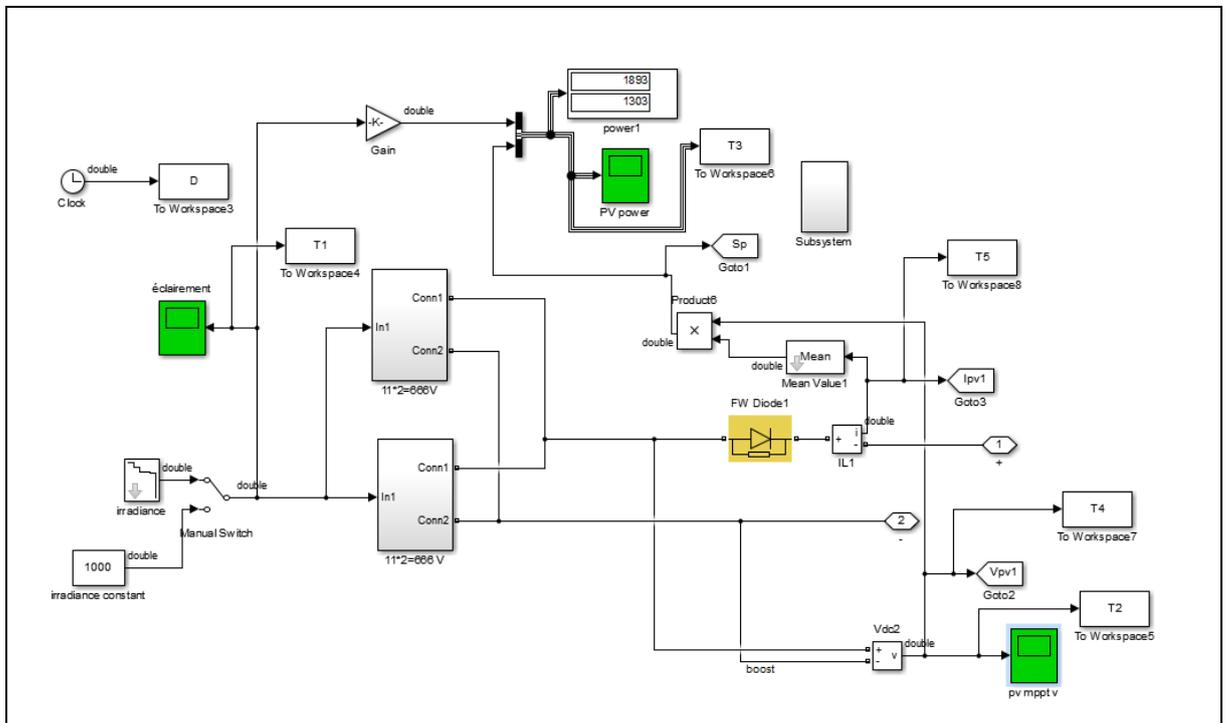


Fig.IV.3 : Modèle de simulation du GPV

IV.2.1.1 Caractéristique D'un Panneaux

Tab. IV.I : Caractéristiques électrique du panneau solaire	
Caractéristiques électrique	Valeur
Puissance Maximale	213.15 W
Tension à puissance maximale (V_{mp})	29 V
Courant à puissance maximale (I_{mp})	7.35 A
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	36.3 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	7.84 A
Nombre total de cellules	36

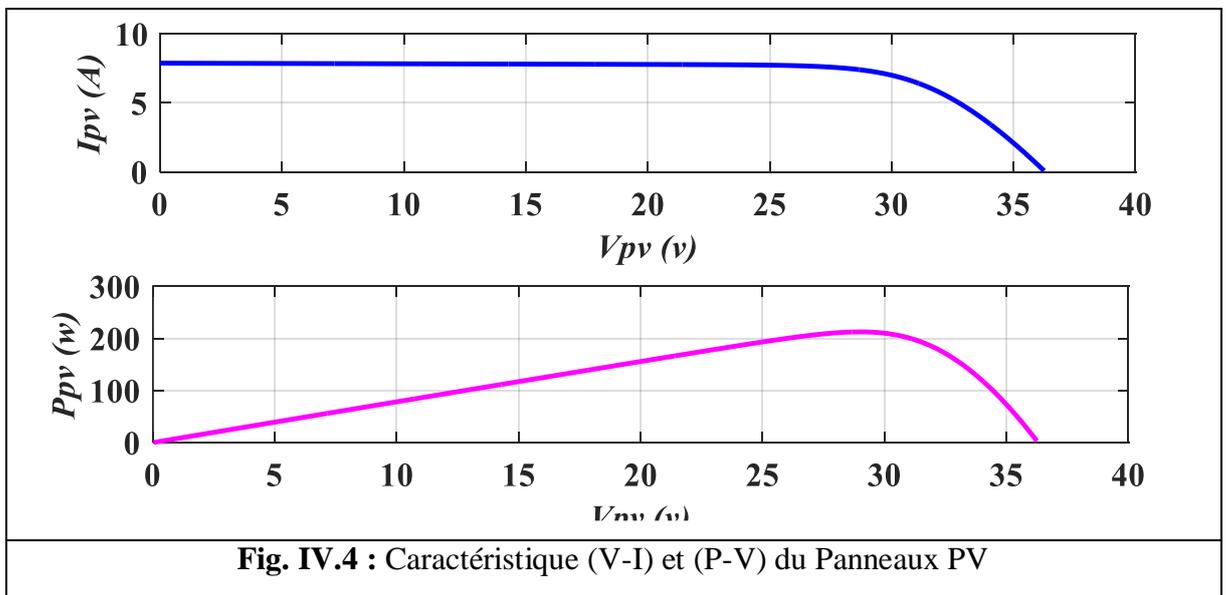
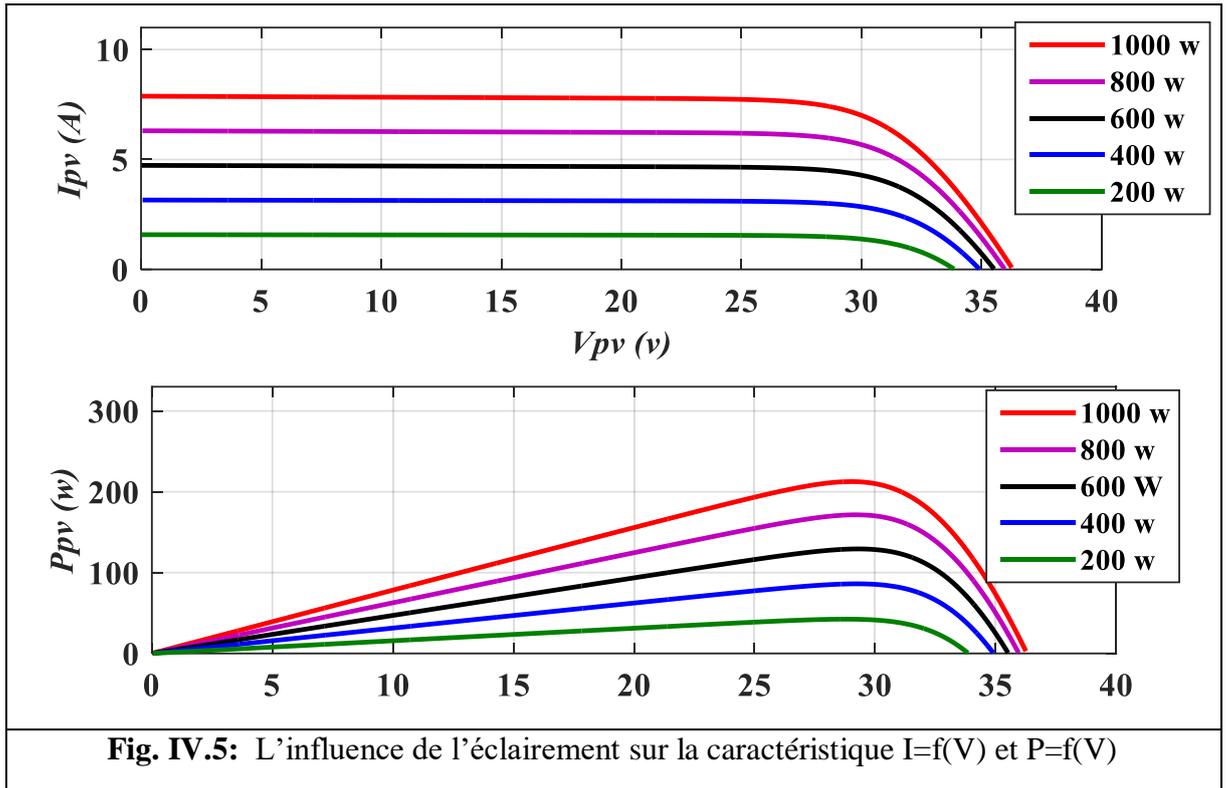


Fig. IV.4 : Caractéristique (V-I) et (P-V) du Panneaux PV

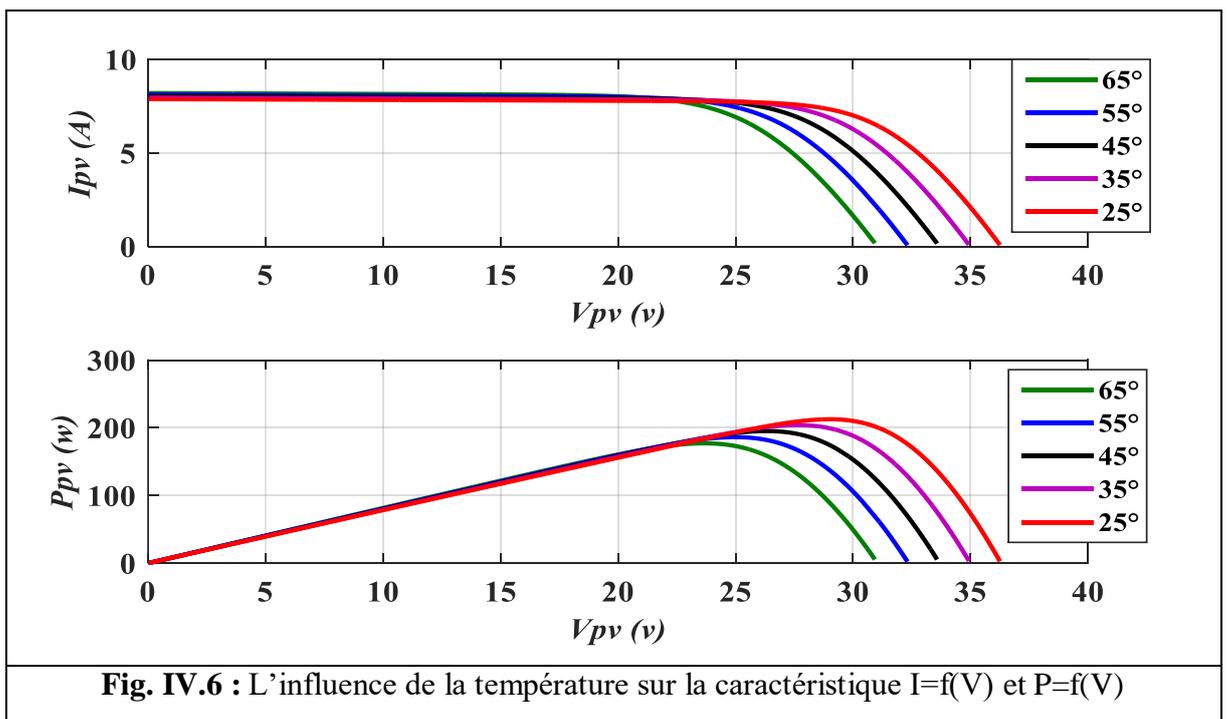
a) Influence de l'éclairement

Nous avons Fixé la température $T=25$ et varier l'éclairement (E) 200 ; 400 ; 600 ; 800 ; 1000 ; avec un pas de 200, la caractéristique ($P=f(V)$) et la caractéristique ($I=f(V)$) sont données par (la figure VI.5)



b) Influence de la température

On a éclairement $E=1000$ constant et nous avons varié Température (E) [25 ; 35 ; 45 ; 55 ; 65] ; la caractéristique ($P=f(V)$) et la caractéristique ($I=f(V)$) sont données par (la figure VI.6)



- Dans la figure (IV.6) pour étudier la caractéristique $I=f(V)$ nous remarquons que le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente la caractéristique $P=f(V)$

IV.2.2 Simulation du convertisseur Boost

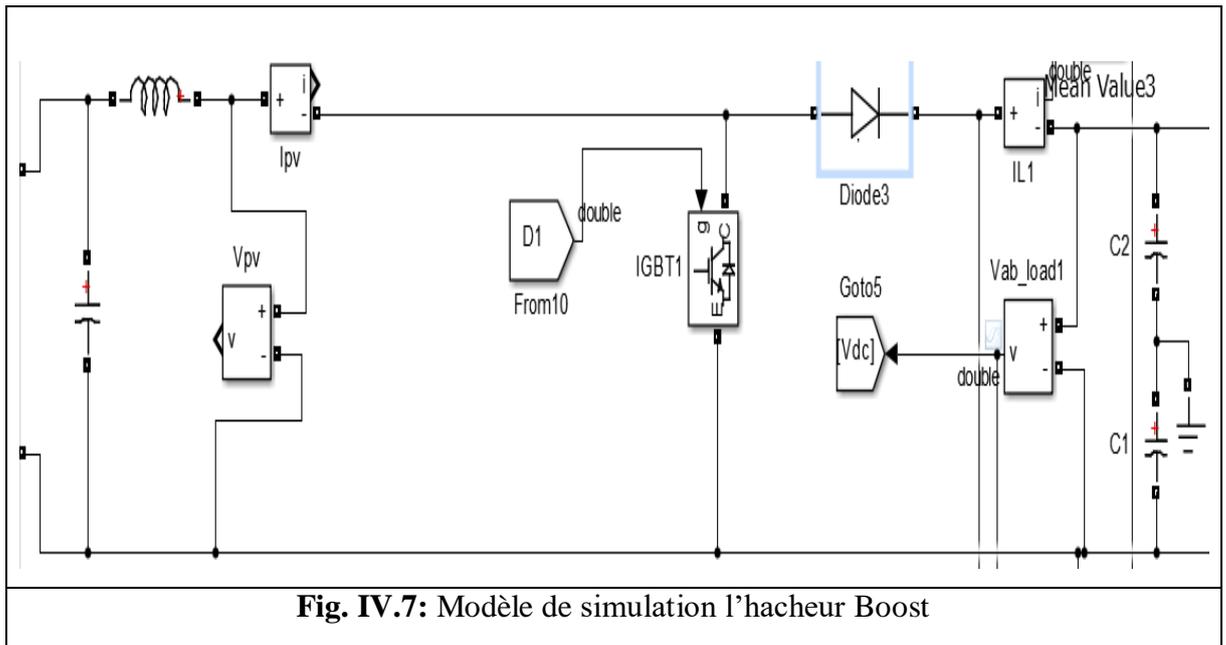


Fig. IV.7: Modèle de simulation l'hacheur Boost

IV.2.3 Simulation du Commande MPPT

Nous avons réalisé les modèles de simulation des algorithmes P&O. en nous basant sur les études illustrées dans le chapitre III. La figure. IV.8 donne le bloc Simulink.

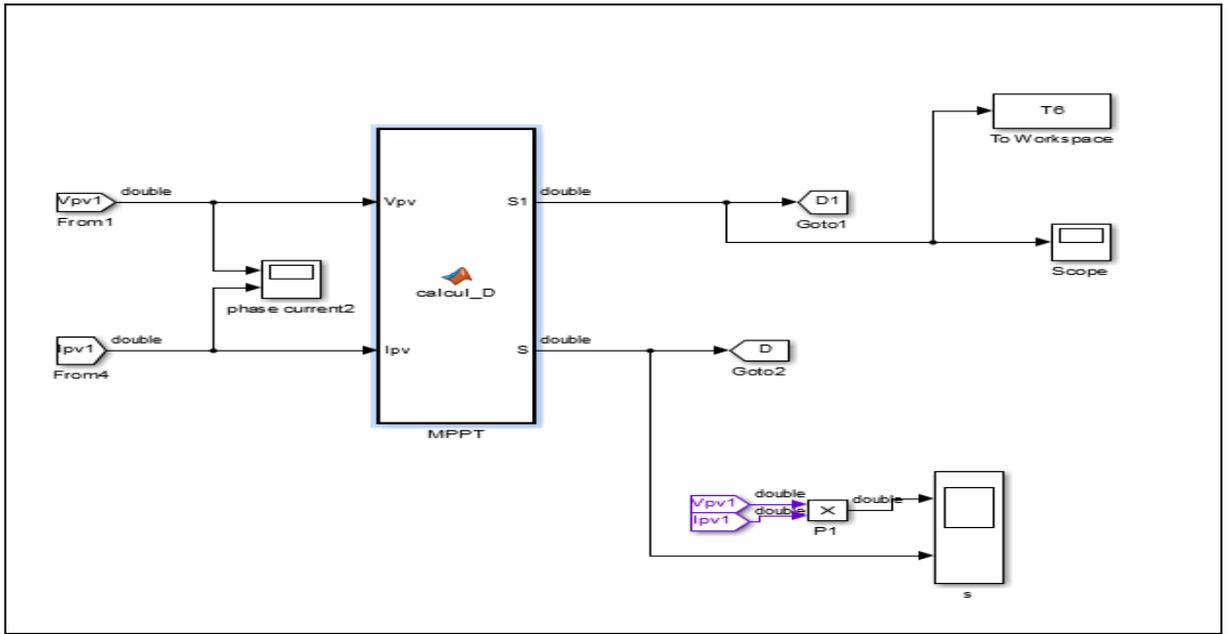


Fig. IV.8 : Schéma de block de la commande MPPT

IV.2.4 Simulation de Batterie Avec Convertisseur Bidirectionnelle

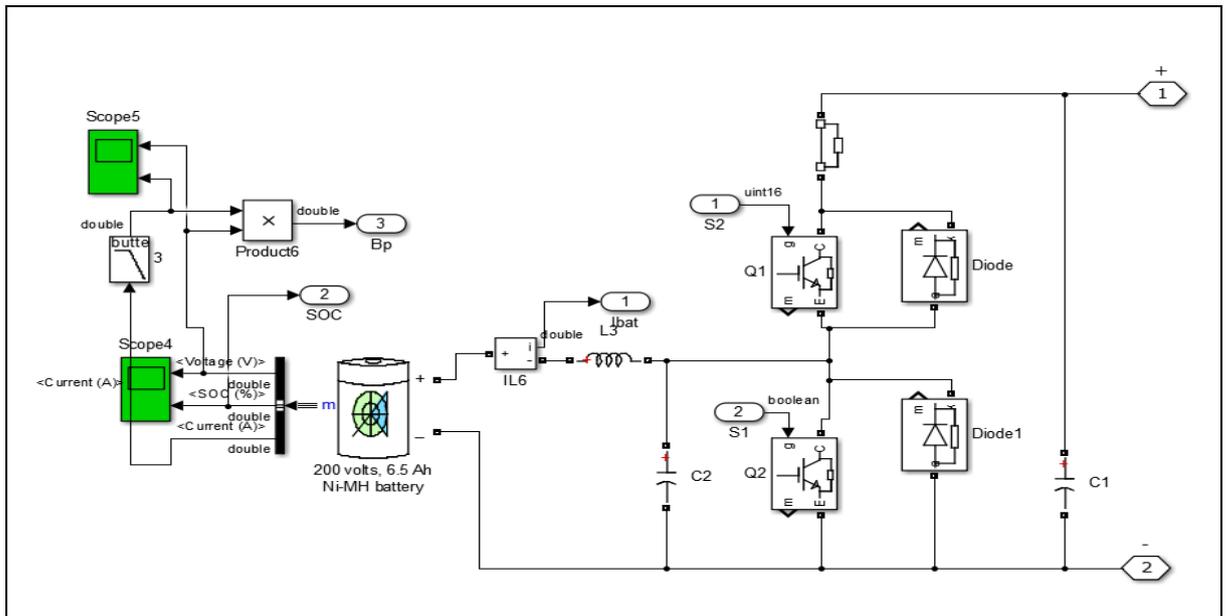
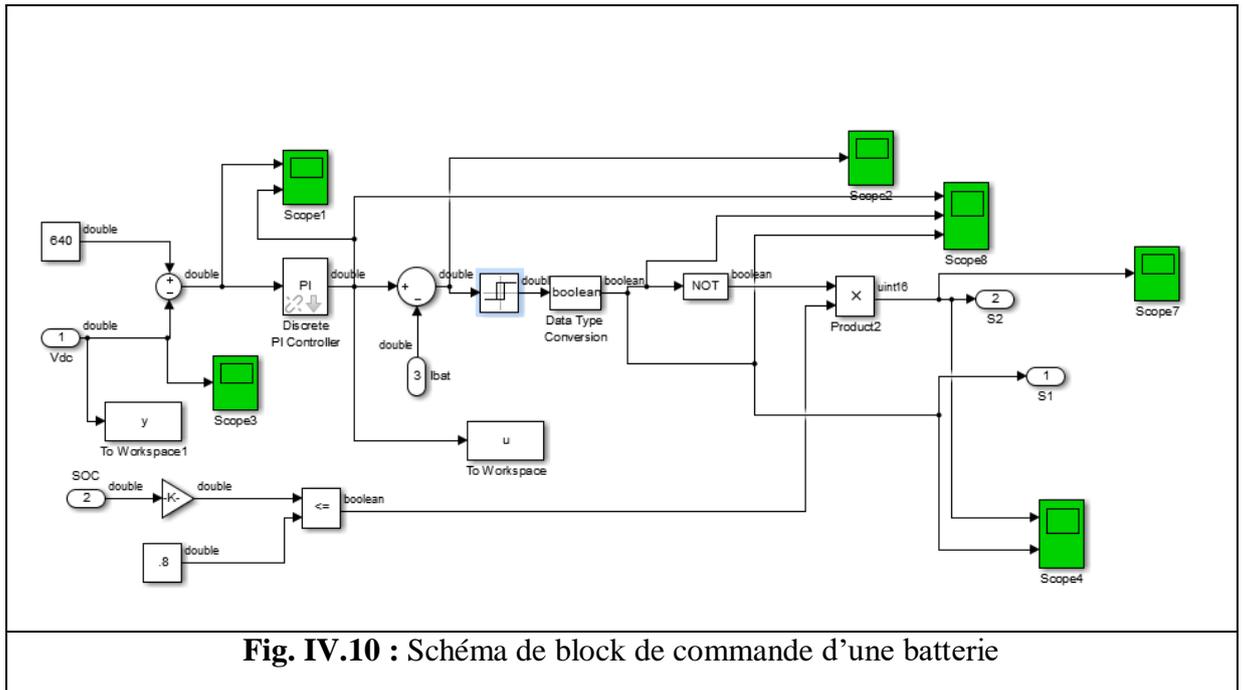
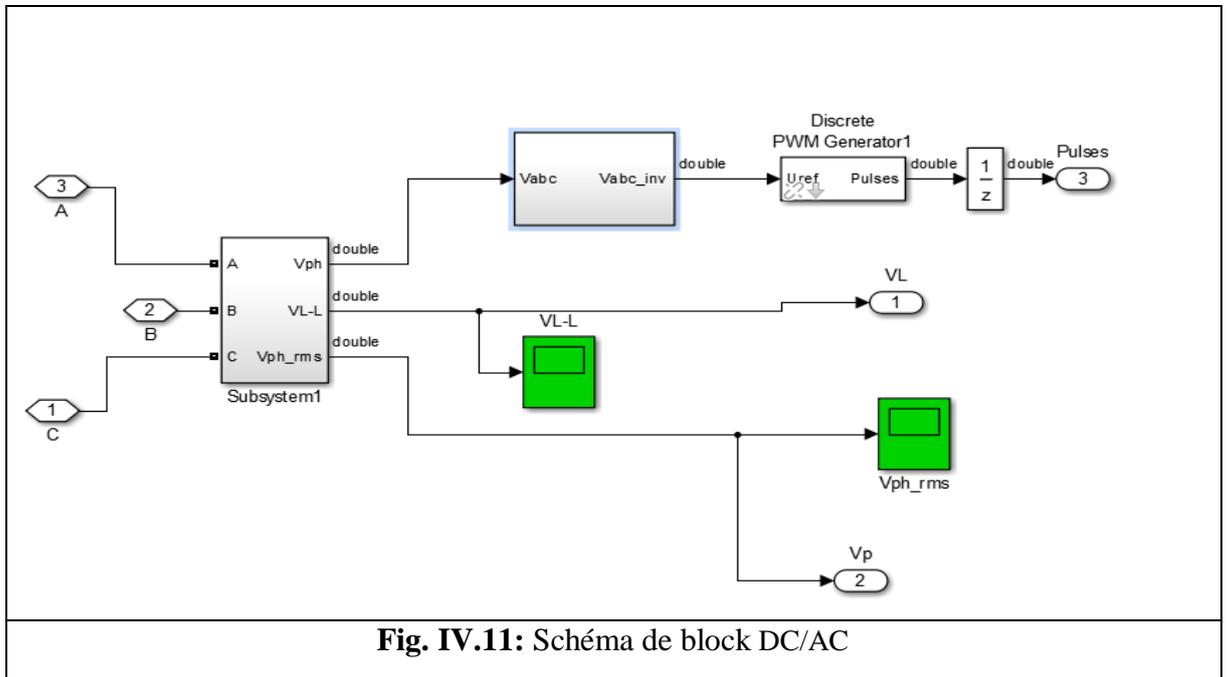


Fig. IV.9 : Schéma de block de batterie avec convertisseur Bidirectionnelle

IV.2.5 Simulation De Commande Batterie



IV.2.6 Simulation De Convertisseur DC/AC

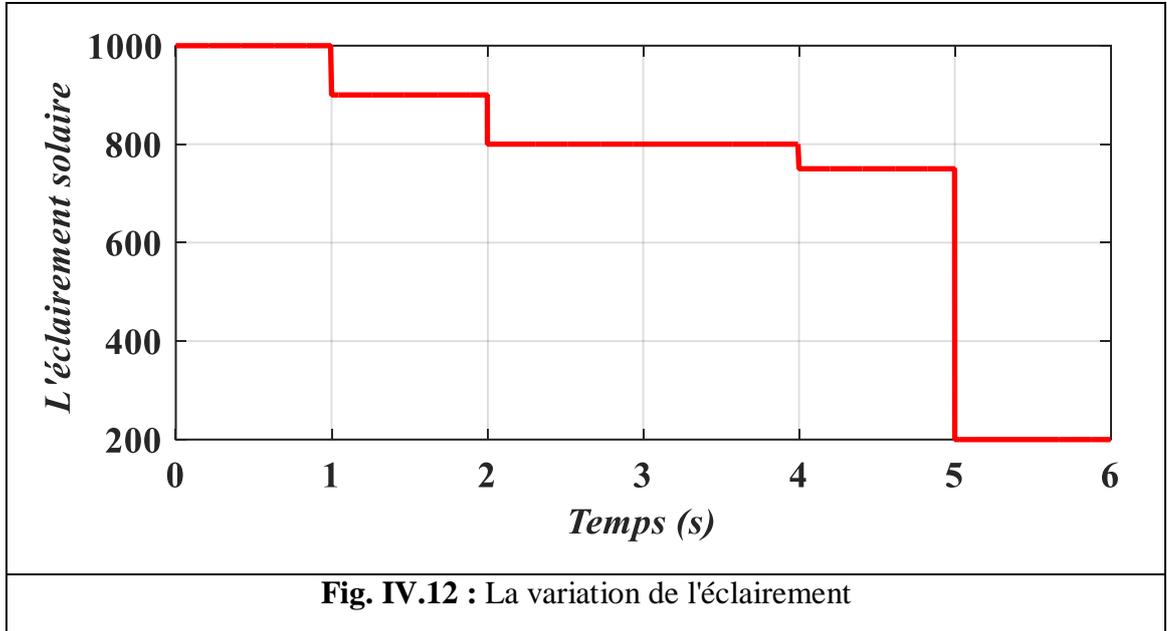


IV.2.7 Charge

On à utiliser deux charges en parallèles la valeur de puissance de charge est $P_{ch} = 5000 \text{ W}$

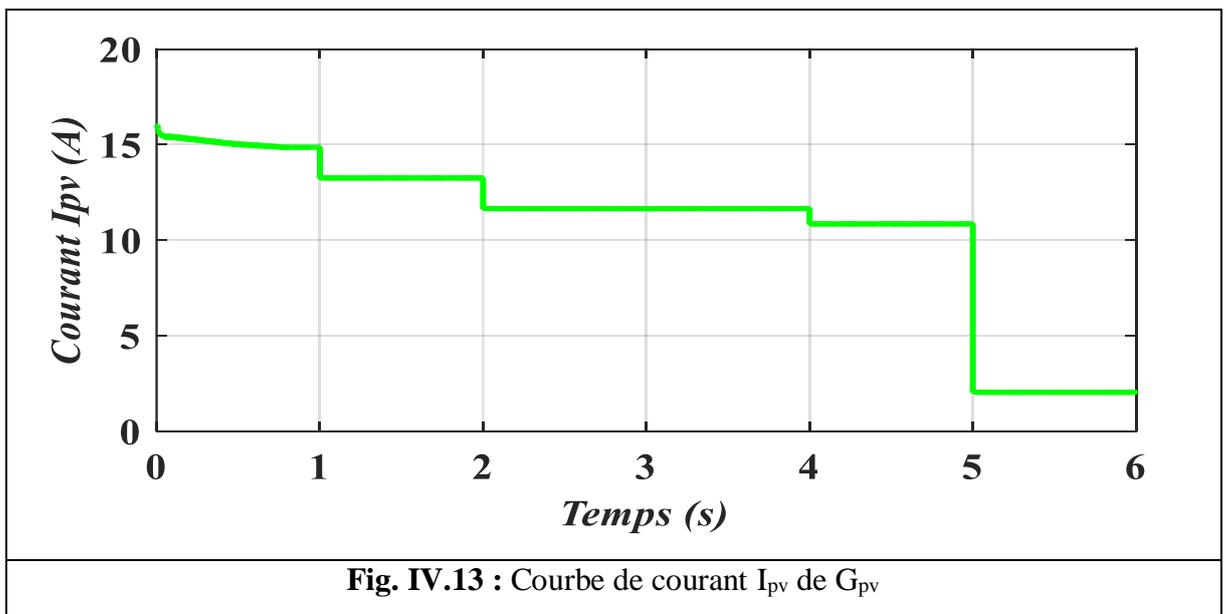
IV.3 Résultats et discussion

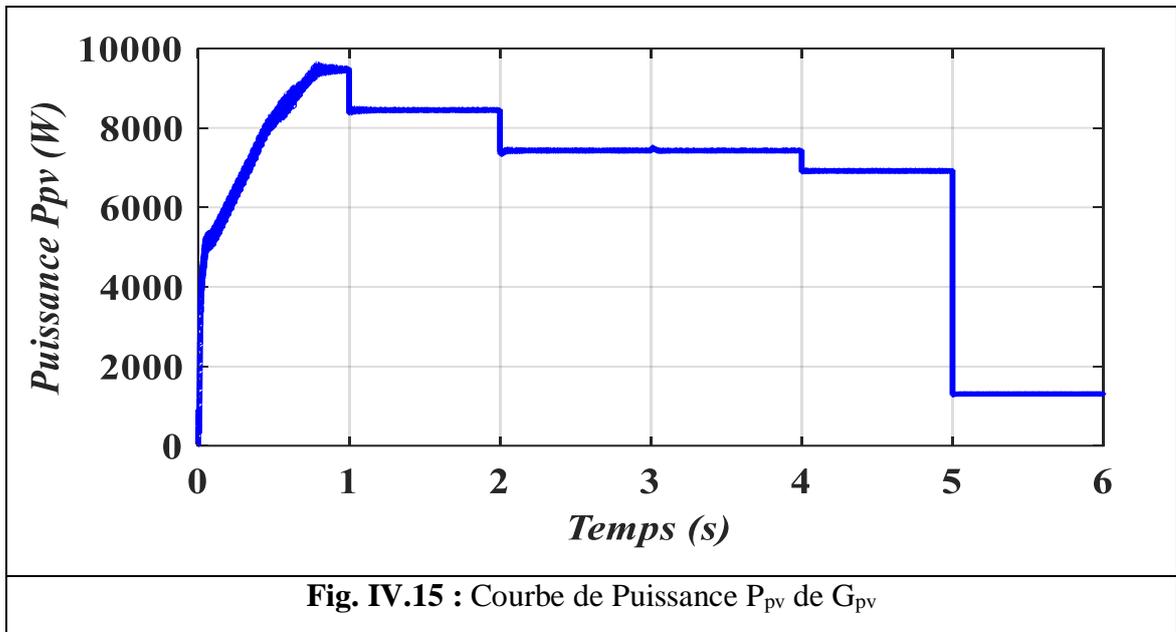
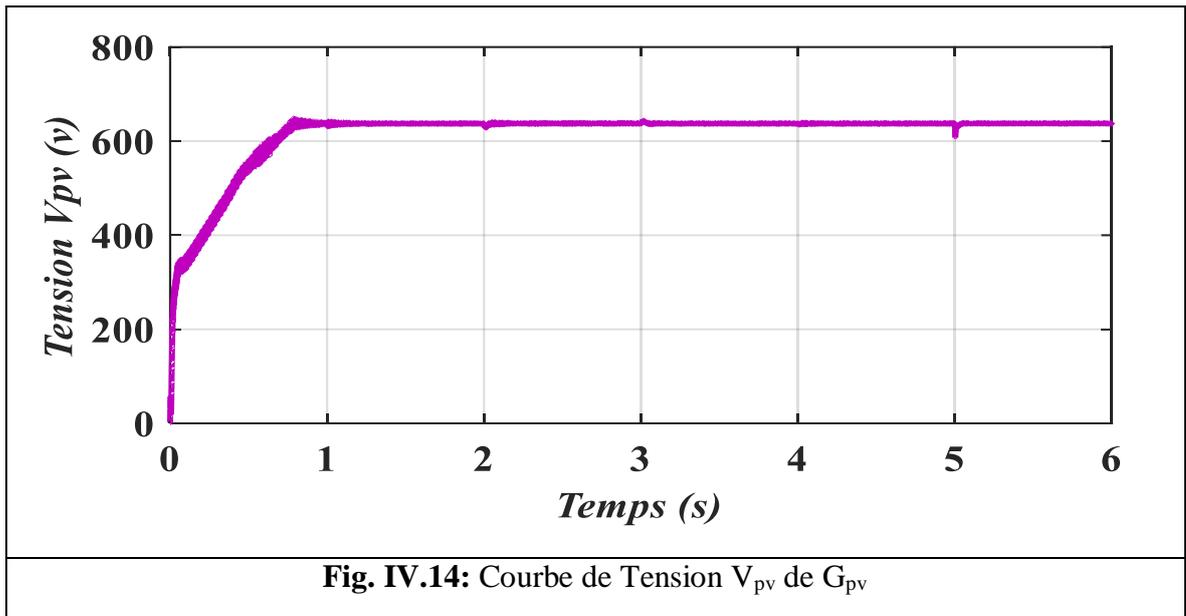
Les résultats du système dépendent on a fixé température à 25 C° et On a vari l'éclairement [1000 900 800 750 200] E W/m², La figure. IV.12 donne la variation de l'éclairement.



IV.3.1 Générateur photovoltaïque

Les résultats des simulations ont donné les graphes suivants :

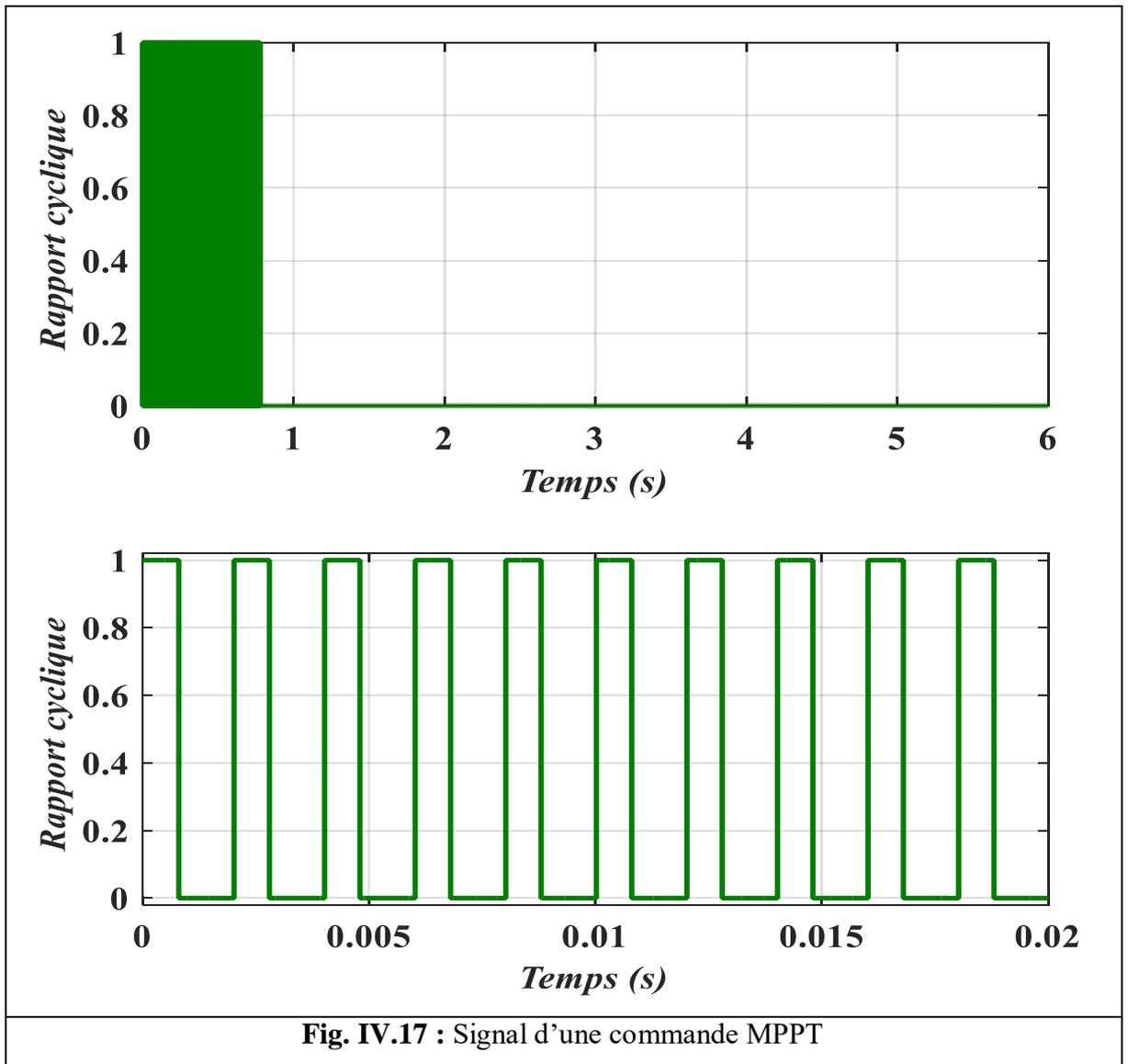
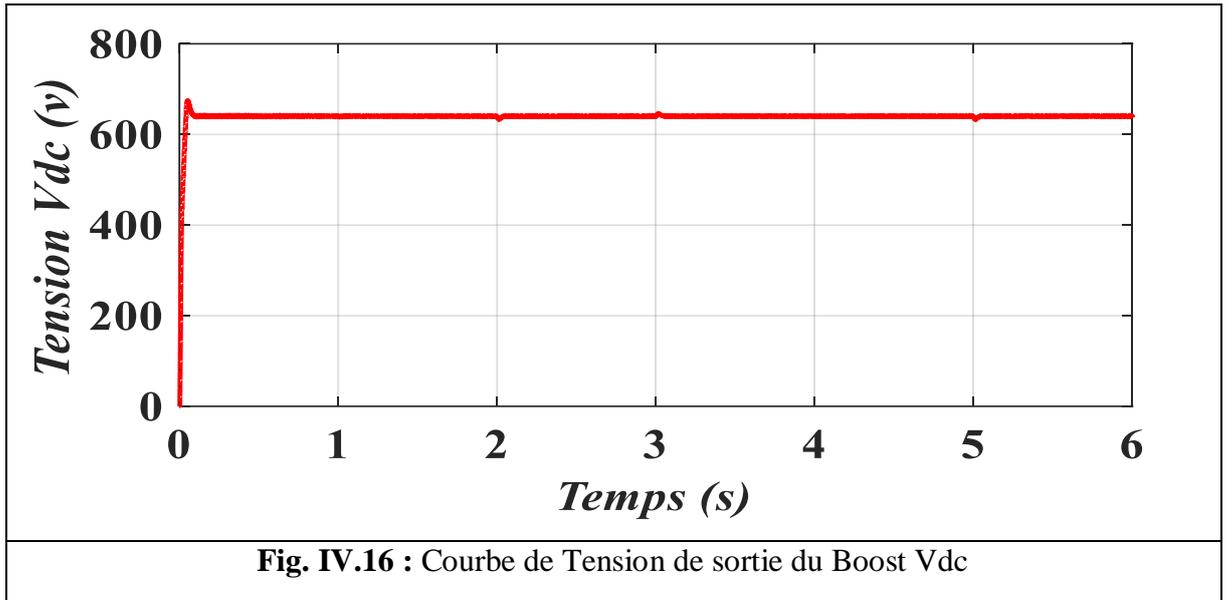




Nous avons remarqué les paramètres de Panneaux PV, le courant I_{pv} , la tension V_{pv} , la puissance P_{pv} , variable par l'éclairement solaire.

IV.3.2 Commande MPPT

Il s'avère les graphes suivants la tension de sortie de convertisseur Boost V_{dc} et Signal de rapport cyclique d'une commande MPPT (P&O) par une variation de d'éclairement solaire.



IV.3.2.1 Comparaison entre rapport cyclique et Tension V_{pv}

Dépende de variation de rapport cyclique en fonction de l'évolution des paramètres de courant I_{pv} et V_{pv} et donc la puissance de G_{pv} .

On remarque la tension V_{pv} augmenter est stables jusque 'un atteindre le PPM à valeur 640 V malgré de variation de l'éclairement solaire

IV.3.3 La Commande Batterie Avec Convertisseur Bidirectionnelle

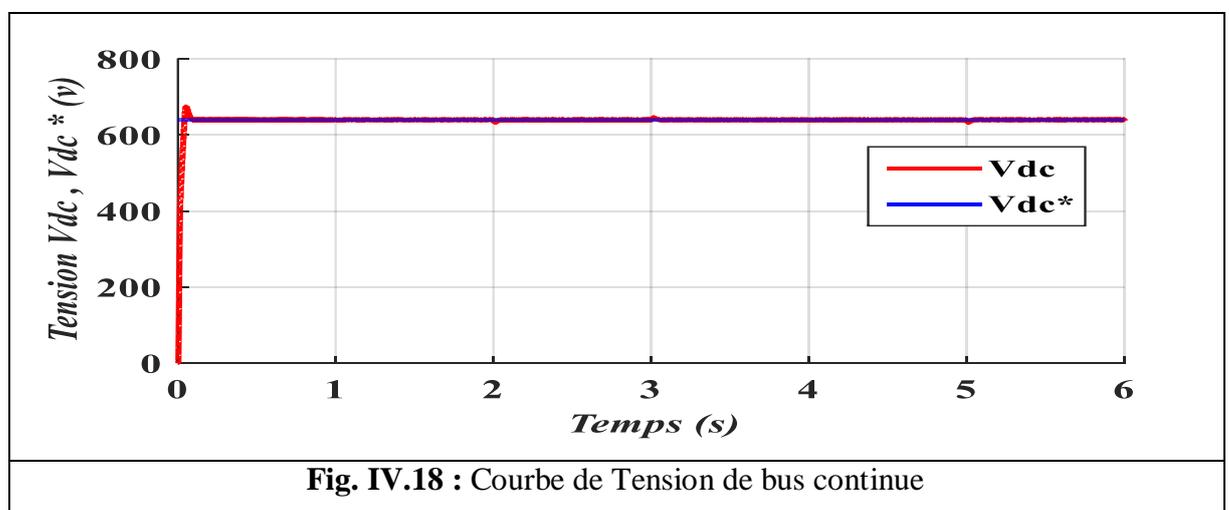
On a fixé la tension $V_{dc}^* = 640$ V et on à la tension de bus continue V_{dc} est varié à l'éclairement solaire

Puis, nous avons fixé l'état de charge de la batterie à 60 % afin de tester les différents modes de fonctionnement possibles du système PV ($P < 0$, et $P > 0$).

Les résultats des simulations montrent l'évolution de la tension, Puissance, et du courant de batterie dans les figures (IV.19), (IV.20), (IV.21).

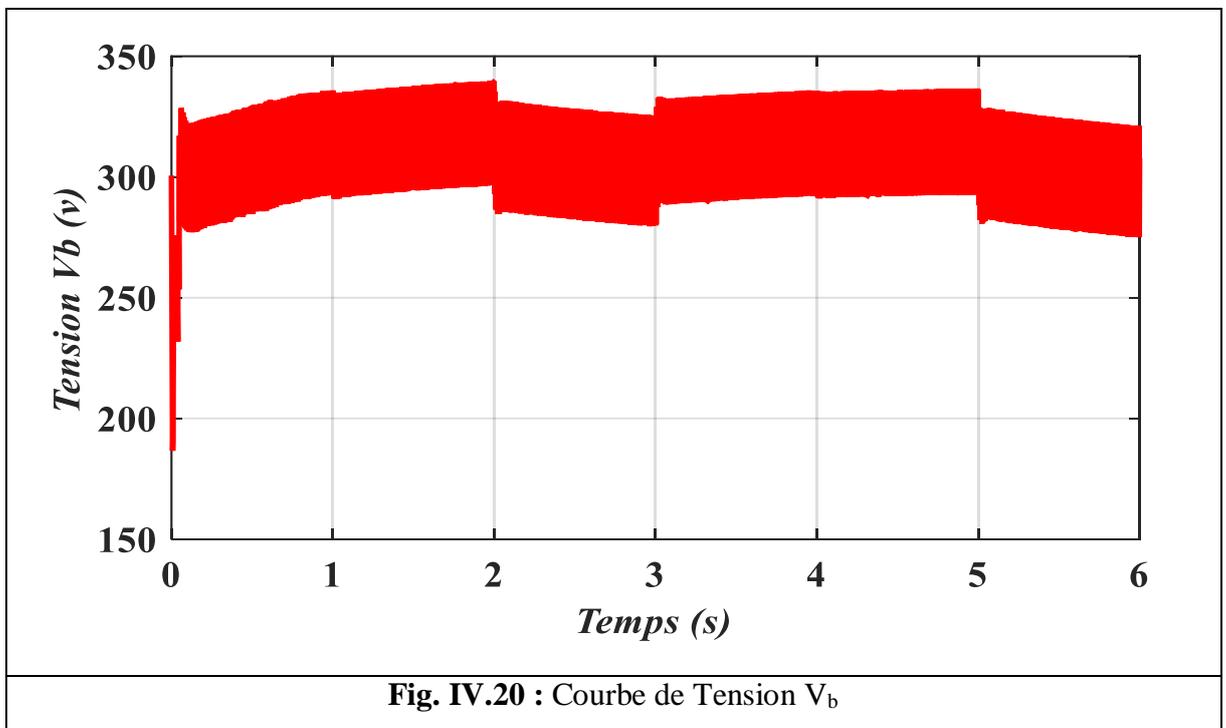
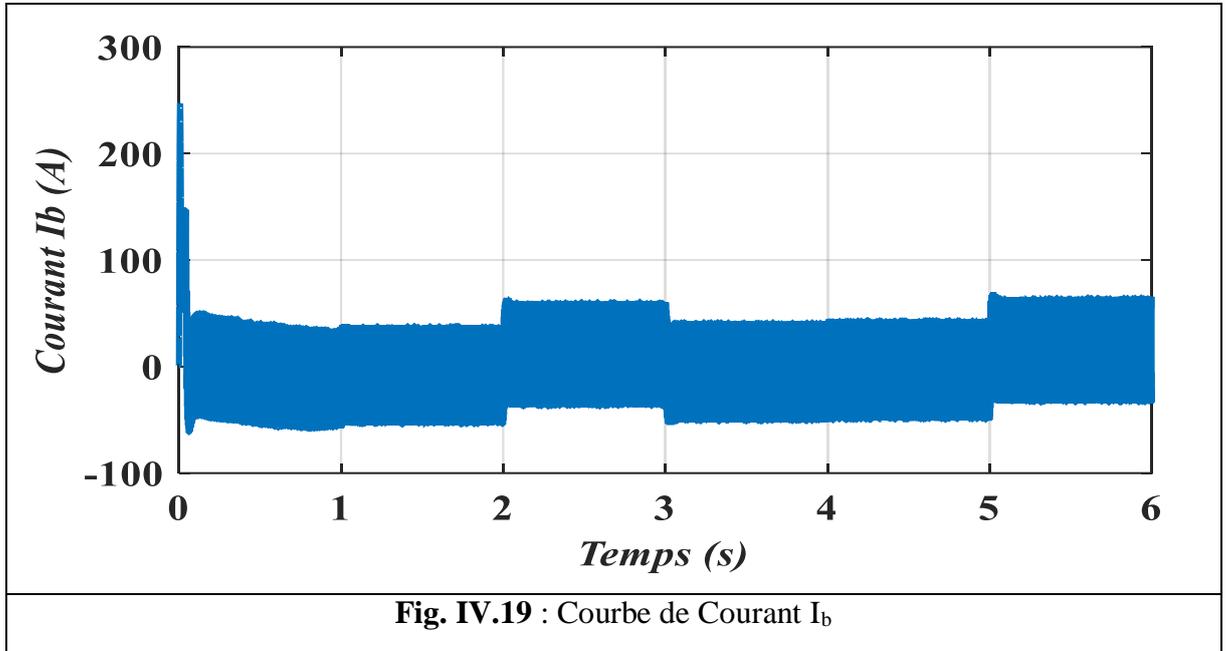
Sur la figure (IV.25) ensemble des différentes puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_b) est présentée. Quant aux figures (IV.23), (IV.24), montrent les instants de fonctionnements ouvert (état ON) ou fermé (état Off) des interrupteurs, on peut remarquer que les deux interrupteurs S_1 , S_2 et Figure (IV.22) état de charge (SOC)

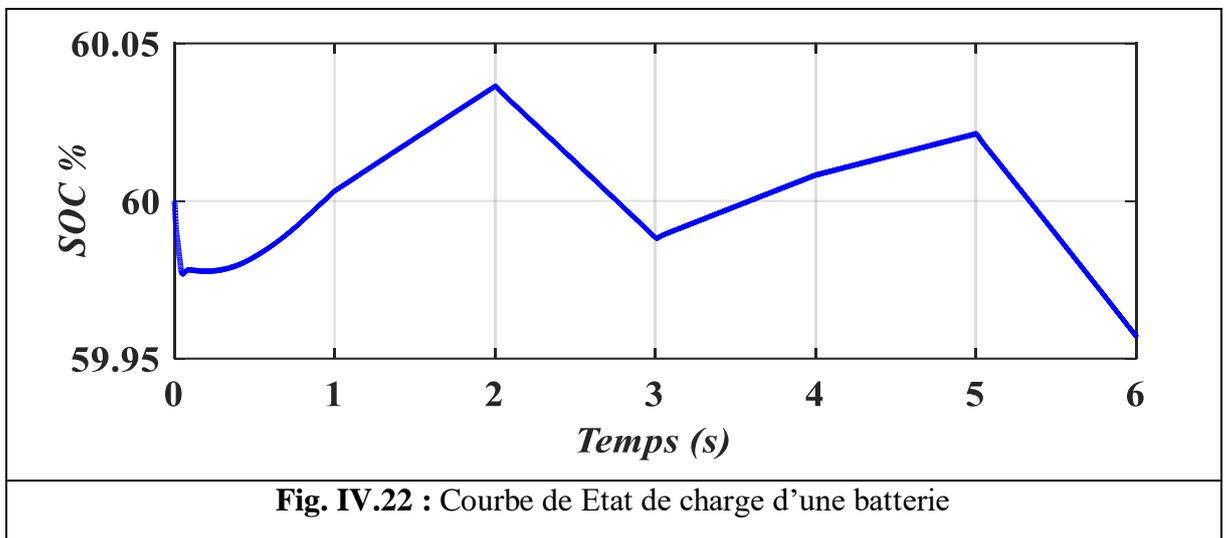
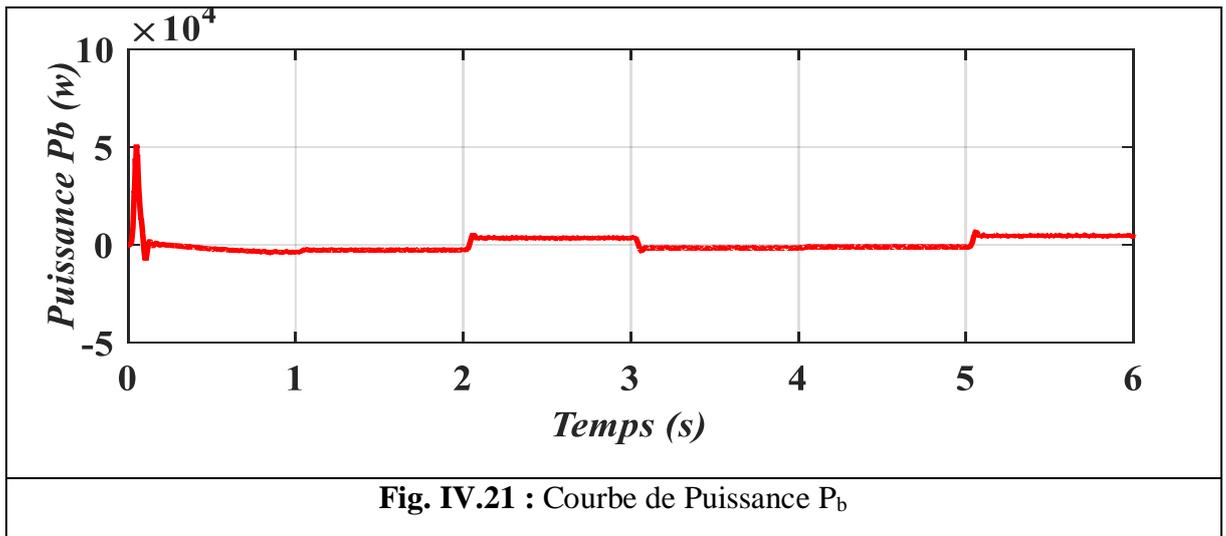
Les résultats des simulations montrent l'évolution de la tension, Puissance, et du courant de batterie.

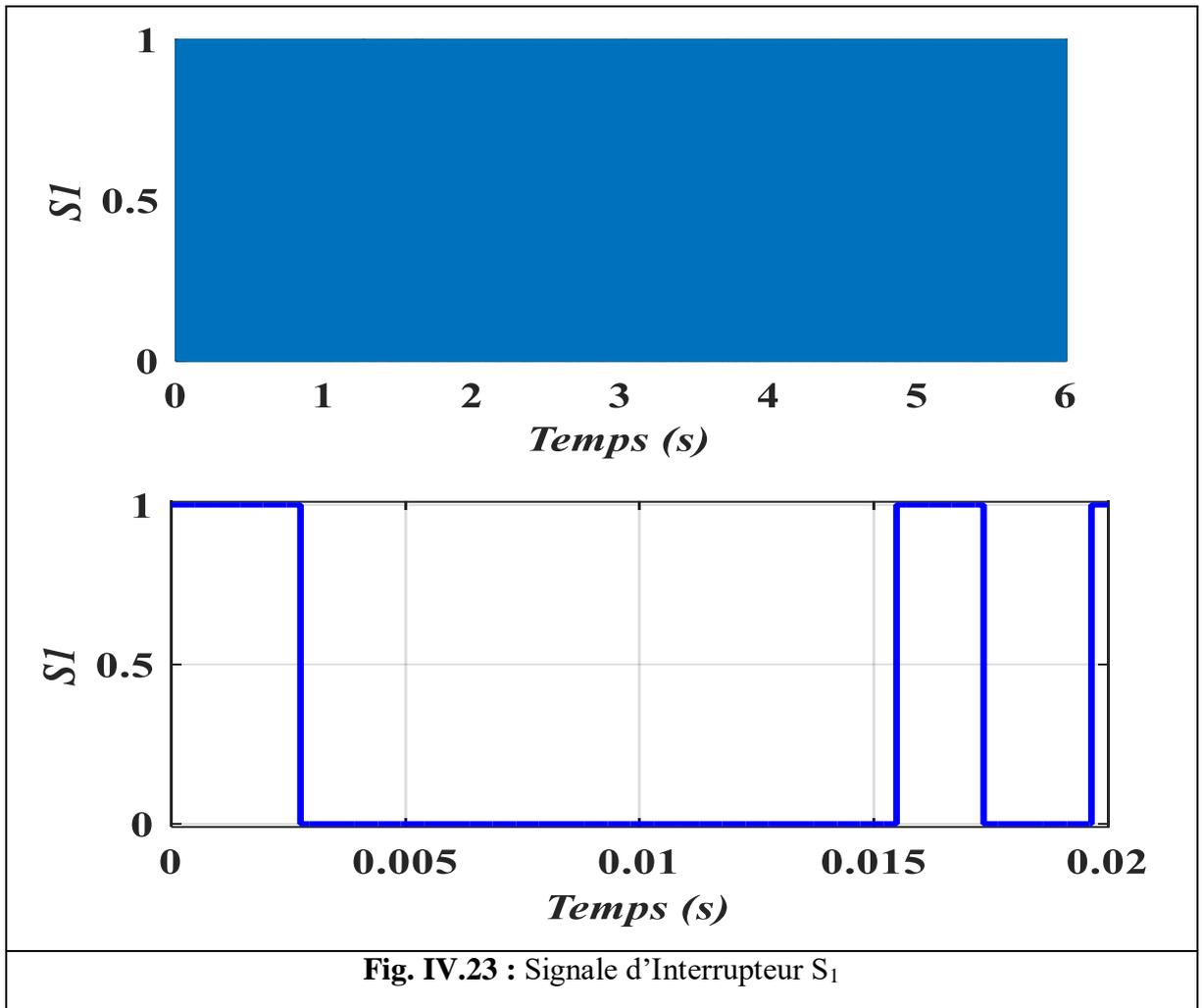


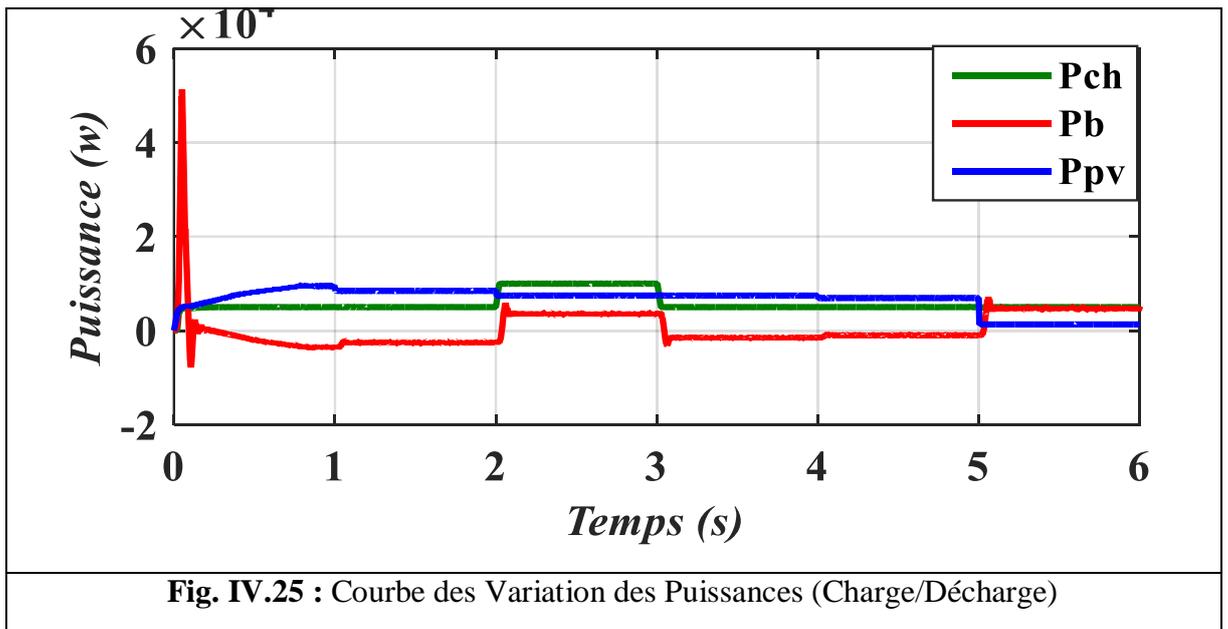
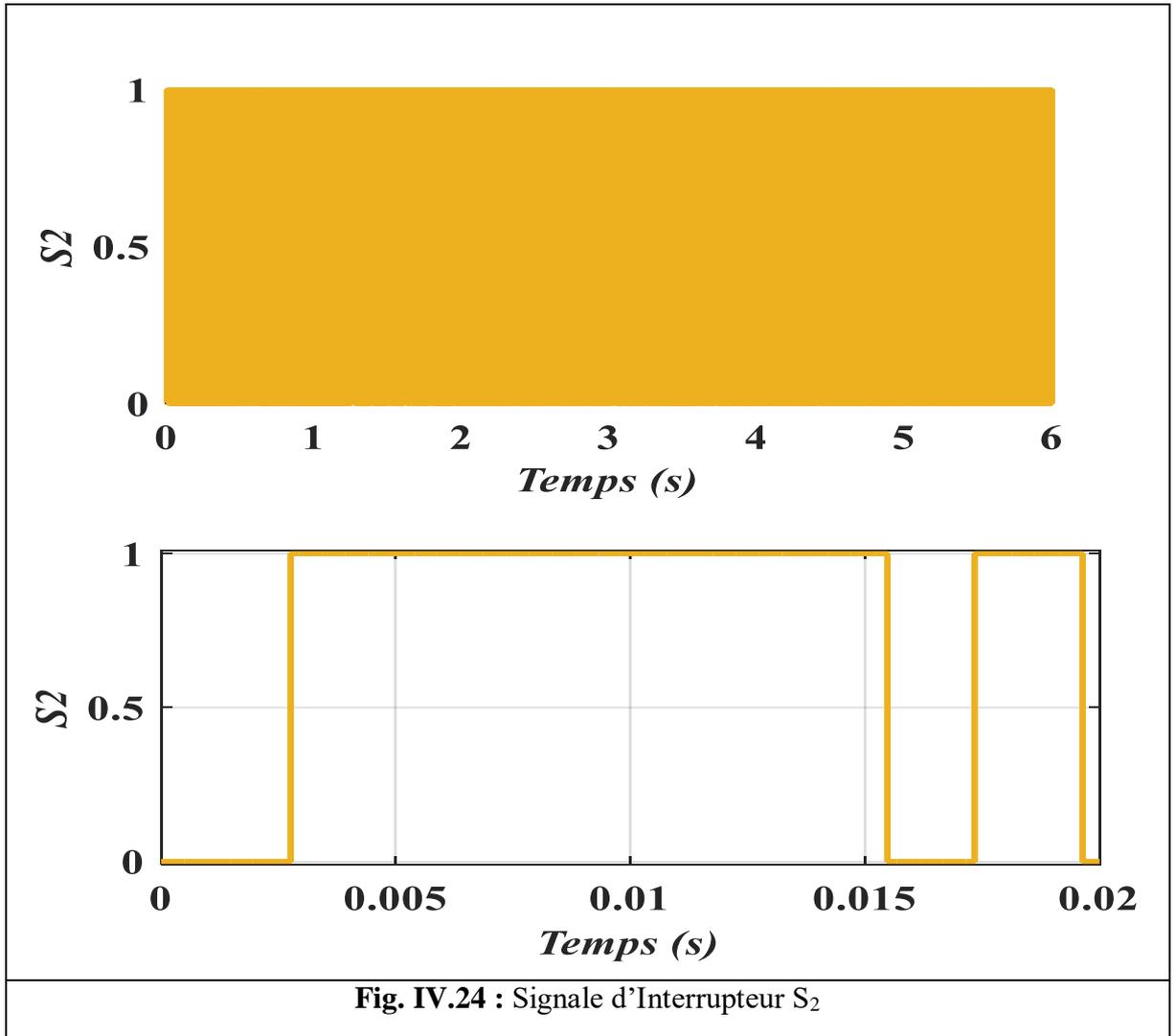
La figure IV.18 montre que la tension du bus continu suit la tension de référence ($V_{dc}^* = 640V$) avec une bonne précision et stabilité.

Dans ce cas on remarque la batterie est chargée parce que l'énergie Fourni par le générateur PV suffisant pour la charge.









- L'état de charge de la batterie est compris entre état de charge minimum et maximum ($0.2 < SOC < 0.8$)
- Dans l'intervalle [0.4-2] [3-5] : $P_b < 0$, il existe un excès d'énergie : La puissance délivrée par le système PV et assure totalement la demande de la charge, figure (IV.21), on charge la batterie par l'excès existant, ce qui induit un courant négatif aux bornes de la batterie., les figures (IV.19, IV.20, IV.21)

En conséquence, le contrôle de la batterie est actif donc dans la figure (IV.23) on remarque l'état d'interrupteur S_1 est ouvert donc c'est le convertisseur (Buck) mettre en service et dans figure (IV.24) on remarque l'état d'interrupteur S_2 fermé.

- Dans l'intervalle [2-3] [5-6] : $P_b > 0$, il existe un manque d'énergie : le G_{pv} ne répondent pas à la demande de la charge, donc la batterie intervient pour assurer la demande de la charge, ce qui induit un courant positif aux bornes de la batterie.
- Dans la figure (IV.22) en l'intervalle [0-2] on remarque $SOC < 0.8$ dans ce cas la batterie recharge, et dans l'intervalle [2-3] $SOC > 0.2$ donc la batterie décharge.

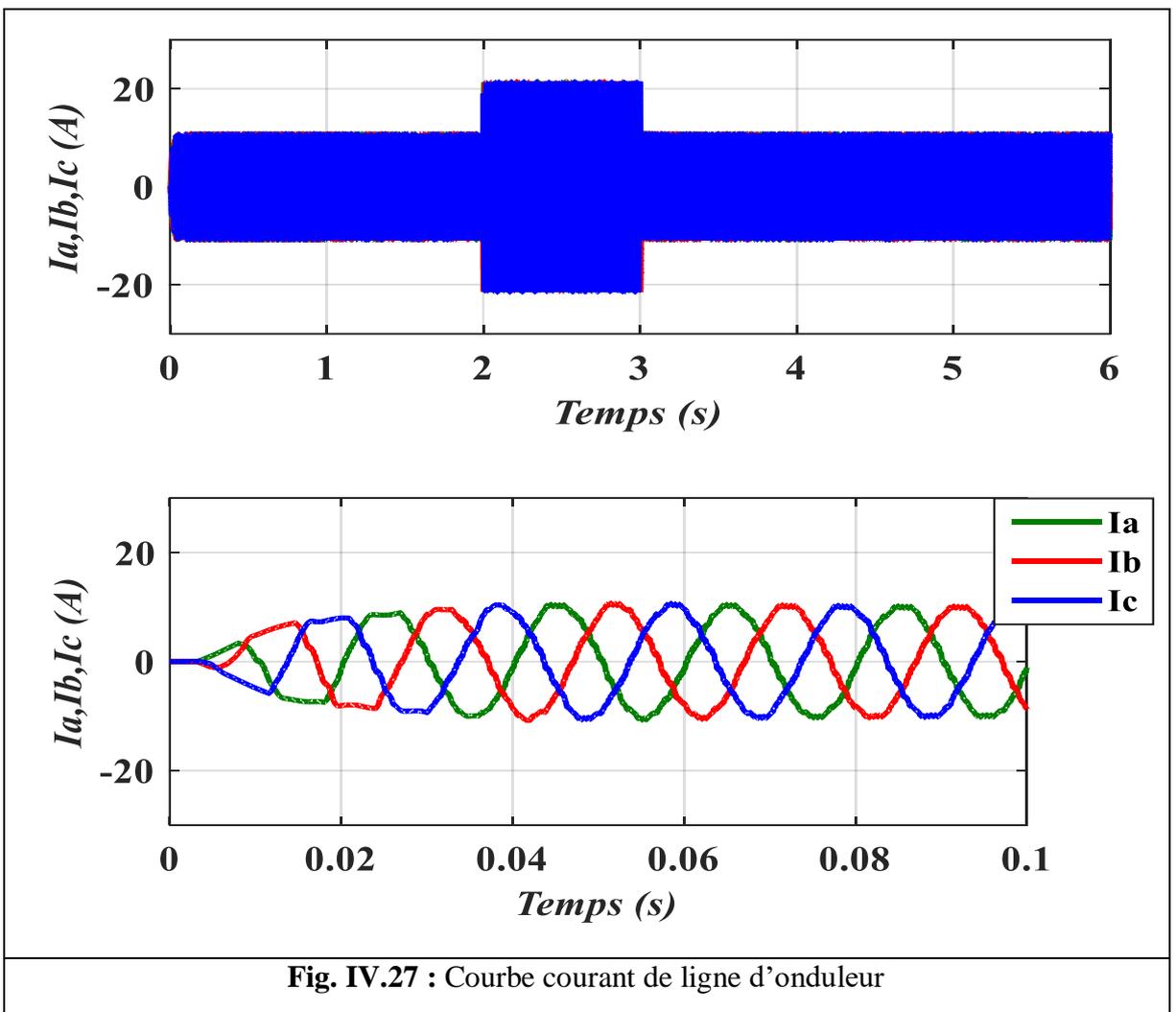
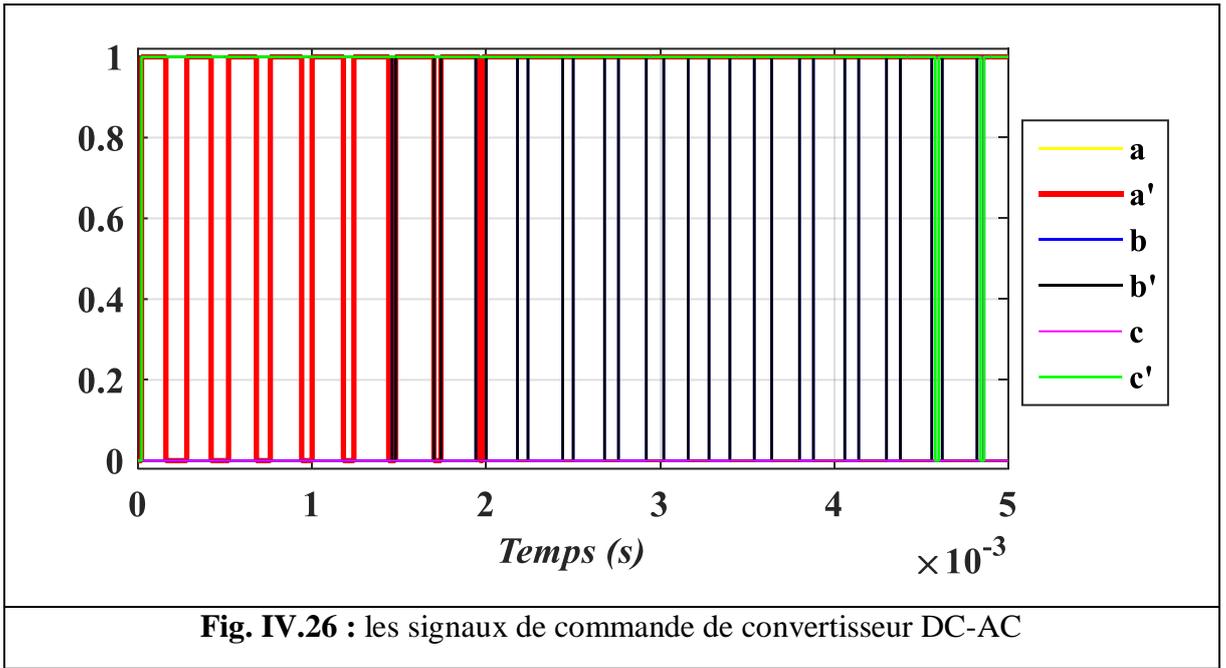
On Conclure dans figure (IV.24) dans ce cas l'état d'interrupteur S_2 est ouvert donc c'est convertisseur (Boost) mettre en service et inversement.

- On remarque dans la figure (IV.25) dans l'intervalle [0-2] la puissance de panneaux photovoltaïque P_{pv} devienne supérieure à la puissance de la charge P_{ch} , la batterie met ensuit en charge.

Après dans l'intervalle [2-3] la batterie se décharge, la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque devient inférieure à celle exigée par la charge donc dans ce cas la batterie intervient pour assurer la demande de la charge.

IV.3.4 Convertisseur DC/AC

Les résultats des simulations de Tension V_{abc} et courant I_{abc} et signale de commande convertisseur DC/AC aux suivants :



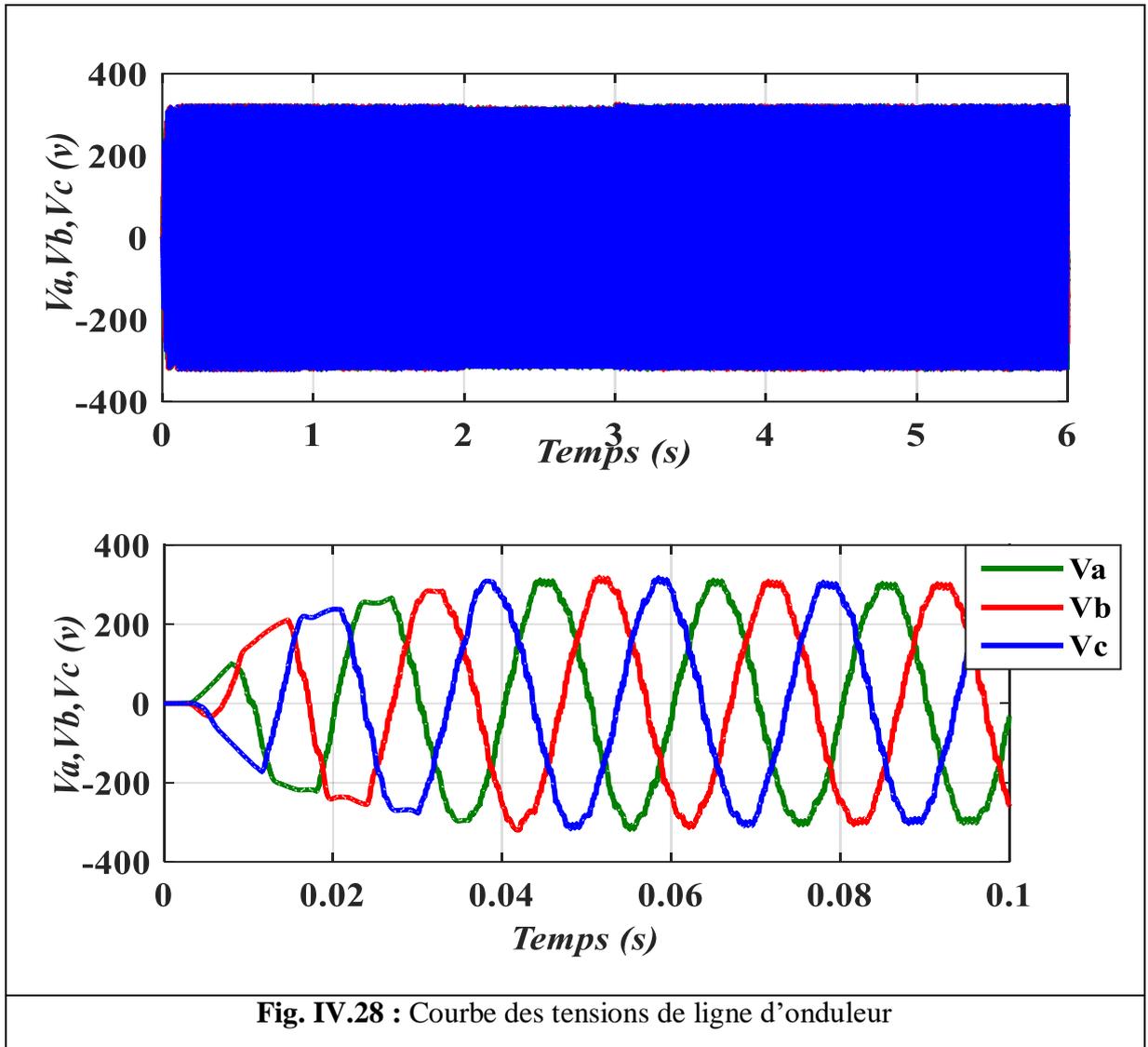


Fig. IV.28 : Courbe des tensions de ligne d'onduleur

- Dans la figure (IV.26) La commande à MLI sinus-triangle produit (PWM) un vestige de tension. Ce vestige devient plus important, si on retarde les signaux de commande durant l'ouverture et la fermeture des interrupteurs pour éviter les courts-circuits de convertisseur DC/AC [34].
- Nous avons remarqué dans les figures (IV.27) (IV.28) est après filtrage, le signale de commande d'onduleur contrôlés le courant et tension donc les courants I_{abc} a une faible distorsion qui est pratiquement en phase avec des tensions V_{abc} , et signifier le convertisseur DC/AC dépende du contrôle d'énergie vers le bus alternatif de telle sorte à maintenir la tension du bus continu constante, ainsi que le facteur de puissance de sortie (puissance active).

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le système hybride autonome connectée avec batterie (plomb - acide) nous avons utilisé Matlab pour simuler notre système, la méthode MPPT (P&O) utilisé pour extraire le maximum de puissance, et l'importance de l'influence de l'éclairement et température sur les résultats.

Généralement la simulation nous a permis d'évaluer les résultats quand en jour et Nuit. (Quand la disponibilité éclairément et absence).

Nous avons remarqué le convertisseur (dévolteur-survolteur) il a rôle en d'ouverture et fermeture pour de charge et décharge de batterie, et le régulateur PI pour régler la tension de bus continue et l'importance de l'onduleur DC-AC.

Nous remarquons que les résultats de simulation donner tension de bus continue V_{dc} , SOC maximale et minimale pour charge et décharge de batterie, Les puissance (P_{ch} , P_{pv} et P_b) et importance convertisseur d'onduleur DC/ AC par commande MLI pour convertie directement à la charge.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons présenté un système de gestion avec stockage de batterie dans le système photovoltaïque autonome, on a des types de bus (AC et DC), et nous avons utilisé deux convertisseurs (DC/DC et DC/AC) pour transformer l'énergie, et une technique de commande MPPT, et après simulation nous avons traité le problème de la gestion.

L'utilisation d'un système gestion et commande permet de faire fonctionner dans les meilleurs délais, avec des techniques de contrôle qui a été établie, il détermine la puissance disponible par le générateur photovoltaïque et la puissance de charge demandée.

Nous avons utilisé un méthode et algorithme MPPT (P&O) c'est la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (G_{PV}) et la charge pour optimiser l'énergie produite et tirer le maximum de puissance que le Générateur PV.

Quand le panneau photovoltaïque n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge, On a utilisé la batterie plomb-acide d'un système pour compléter le manque de puissance du panneau photovoltaïque.

Nous avons utilisé une commande sur un convertisseur Bidirectionnel (dévolteur-survolteur) connectée avec batterie pour optimiser la gestion d'un système et tension de bus continue avec régulateur PI qui commande le hacheur utilisé pour l'opération de charge et décharge de batterie, et Afin de tester l'efficacité des différentes commandes dans système autonome hybride.

Finalement nous avons illustré la simulation sous Matlab-Simulink pour donner les résultats obtenus on put valider l'étude théorique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **Belhadj Mohammed** « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister 2007/2008, Universitaire De Bechar.
- [2] **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'Ottawa, 1998
- [3] **F. LASNIER**, "Photovoltaic engineering handbook", ed. Adam Hilger, U.K. ; 1990.
- [4] <http://projet3e.blogspot.com/> et <http://misen.ma/sim/images/?SD>.
- [5] **M. Chaabene**, « Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques », mémoire de magister, université de Sfax, 2008.
- [6] **BENLAHBIB Boualam**, « Supervision d'un système hybride éolienne-Photovoltaïque connecté au réseau électrique », mémoire de diplôme de DOCTORAT, université de USTHB
- [7] **A. Bouharchouche, A. Bouabdallah**, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [8] <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>.
- [9] **A. Cid-Pastor**, « Conception et réalisation de modules photovoltaïque électronique », Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse 2006.
- [10] **Ludovic PROTIN, Stéphan ASTIER**, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [11] **Professeur : J-J. PIREAUX**, « Travail sur les panneaux photovoltaïque », Université Notre -Dame de la Paix, Article : Année 2006-2007
- [12] **Bendjellouli Zakaria**, « Contribution A la Modélisation D'une cellule Solaire », Université de Bechar, Mémoire de Magister Soutenu le 28/06/2009
- [13] **Stéphane PETIBON**, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009
- [14] **D. Turcotte, M. Ross and F. Sheriff**. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools » PV Horizon, Canada, 2001

-
-
- [15] **MADACI BOUTHAINA**, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3èmecycle en Electrotechnique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018
- [16] **Nathalie Devillers**, « Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique. Autre. Université de Franche- Comté, 2012.Français.
- [17] **Dirk Uwe Sauer**, « Electrochemical Storage for Photovoltaics », Fraunhofer Institute for Solar Energy System ISE, Freiburg, Germany, 2004
- [18] **MAHMOUDI Sabrina**, « Etude de conception d'un système photovoltaïque autonome », Mémoire de MASTER EN ELECTRONIQUE, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.
- [19] **Korichi Taki Eddine**, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », mémoire de Master 2016
- [20] **M. SLAMA Fateh**, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-UFAS (ALGERIE)
- [21] **Krim Med lamine**, « Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque », mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
- [22] **B. Flèche, D. Delagnes**, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [23] **Boualem BENDIB**, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », Doctorat en Sciences en Electrotechnique
- [24] **BOUKAROURA Abdelkader**, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph », Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [25] **O. BENSEDDIK et F. DJALOU**D, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [26] **Mr BOUHARCHOUHE Abderrezzaq**, « ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME, DE PRODUCTION HYBRIDE EOLIEN PHOTOVOLTAÏQUE », ''Mémoire de Magister, Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 18 /02 /2013
-
-

-
-
- [27] **Aamarouyache Mohamed**, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [28] **BENADEL Faiza**, « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV » mémoire de master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2015
- [29] **Mezaache Hatem**, « Poursuite du Point Maximale d'un Système photovoltaïque par les Méthodes Intelligentes », mémoire de master en Electronique, 2016
- [30] **BELKAID Abdelhakim**, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome » thèse doctorat université Ferhat Abbas - setif 1 2015
- [31] **Daoud Rezzak¹, Abdelkader Sitayeb¹, Yahia Houam¹, Khaled Touafek¹, Nasserline Boudjerda** Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria
- [32] **Vincent Benamara**, « étude et Simulation D'un panneaux Solaire Raccordé Au réseaux Avec Périphérique De stockage », Mémoire à l'école Technologie Supérieur Université De Québec,2012
- [33] **MARTIN TAÏKI VAÏTCHEMÉ**, « Modélisation et simulation D'un système De Stockage Intégrer Dans Un mécro-réseaux Autonome solaire -éolien », MÉMOIRE, Université De Québec, En Abitibi Témiscamingue
- [34] **Adjimi Nadia**, « Modélisation et commande d'un onduleur MLI », Mémoire de fin d'études, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi