

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Thèse

de Doctorat en Sciences

Spécialité : Automatique

Présentée par :
BELHADJ DJILALI Abdelkadir
Magister en Electrotechnique, Univ. HBB, Chlef

Thème

**Contribution à l'optimisation de la Commande
MPPT dans une Installation Hybride
(Photovoltaïque-Diesel)**

<i>Président :</i>	TADJINE Mohamed	Professeur	ENP
<i>Directeur de thèse :</i>	HEMICI Boualem	Professeur	ENP
<i>Examineurs :</i>	- GROUNI Saïd	Professeur	UMB Boumerdes
	- BOUCHHIDA Ouahid	Professeur	UYF Médéa
	- BENZINEB Omar	MCA	USD Blida
	- MAHMOUDI Mohand Oulhadj	Professeur	ENP

ENP 2019

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Thèse

de Doctorat en Sciences

Spécialité : Automatique

Présentée par :
BELHADJ DJILALI Abdelkadir
Magister en Electrotechnique, Univ. HBB, Chlef

Thème

Contribution à l'optimisation de la Commande MPPT dans une Installation Hybride (Photovoltaïque-Diesel)

<i>Président :</i>	TADJINE Mohamed	Professeur	ENP
<i>Directeur de thèse :</i>	HEMICI Boualem	Professeur	ENP
<i>Examineurs :</i>	- GROUNI Saïd	Professeur	UMB Boumerdes
	- BOUCHHIDA Ouahid	Professeur	UYF Médéa
	- BENZINEB Omar	MCA	USD Blida
	- MAHMOUDI Mohand Oulhadj	Professeur	ENP

ENP 2019

Avant-propos

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire de Commande des Processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).

Je remercie profondément Monsieur **Boualem HEMICI**, Professeur à l'ENP d'Alger, d'avoir dirigé cette thèse. Ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été pour moi une source de motivation.

Je tiens à remercier Monsieur **Mohamed TADJINE**, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer mes remerciements en vers les membres du jury examinateurs :

Je tiens également à adresser, mes sincères remerciements à Monsieur **Mahmoudi Mohand Oulhadj**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), à Monsieur **Saïd GROUNI**, Professeur à l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès (UMB), à Monsieur **Ouahid BOUCHHIDA**, Professeur à l'Université Yahia Feres de Médéa (UYF) et à Monsieur **Omar BENZINEB**, Maître de Conférences à l'Université Saâd Dahlab de Blida (USD) pour avoir accepté la charge d'examineurs.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance, à tous les enseignants du département d'Automatique de l'ENP d'Alger, en particulier les professeurs **Mohamed seghir Boucherit** et **Lazhari NEZLI**.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues enseignants du département de l'électrotechnique de l'UHBB de Chlef. Mes sincères remerciements vont aussi aux personnes qui m'ont aidé en contribuant, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

*A la mémoire de mon père,
A ma chère mère,
A mon frère,
A ma femme,
A mes enfants,
A toutes la famille,
Je dédie cette thèse.*

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة دمج الطاقة الفوتوضونية مع الديزل، الذي يعتبر مفتاح الأمان لزيادة موثوقية النظام الهجين لتزويد المستهلك بالطاقة دون انقطاع، ولكن استخدامه يزيد من تلوث الهواء، هذا المشكل دفعنا إلى استعمال البطاريات لتخزين الفائض من الطاقة الناتجة عن النظام الفوتوضوني خلال النهار ومن ثم استخدامها قدر الممكن بدلا من الديزل. التغير السريع في إشعاع الشمس يسبب خطأ في النقاط النقطة الأعظمية للاستطاعة وبالتالي خسارة في الطاقة التي كانت من المفروض أن تستخدم كطاقة مخزنة في البطاريات أو لتزويد المستهلك و بالتالي إطالة عدم استعمال الديزل. في هذه الأطروحة بدأنا بحثنا بدراسة عامة حول النظام الهجين، في القسم الثاني قدمنا شرح مفصل على النظام الفوتوضوني و في الفصل الثالث طبقنا إستراتيجية جديدة على التحكم P&O التقليدية لكي تأخذ بعين الاعتبار كل من (ΔI) ، (ΔV) و (ΔP) لاستشعار التغيرات المناخية ثم أضفنا لها (Δdn) المحسن لإضفاء الكفاءة على النظام الفوتوضوني في استخراج النقطة الأعظمية للاستطاعة عند التغير المفاجئ في إشعاع الشمس و في الفصل الأخير اقترحنا خوارزمية المراقبة وتسيير الطاقة و تحكم هجين يجمع بين طريقة التحكم P&O المحسنة و طريقة المنطق الضبابي (FLC). أسفرت هذه التحسينات عن نتائج مرضية سمحت لنا بتحسين كفاءة النظام من حيث الموثوقية في حالة التغيرات المفاجئة لإشعاع الشمس وعند زيادة الحمولة، كما نجحنا في التقليل من حالة "عمل" الديزل.

الكلمات المفتاحية: النظام الفوتوضوني، التحكم P&O، تحكم المنطق الضبابي (FLC)، الديزل، البطاريات

Abstract:

This thesis deals with the integration of photovoltaic energy with diesel, which is considered the key security to increase the reliability of the hybrid system for the supply of energy quality and without interruption, but its use increases pollution of the air, this problem has led to the use of batteries to store surplus energy generated by the photovoltaic system during the day and then use them instead of diesel. The rapid change in solar irradiation causes the error of extracting the MPP and thus a loss of energy occurs, which was supposed to be used as energy stored in the batteries or to provide electrical energy thus prolonging the diesel "off". In this thesis, we started our research by a state of the art on hybrid systems, in a second part we gave a detailed explanation of the photovoltaic system and in the third chapter, we applied a new strategy on P&O conventional to take into account (ΔI) , (ΔV) and (ΔP) to detect the climatic variation and then we added a new step size (Δdn) in order to optimize the photovoltaic system to extract the maximum power point MPP in the sudden change of solar radiation. In the last chapter, we proposed two solutions to improve the hybrid system, the first solution is to optimize the performance of the MPPT to extract the MPP of PV by combining the modified P&O with the fuzzy logic control (FLC), and the other solution is to optimize the energy management of the photovoltaic-diesel-battery system by an algorithm of supervision and energy management. These solutions gave satisfactory results that allowed us to improve the system efficiency in terms of reliability in case of climatic variations, load increase and we managed to reduce the state "On" of diesel.

Keywords: Photovoltaic system, P&O, FLC, Diesel, Battery

Résumé :

Cette thèse traite l'intégration de l'énergie photovoltaïque aux systèmes diesel, ce qui est considéré la clé de sécurité pour augmenter la fiabilité du système hybride pour la fourniture de la qualité énergétique et sans interruption, mais son utilisation augmente la pollution d'air, ce problème a conduit à l'utilisation des batteries pour stocker l'énergie excédentaire générée par le système photovoltaïque au cours de la journée et ensuite les utiliser à la place du diesel. Le changement rapide de l'irradiation solaire cause l'erreur d'extraire le MPP et donc une perte d'énergie se produit, ce qui était censé être utilisée comme énergie stockée dans les batteries ou pour fournir de l'énergie électrique pour prolonger l'état « off » du diesel. Dans cette thèse, nous avons commencé nos recherches par un état de l'art sur les systèmes hybrides, dans une deuxième partie nous avons donné une explication détaillée du système photovoltaïque et dans le troisième chapitre, nous avons appliqué une nouvelle stratégie sur la commande P&O conventionnelle pour prendre-t-elle en compte (ΔI) , (ΔV) et (ΔP) afin que détecter le changement climatique et ensuite nous avons ajouté un nouveau pas de perturbation (Δdn) afin d'optimiser le système photovoltaïque à extraire le point de puissance maximale MPP dans le changement soudain du rayonnement solaire. Dans le dernier chapitre, nous avons proposé deux solutions pour améliorer le système hybride, la première solution est pour d'optimiser la performance de la commande MPPT à extraire le MPP du PV en combinant la commande P&O modifiée avec la commande de la logique floue (FLC), et l'autre solution est pour d'optimiser la gestion d'énergie du système photovoltaïque-batteries-diesel par un algorithme de supervision et gestion d'énergie. Ces solutions ont donné des résultats satisfaisants qui nous ont permis d'améliorer l'efficacité du système en termes de fiabilité en cas des variations climatiques et en cas d'augmentation de la charge, et nous avons réussi à réduire l'état "On" du diesel.

Mots clés : Système photovoltaïque, P&O, FLC, Diesel, Batterie

Table des matières

Abréviations et Notations

Liste des figures et tableaux

Introduction générale..... 16

Chapitre I : État de l'art sur le système d'énergie hybride photovoltaïque-diesel

I.1. Introduction..... 19

I.2. Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides..... 19

I.3. Intérêt du système hybride photovoltaïque-diesel..... 21

I.4. Description des composants du système hybride PV-diesel..... 22

 I.4.1. Les panneaux photovoltaïques..... 22

 I.4.2. Le stockage d'énergie..... 23

 I.4.3. Le générateur diesel..... 23

 I.4.5. Convertisseurs..... 24

 I.4.6. Charge..... 24

I.5. Les différents types de systèmes PV-diesel..... 25

 I.5.1. PV- diesel sans système de stockage..... 25

 I.5.2. PV- diesel avec système de stockage..... 25

I.6. Etat de l'art sur les stratégies de contrôle et de supervision..... 25

 I.6.1. Stratégies de commande des sources..... 26

 I.6.1. 1. Etat de l'art sur les techniques MPPT dans les applications PV... 26

 I.6.2. Stratégies de stockage..... 31

 I.6.3. Stratégies de supervision..... 32

I.7. Configurations du système PV-diesel..... 33

 I.7.1. Configuration à bus DC..... 33

 I.7.2. Configuration mixte à bus AC..... 34

 I.7.3. Configuration mixte à bus DC/AC..... 34

I.8. Conclusion..... 35

Chapitre II : Le système photovoltaïque

II.1. Introduction..... 38

II.2. Energie solaire..... 38

II.3. Rayonnement solaire.....	39
II.4. Conversion photovoltaïque.....	40
II.5. L'effet photovoltaïque.....	40
II.5.1. La Cellule solaire.....	41
II.5.1.1. Cellule au silicium mono cristallin.....	41
II.5.1.2. Cellule au silicium poly-cristallin.....	42
II.5.1.3. Cellule au silicium amorphe.....	42
II.6. Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule PV.....	44
II.7. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque.....	45
II.7.1. Caractéristique courant-tension I-V.....	45
II.7.2. Paramètres externe.....	46
II.7.2.1. Courant de court-circuit.....	47
II.7.2.2 Tension de circuit ouvert.....	47
II.7.2.3 Influence des résistances série et shunt.....	47
II.7.2.4. Influence du flux lumineux.....	49
II.7.2.5 Influence de la température.....	50
II.7.3. Les différents groupements des cellules PV.....	51
II.7.3.1. Groupement série.....	52
II.7.3.2. Groupement parallèle.....	53
II.7.3.3. Groupement mixte (série-parallèle).....	53
II.8. Le module photovoltaïque.....	55
II.9. Le champ photovoltaïque.....	55
II.10. Simulation du panneau solaire.....	56
II.10.1. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique P-V..... du GPV	57
II.10.2. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique I-V..... du GPV	57
II.11. Conclusion.....	58
Chapitre III : Élimination de déviation du mode de recherche de la commande MPPT	
III.1. Introduction.....	61
III.2. Système photovoltaïque.....	62
III.3. Convertisseur Statique (Hacheur BOOST).....	62
III.3.1. Modélisation du convertisseur Boost.....	62
III.4. La commande MPPT.....	64

III.5. P&O classique avec un pas de perturbation fixe (PPF).....	64
III.5.1. Application de la P&O (PPF) classique à la poursuite du MPP.....	66
III.5.1.1. P&O(PPF) classique pour des conditions climatiques standards	66
III.5.1.2. P&O(PPF) classique pour des conditions climatiques variables	68
III.6. P&O classique avec un pas de perturbation variable (PPV).....	70
III.6.1. L'application de la P&O(PPV) classique à la poursuite du MPP.....	71
III.6.1.1. P&O(PPV) classique pour des conditions climatiques standards	71
III.6.1.2. P&O(PPV) classique pour des conditions climatiques variables	72
III.7. Élimination de déviation du mode de recherche de MPPT.....	73
III.7.1.La déviation du mode de recherche.....	73
III.7.2 La commande P&O modifiée.....	75
III.7.2.2 Application de la P&O (PPF) modifiée à la poursuite du MPP	77
III.8. Résultats de simulation.....	79
III.9. Conclusion.....	80

Chapitre IV : Optimisation d'une Commande MPPT dans une Installation Hybride PV-Diesel

IV.1. Introduction.....	82
IV.2. Représentation du système étudié.....	82
IV.3. Le rôle de stockage dans une installation hybride PV/Diesel.....	83
IV.3.1. Modélisation du système de stockage.....	84
IV.4. Stratégie de l'algorithme de supervision et gestion d'énergie.....	84
IV.4. 1 Scénario stratégie de supervision et gestion d'énergie.....	84
IV.5. Résultats de simulation et discussions (Commande P&O).....	87
IV.5. 1. Scénarios 1 : Profil de charge variable et condition climatique fixe.....	88
IV.5. 2. Scénarios 2 : Profil de charge fixe dans des conditions climatiques.....	93
variables	
IV.6. Élimination de déviation du mode recherche de la commande MPPT dans.....	100
le système hybride photovoltaïque-diesel	
IV.6.1 Commande MPPT par la logique floue.....	100
IV.7. Simulation du system hybride PV-diesel par la commande FLC-P&O modifiée	104
IV.7.1. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système.....	105
photovoltaïque	
IV.7.2. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système.....	105
photovoltaïque-batteries	

IV.7.3. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système.....	107
photovoltaïque-batteries-diesel	
IV.8. Conclusion.....	108
Conclusion générale	109
Bibliographie	111
Annexes	116
Annexe A : Paramètres du système photovoltaïque.....	116
Annexe B : Modèle mathématique des batteries au plomb.....	117
Annexe C : Schémas bloc de la commande P&O.....	121

Abréviations et Notations

1. Liste des Abréviations

GPV	Générateurs Photovoltaïques ;
AC	Alternating Current ;
DC	Direct Current ;
DC/DC	Direct Current / Direct Current ;
AC/DC	Alternating Current / Direct Current ;
MPPT	Maximum Power Point Tracking;
PV	Photovoltaïque ;
PPM	Point de Puissance Maximale ;
I-V	Current-Voltage;
P-V	Power-Voltage;
HC	Hill Climbing;
IncCond	Incremental Conductance;
PF	Point de Fonctionnement;
GD	Générateur Diesel ;
AM	Air Mass;
P-N	Positive-Negative;
P&O	Perturbation et Observation;
PPF	Pas de Perturbation Fixe;
PPV	Pas de Perturbation Variable;
ASGE	Algorithme de Supervision et Gestion d'Énergie;
SOC	State Of Charge;
FLC	Fuzzy Logic Control;
Cd-Ni	Cadmium-Nickel;

2. Liste des Notations

I_{pv}	Courant du GPV ;
V_{pv}	Tension du GPV ;
P_{pv}	Puissance du GPV ;
d	Rapport cyclique ;
V_{oc}	Tension circuit ouvert ;

V_{opt}	Tension optimale ;
G	Eclairement ;
E	Erreur ;
ΔI	Changement du courant ;
ΔV	Changement de la tension ;
ΔP	Changement de la puissance ;
ΔD	Changement du Rapport cyclique du convertisseur ;
ΔE	Changement d'erreur ;
L, C_1, C_2	Inductance, Condensateur d'entrée, Condensateur de sortie ;
I_0, V_0	Courant et tension du bus continu ;
R_s :	Résistance série ;
D	Diode ;
I	Courant générer par la cellule et fournie à la charge ;
V	Tension aux bornes de la charge ;
T	Température de la jonction ;
n	Facteur d'idéalité ;
q	Charge d'électron ;
K	Constante de boltzman ;
I_0	Courant de saturation inverse de la diode ;
I_{cc}	Courant de court circuit ;
N_s	Nombre de cellule série ;
N_p	Nombre de cellule parallèle ;
A	Surface du panneau solaire ;
η	Rendement PV ;
$P_{Surplus}$	Puissance totale, qui résulte de la différence entre la puissance disponible et la puissance demandée par la charge ;
PC	Puissance de la charge ;
P_{GD}	Puissance fournis par le diesel ;
P_{BAT}	Puissance fournis par les batteries ;
P_{RE}	Puissance renouvelable ;
P_{ds}	Puissance nominale du diesel ;
η_{BAT}	Rendement de charge-décharge de la batterie ;
Δt	Pas de simulation ;

η_{Ond}	Rendement de l'onduleur ;
C, V_c	Capacité et tension du condensateur ;
V_{max}, V_{min}	tension maximale et tension minimale de la batterie ;
C_{bp}	Capacité de la charge de la batterie ;
R_{bs}, R_{bl}	Résistance interne de la batterie ;
V_b	Tension de batterie ;

Liste des Figures et Tableaux

1. Liste des Figures

Figure I.1 :	Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage	20
Figure I.2 :	Système hybride photovoltaïque-diesel	21
Figure I.3 :	Exemple d'installation des panneaux photovoltaïques	22
Figure I.4 :	Configuration du groupe électrogène	24
Figure I.5 :	Organigramme de la première commande MPPT	27
Figure I.6 :	Principe de la méthode HC	29
Figure I.7 :	Algorithme de la méthode HC	29
Figure I.8 :	Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond	30
Figure I.9 :	Organigramme de la méthode IncCond	31
Figure I.10 :	Configuration d'un système PV-diesel à bus DC	33
Figure I.11 :	Configuration d'un système PV-diesel à bus AC	34
Figure I.12 :	Système hybride à bus mixte (parallèle)	35
Figure II.1 :	Analyse spectrale du rayonnement solaire	39
Figure II.2 :	Cellule au Silicium Monocristallin	41
Figure II.3 :	Cellule au Silicium Poly cristallin	42
Figure II.4 :	Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	42
Figure II.5 :	Représentation d'une jonction P-N d'une cellule PV montrant la création des paires Trous-Electrons par l'absorption des photons	43
Figure II.6 :	Les électrons circulent à partir du côté N, traversant la charge, et reviennent au côté P	43
Figure II.7 :	circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	44
Figure II.8 :	Influence de la résistance shunte sur la caractéristique I-V	48
Figure II.9a :	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque pour différentes valeurs de l'ensoleillement à une température constante 25°C	49
Figure II.9b :	Caractéristique P-V d'une cellule pour différentes valeurs d'ensoleillement à température constante 25°C	50
Figure II.10a :	Caractéristique I-V d'une cellule pour différentes températures T à ensoleillement constant 1000W/m ²	51
Figure II.10b :	Caractéristique (P-V) d'une cellule pour différentes valeurs de température T à ensoleillement constant 1000W/m ²	51
Figure II.11 :	Caractéristique I-V et P-V d'un groupement Ns cellules en série	52
Figure II.12 :	Caractéristique I-V et P-V d'un groupement Np cellules en parallèles	53

Figure II.13 :	Association mixte des cellules	54
Figure II.14 :	Groupement mixte des cellules photovoltaïques	54
Figure II.15 :	Composantes d'un champ de panneaux photovoltaïques	55
Figure II.16 :	Caractéristique I-V et P-V de GPV dans les conditions climatique $G=100W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$	56
Figure II.17 :	Changement du MPP en fonction de l'éclairement	57
Figure II.18 :	Influence de la température sur MPP	57
Figure II.19 :	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V du GPV	58
Figure II.20 :	Influence de la température sur la caractéristique I-V du GPV	58
Figure III.1 :	Schéma synoptique du système photovoltaïque	61
Figure III.2:	Montage Boost	62
Figure III.3 :	Schéma électrique de base du convertisseur Boost a) Structure globale b) Structure avec interrupteur fermé c) Structure avec interrupteur ouvert	63
Figure III.4 :	Organigramme de la commande P&O (PPF) classique	65
Figure III.5 :	P&O(PPF) classique dans des conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}C$ et $G=1000 W/m^2$), a)Variation de rapport cyclique d b) Le courant PV, c) La tension PV	66
Figure III.6 :	P&O(PPF) classique avec deux pas de perturbations déferents sous des conditions climatiques standards, a) variation de rapport cyclique d b) Le courant PV, c) La tension PV	67
Figure III.7 :	Conditions climatiques variables	68
Figure III.8 :	P&O(PPF) classique sous des conditions climatique variables ($\Delta D = 0.002$)	68
Figure III.9 :	Zoom sur le rapport cyclique, le courant, la tension et la puissance du PV	69
Figure III.10 :	P&O(PPF) classique avec deux pas de perturbations déferents sous des conditions climatiques variables. a) variation de rapport cyclique d b) Le courant, c) La tension et d) La puissance PV	70
Figure III.11 :	Organigramme de la commande P&O(PPV) classique	71
Figure III.12 :	Comparaison entre P&O (PPF) et P&O (PPV) classiques dans des conditions climatiques standard	72
Figure III.13 :	Comparaison entre P&O(PPF) et P&O(PPV) dans des conditions climatiques changeantes	73
Figure III.14 :	Diminution rapide de l'irradiation	74
Figure III.15 :	Augmentation rapide de l'irradiation	74
Figure III.16 :	Observation du changement de courant	76

Figure III.17 :	Élimination la déviation du mode de recherche de MPP	76
Figure III.18 :	Organigramme de P&O(PPF) modifiée	77
Figure III.19 :	Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPF) modifiée dans des conditions climatiques variables	78
Figure III.20 :	Organigramme de P&O(PPV) modifiée	78
Figure III.21 :	Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPV) modifiée dans des conditions climatiques variables	79
Figure III.22 :	Comparaison entre P&O(PPV) classique et P&O(PPV) modifiée dans des conditions climatiques variable	80
Figure IV.1 :	Configuration le système hybride étudié avec ASGE	83
Figure IV.2 :	Organigramme de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie photovoltaïque- batteries-diesel	86
Figure IV.3 :	Température et irradiation	88
Figure IV.4 :	Puissance électrique produite par le système PV	88
Figure IV.5 :	Comportement des batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque	89
Figure IV.6 :	Puissance électrique produite par le système PV-batteries	90
Figure IV.7 :	Comportement de batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque- diesel	91
Figure IV.8 :	L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs	92
Figure IV.9 :	Puissance électrique produite par le système PV-batteries-diesel	93
Figure IV.10 :	(a) Température variable. (b) Irradiation variable. (c) Puissance électrique produite par le système PV	94
Figure IV.11 :	Comportement de batteries avec algorithme de gestion dans le système photovoltaïque (25KW)	95
Figure IV.12 :	Puissance électrique produite par le système PV-batteries (charge de 25KW)	96
Figure IV.13 :	Comportement de batteries avec algorithme de gestion dans le système photovoltaïque-diesel (25KW)	97
Figure IV.14 :	L'état On/Off du diesel dans le système hybride (25KW)	98
Figure IV.15 :	Puissance électrique produite par le PV-batteries-diesel (charge 25KW)	99
Figure IV.16 :	Problème d'accélération de la décharge des batteries	99
Figure IV.17 :	Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue	101
Figure IV.18 :	Les sous-ensembles pour les entrées (a) $E(j)$, (b) $\Delta E(j)$ et la sortie (c) $d(j)$	101
Figure IV.19 :	Organigramme de l'algorithme FLC-P&O modifiée	103
Figure IV.20 :	Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme hybride proposé	104

Figure IV.21 :	Élimination la déviation du mode de recherche de MPP	105
Figure IV.22 :	Comportement des batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque contrôlé par FLC-P&O modifiée	106
Figure IV.23 :	Le système hybride avec PV contrôlé par la commande FLC-P&O modifiée	106
Figure IV.24 :	Charge/décharge de batteries et l'état Off du diesel	107
Figure B.1 :	Modèle équivalent de la batterie	
Figure C.1 :	Schémas bloc de la méthode P&O(PPF) classique	
Figure C.2 :	Schémas bloc de la méthode P&O(PPF) modifiée	
Figure C.3 :	Schémas bloc de la méthode P&O(PPV) modifiée	

2. Liste des Tableaux

Tableau IV.1 :	La commande des interrupteurs	87
Tableau IV.2 :	Tableau de règles d'inférence	102
Tableau A.1 :	Paramètres du panneau photovoltaïque	116
Tableau A.2 :	Caractéristiques du panneau photovoltaïque	116
Tableau A.3 :	Paramètres du hacheur BOOST	116

Introduction générale

Les systèmes hybrides de production d'électricité sont de plus en plus utilisés dans la production d'énergie pour surmonter les problèmes de fourniture d'énergie aux sites isolés, où il s'agit d'une combinaison de plusieurs sources (énergies purement renouvelables ou énergies renouvelables intégrant avec des énergies fossiles) [DAL09].

L'intégration de l'énergie photovoltaïque aux systèmes diesel est une solution technologique appropriée pour produire de l'électricité efficacement et à faible coût.

Le choix d'intégrer l'énergie photovoltaïque avec le diesel n'est pas futile mais est dû à plusieurs raisons telles que le déficit du système photovoltaïque à répondre aux besoins énergétiques du consommateur d'une part et dans les variations climatiques et l'augmentation soudaine des charges d'autre part.

Le diesel est la clé de sécurité pour augmenter la fiabilité du système hybride pour fournir de l'électricité sans interruption, mais on sait que son utilisation du carburant pour produire de l'électricité provoque des émissions de gaz qui augmentent la pollution de l'atmosphère, ce problème a conduit à utiliser des batteries pour stocker l'énergie générée en surplus par le système photovoltaïque au cours de la journée et ensuite les utiliser à la place du diesel lorsque le déficit du système photovoltaïque existe.

L'énergie photovoltaïque est affectée par la variation climatique, notamment lorsque le changement rapide du rayonnement solaire cause l'erreur d'extraire le maximum de puissance [KIL15], [YOU11], [NAS12] et donc une perte d'énergie se produit, entraînant la perte d'énergie supposée être utilisée comme énergie stockée dans les batteries ou pour fournir de l'énergie électrique pour prolonger l'état « off » du diesel.

Dans cette thèse, nous avons donné des solutions pour utiliser l'énergie propre autant que possible au lieu du diesel pour réduire les émissions de gaz afin que notre système soit respectueux de l'environnement. La première solution consiste à optimiser la performance de la MPPT « Perturbe and Observe » conventionnelle pour éliminer l'oscillation autour du point de puissance maximum et pour éviter le phénomène de déviation du mode recherche du MPP en cas de changement rapide du rayonnement solaire, cette solution permet de résoudre le problème de perte d'énergie et donc profiter au maximum de l'utilisation des batteries.

La deuxième solution consiste à subordonner le système hybride photovoltaïque-batteries-diesel à l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie afin de réaliser les objectifs suivants :

- Utiliser optimalement le système photovoltaïque – batteries ;
- Protéger les batteries contre l'état charge minimale et maximale pendant le jour et la nuit ;
- Assurer l'alimentation sans interruption par le diesel.

Ces solutions ont donné des résultats satisfaisants qui nous ont permis d'améliorer l'efficacité du système en termes de fiabilité, en cas de changement climatique et en cas d'augmentation de la charge.

Afin de clarifier ce travail, nous avons divisé cette thèse en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes hybrides, l'état de l'art sur les techniques MPPT usuelles, qui permettent d'extraire le maximum d'énergie des modules PV et un état de l'art sur la conversion énergétique à travers les différents types de générateurs utilisés et les éléments qui leur sont associés.

Dans le deuxième chapitre, après avoir présenté la définition de l'effet PV, des caractéristiques de la cellule PV ont été tracées pour différents paramètres influant sur la conversion d'énergie PV. Des caractéristiques du module PV ont été également tracées pour l'influence de l'éclairement et de la température.

Le troisième chapitre traitera le problème de la déviation du mode de recherche de MPP de la commande P&O classique dans les changements soudains de l'irradiation et l'application de notre méthode (P&O modifiée) sur le système photovoltaïque.

Enfin, le quatrième chapitre présentera l'algorithme de la supervision et la gestion d'énergie du système hybride (photovoltaïque- batteries-diesel) avec les différentes commandes (P&O classique et la commande MPPT proposée). Le système sera simulé sous MATLAB/SIMULINK.

Chapitre I

**État de l'art sur le système d'énergie
hybride photovoltaïque-diesel**

I.1. Introduction

Dans les réseaux de petites puissances en site isolé, trois critères peuvent être pris en compte pour leur classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique ou conventionnelle qui peut être un générateur diesel. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage permettant d'assurer une meilleure satisfaction des besoins du consommateur pendant les périodes de chute et d'arrêt de production.

Les dispositifs de stockage peuvent être des systèmes de stockages, des réservoirs d'hydrogène ou des volants d'inertie... Le dernier critère de classification possible est celui relatif aux types de sources d'énergie renouvelable utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, une petite centrale hydroélectrique ou une combinaison de ces sources.

L'insertion des diverses sources d'énergies dans un système hybride doit avoir une conséquence profitable et bénéfique sur la production d'énergie, en terme de coût et disponibilité, aussi bien que le bilan écologique est présumé favorable. Les moyens de production d'énergies renouvelables représentent des capacités de production variables, incertaines et souvent intermittentes et fluctuantes, non corrélées à la demande de charge. L'objectif d'un système hybride est d'assurer la demande de charge et d'optimiser sa production afin de combler l'énergie demandée par la charge durant la période d'intermittence et tout en maintenant la qualité d'énergie fournie.

Le système hybride photovoltaïque- diesel est un producteur de l'énergie électrique au profit d'un site à caractère social, technique ou économique, ce système permet de réduire les coûts d'investissement et diminuer l'effet de la pollution grâce à la gestion commutative entre le générateur photovoltaïque et le groupe diesel.

I.2. Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différents sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé. Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie

énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [DAL09]. La figure I.1 représente le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge et les éléments de stockage (en pointillé sur la figure I.1) [ABB12].

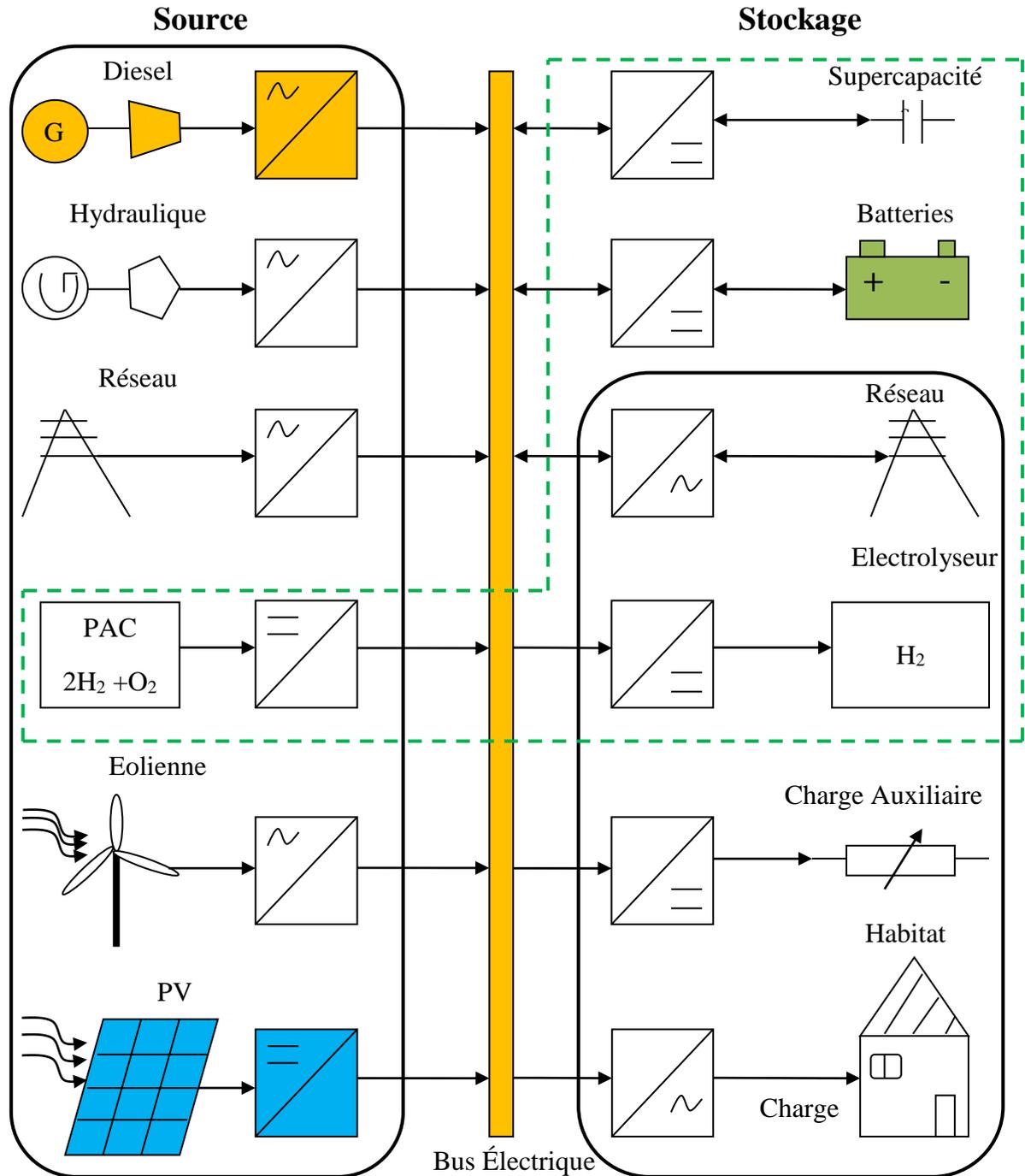


Figure I.1 : Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage

Dans nos travaux de recherche, nous nous intéressons principalement aux systèmes hybrides formés par une source renouvelable de type photovoltaïque et une source conventionnelle (diesel) et une unité de stockage (figure I.2). En effet, les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées pour l'éclairage domestique, les systèmes de production de froid, le pompage de l'eau et les systèmes de télécommunications.

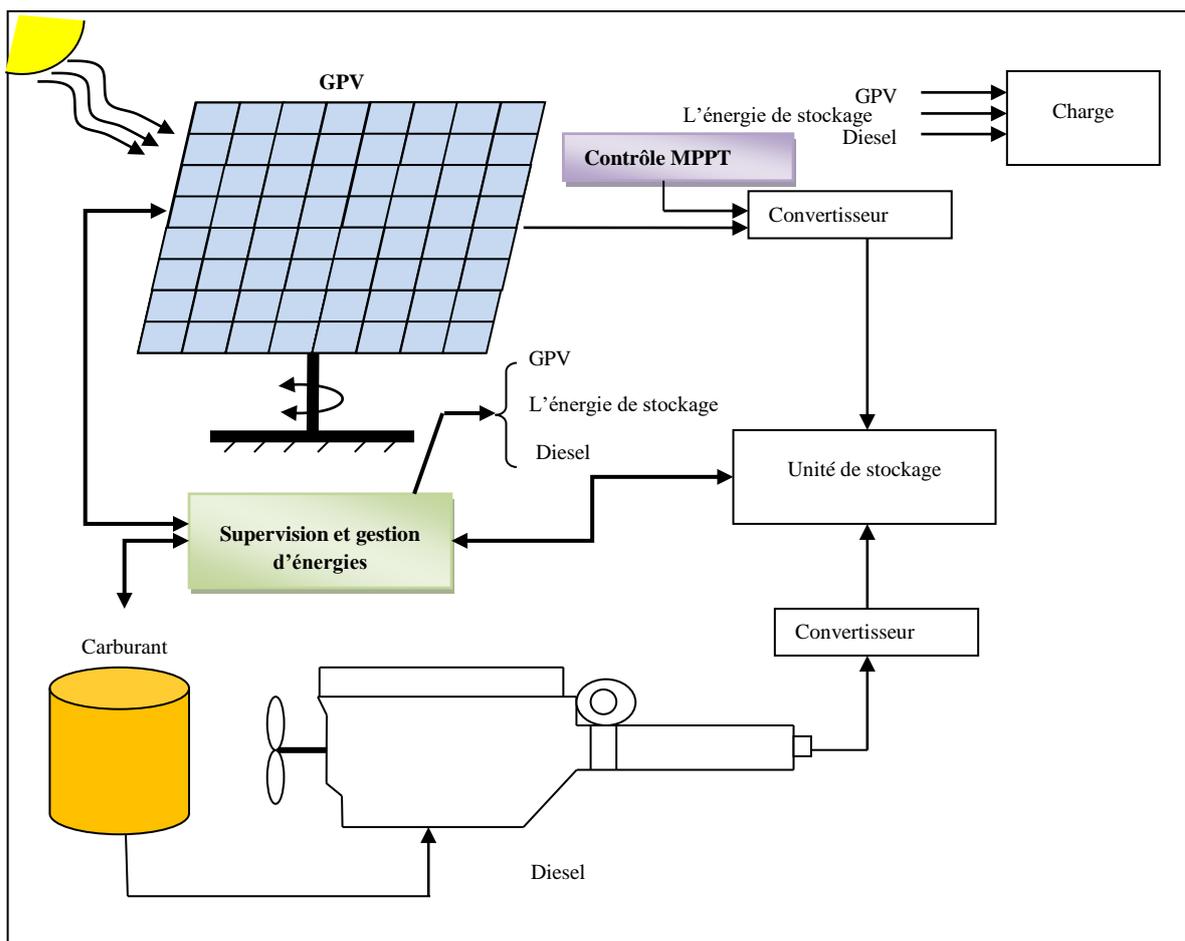


Figure I.2 : Système hybride photovoltaïque-diesel

I.3. Intérêt du système hybride photovoltaïque-diesel

De nos jours, les groupes diesel ne sont plus une meilleure solution, à cause de leurs coûts d'exploitation élevés, de leur maintenance complexe et de la nécessité de transporter et de stocker le carburant. D'une part, la préoccupation grandissante concernant les problèmes environnementaux, d'autre part les progrès en matière de développement de technologies propres contribuent à faire des énergies renouvelables des solutions efficaces et efficientes en matière de développement durable et de préservation de l'environnement.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie telles que le soleil, permet de rendre plus fiable et efficiente la fourniture de l'énergie électrique. Les systèmes hybrides présentent les qualités suivantes :

- Fiabilité ;
- Flexibilité ;
- Economique.

Dans les systèmes hybrides PV/diesel, le système PV permet de réduire le temps de fonctionnement du groupe, sa consommation en carburant, les coûts d'exploitation et de maintenance. On peut donc situer l'intérêt des systèmes hybrides à ces niveaux, à savoir :

- Diminuer le temps de fonctionnement des groupes diesel ;
- Diminuer la consommation en carburant ;

I.4. Description des composants du système hybride PV-diesel

I.4.1. Les panneaux photovoltaïques

La seconde énergie disponible en grande quantité sur la surface terrestre est l'énergie solaire, caractérisée par l'ensoleillement qui donne l'énergie fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée, en J/m^2 , et par l'irradiation solaire qui correspond à la puissance à un instant donné, en W/m^2 . Les panneaux photovoltaïques sont des composants semi-conducteurs utilisant leur propriété de photo-électricité pour générer de la puissance électrique. Chaque panneau est constitué de cellules photovoltaïques conçues à partir de jonctions PN, connectées entre elles en série.



Figure I.3 : Exemple d'installation des panneaux photovoltaïques

I.4.2. Le stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système hybride en site isolé ou pour une utilisation autonome. Dans le plus part des cas, le stockage au moyen de batteries représente la technologie la plus rentable. Les batteries utilisées sont habituellement des batteries à plomb – acide. La technologie des batteries à plomb – acide bénéficie de leurs faibles coûts par rapport à d'autres technologies et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent, car cette technologie est la plus ancienne.

La nécessité du stockage est essentielle à chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis du rapport d'énergie externe. Le stockage d'énergie répond au besoin de la demande de charge pour une durée relativement longue, qui peut aller d'un jour à des semaines.

A cause de la nature stochastique des ressources renouvelables, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycle de charge et de décharge. La profondeur de décharge de batteries au quelle un accumulateur est soumis dépend de son type. La durée de vie de batteries est fortement liées à l'état de charge, au nombre de cycle de charge/décharge, à la température, aux phénomènes de corrosion, condition d'utilisation, etc.....

I.4.3. Le générateur diesel

Le groupe électrogène est un moteur à carburant diesel couplé à un générateur synchrone. Ce système est menu d'un régulateur de vitesse sur le moteur diesel qui fonctionne en ajustant le flux de carburant au moteur diesel pour garder la vitesse du moteur et du générateur synchrone constante dans le but de maintenir la fréquence électrique à la sortie du générateur synchrone. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

Les réseaux du courant alternatif avec générateur diesel et analogue à ceux interconnectés, fournissent à leurs charges, deux formes d'énergie, active et réactive. L'énergie active se transforme au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc.... Par contre l'énergie réactive sert principalement à alimenter les circuits magnétiques des moteurs électriques et autotransformateurs etc..... en effet cette forme d'énergie, elle n'est pas consommée, mais les courants associés à la puissance réactive augmentent les pertes du système.

Quand un nombre élevé de générateurs diesels sont connecté au réseau, d'abord sont reliés à un bus à DC et puis le réseau, dans ce cas un système de commande est intégré pour la distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Le système de commande le plus répandu est le système numérique.

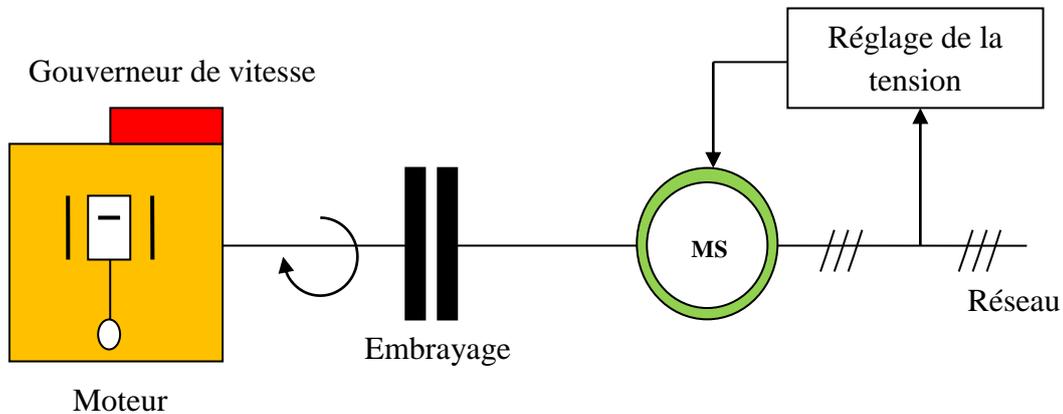


Figure I.4 : Configuration du groupe électrogène

I.4.5. Convertisseurs

L'énergie utilisée en industrie et chez les particuliers provient particulièrement du réseau électrique triphasé. Dans un système hybride, les convertisseurs ont pour fonction de charger les batteries et de transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Les convertisseurs souvent rencontrés sont les redresseurs, onduleurs et hacheurs. Les redresseurs dans les systèmes hybrides réalisent la conversion AC/DC pour charger les batteries, les redresseurs sont des dispositifs à bas prix et de bon rendement. Les onduleurs convertissent le DC en AC. Ils peuvent fonctionner pour autonome pour alimenter des charges à AC ou en parallèle avec une source AC.

Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leurs propres fréquences à la charge. Les onduleurs non autonomes exigent une source à AC pour fonctionner, et les onduleurs, qui assurent les deux régimes de fonctionnement (autonome ou parallèle). Les hacheurs permettent de réaliser la conversion DC/DC comme exemple adapté la tension entre deux sources.

I.4.6. Charge

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Ils existent deux types de charges, les charges résistives et les charges inductives. Les charges résistives contiennent les ampoules à incandescence, chauffe eau, certains chauffages électriques etc. les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives.

Elles sont les principaux consommateurs de l'énergie réactive. Les charges à DC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de la tension et de courant durant les changements dans le fonctionnement du système.

I.5. Les différents types de systèmes PV-diesel

I.5.1. PV- diesel sans système de stockage

Ce système d'alimentation des zones hors réseau est encore quasi inexistant. Dans ce type de système sans système de stockage, un groupe qui fonctionne en appoint aura un fonctionnement aléatoire dû à l'intermittence de la ressource solaire et du profil de charge qui peut être variable. Cela pourrait réduire sa durée de vie. Aussi, en faisant fonctionner le générateur PV en appoint, bien qu'on réduise la taille du groupe électrogène et donc par conséquent la consommation en carburant et l'émission de CO₂, on augmente son temps de fonctionnement, ce qui réduit sa durée de vie.

I.5.2. PV- diesel avec système de stockage

Le groupe électrogène fonctionnant généralement en appoint, le générateur PV fournit la plupart de l'énergie demandée. Dans l'éventualité de mauvaises conditions météorologiques ou d'une demande excessive, le groupe électrogène est programmé pour se mettre en marche dès que la système de stockage d'accumulateurs est déchargée jusqu'à un certain pourcentage (50%) de sa charge nominale. De cette façon, les accumulateurs sont chargés avant qu'ils n'atteignent leur seuil d'épuisement qui risquerait de les endommager.

L'utilisation du système de stockage et du groupe électrogène comme appoint réduit le coût d'installation et augmente la fiabilité du système.

I.6. Etat de l'art sur les stratégies de contrôle et de supervision

Au-delà de son architecture et de son dimensionnement, un système de petite puissance coupé du réseau ne peut atteindre ses objectifs d'autonomie énergétique sans de bonnes stratégies de contrôle et de supervision. La première consiste à piloter le comportement des différents convertisseurs du système pour en maîtriser le point de fonctionnement à court terme ; la seconde adapte les contraintes de la première selon l'état de charge des unités de stockage, pour protéger les composants lorsque l'une d'elle est vide ou pleine.

I.6.1. Stratégies de commande des sources

Nous pouvons distinguer deux parties distinctes dans la stratégie de contrôle de systèmes de puissance coupés du réseau : le contrôle des sources et la gestion du stockage. Tout d'abord, les sources ont pour objectifs de produire un maximum de puissance, afin de couvrir la demande moyenne en permanence, et donc d'assurer l'autonomie énergétique. Les convertisseurs les asservissant sont donc tous soumis à la même problématique : la tension de sortie étant fixée, ils doivent chacun imposer en entrée la tension ou le courant correspondant au point de fonctionnement assurant une production maximale de puissance au générateur qu'ils contrôlent, pour les conditions climatiques imposés par l'environnement à un instant donné.

Ces contrôleurs de maximisation de puissance nommée MPPT (Maximum Power Point Tracking), a pour rôle d'identifier le point de puissance maximal du générateur photovoltaïque pour des paramètres climatiques imposés mais inconnus, en utilisant uniquement des mesures en temps réel des variables électriques.

I.6.1. 1. Etat de l'art sur les techniques MPPT dans les applications PV

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairage). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT, peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM. Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Beaucoup de chercheurs s'intéressent au rappel et à la comparaison des différentes techniques MPPT qui existent dans la littérature [BAH13], [ELT13], [SUB13], [HOH03]. BHATNAGAR cite plus de trente techniques MPPT dans son article [BAH3]. ESRAM et CHAPMAN comparent plusieurs algorithmes MPPT selon leurs dépendances des paramètres des panneaux solaires et de leurs complexités d'implémentation [ESR07]. On peut classer ces méthodes selon PASTOR par [PAS06]:

Le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte ;

- Les paramètres d'entrées de la commande

➤ Le type de recherche ou contrôle.

a- Premiers types de commande MPPT

BOEHRINGER a appliqué la première commande MPPT au PV en 1968 [BOE68]. C'est un algorithme simple pouvant être implémenté numériquement (Figure I.5). Il est destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

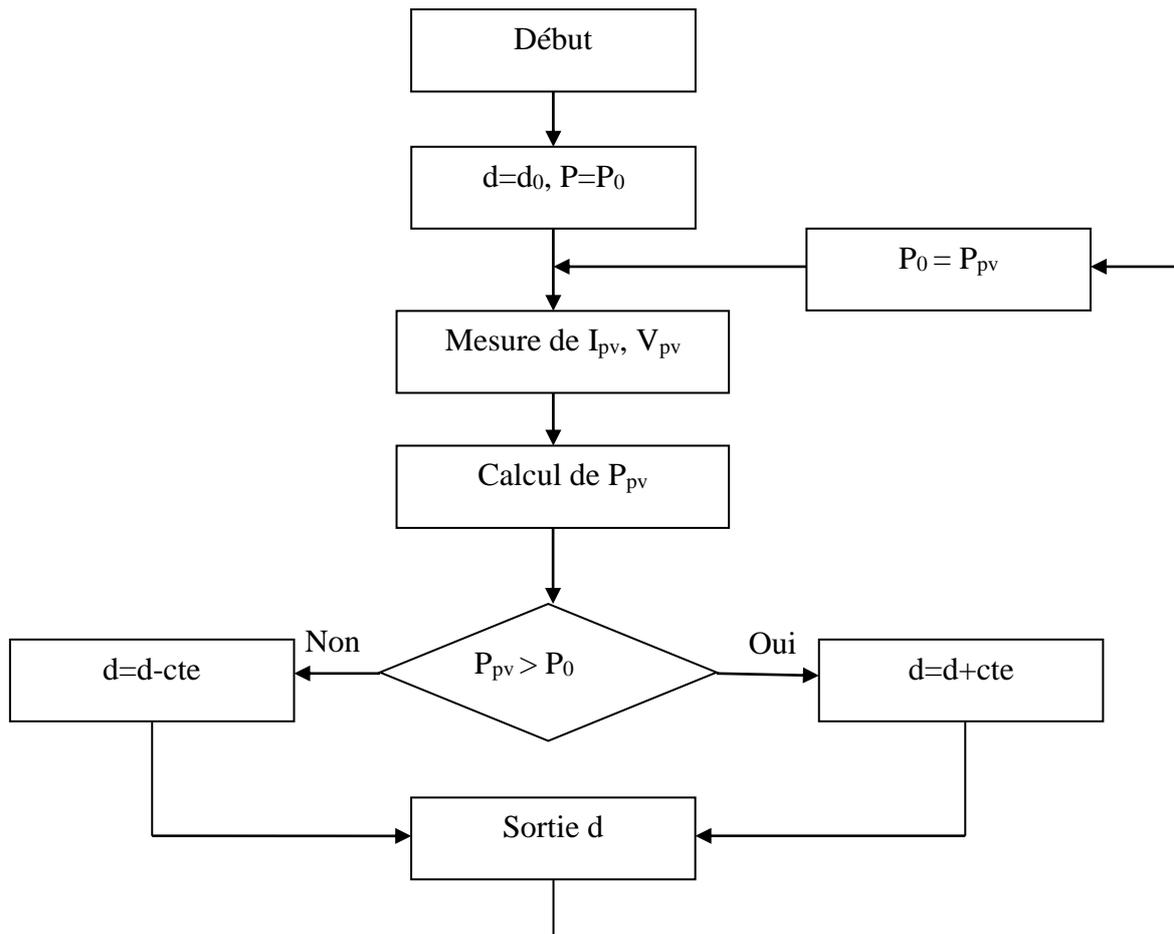


Figure I.5 : Organigramme de la première commande MPPT

b- Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert

Cette méthode se base sur l'utilisation d'une cellule PV comme consigne étalon. Cette cellule étalon, non chargée, placée à côté des modules PV, mesure en temps réel la valeur de la tension en circuit ouvert qui permettra de déterminer la tension de référence. Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension V_{oc} , on trace le graphe $V_{opt}=f(V_{oc})$. Cette fonction obtenue n'est pas linéaire. Pour faciliter le calcul, on doit la rendre linéaire. Ce qui donne [ENS97]:

$$V_{opt}=0.7V_{oc}+0.328 \quad (I.1)$$

Avec V_{opt} la tension PV correspondant au PPM.

Malgré que le point de fonctionnement soit proche de la puissance maximale, quelques reproches à cette méthode sont soulevés:

- Dépendance totale de la cellule étalon qui peut subir des modifications et des anomalies ;
- Non prise en compte des dérives de caractéristiques des modules photovoltaïques ;
- La tension V_{opt} représente 75 à 95 % de la tension V_{oc} , donc la linéarisation réduit la précision.

c- Méthode basée sur la mesure du courant en court-circuit

Cette méthode se base sur le calcul d'un courant de référence I_{opt} en fonction du courant de court-circuit I_{cc} par une relation de proportionnalité donnée comme suit

[NOG02]:

$$I_{opt}=KI_{cc} \quad (I.2)$$

Le courant I_{cc} est mesuré périodiquement en effectuant des court-circuits du GPV.

Cette méthode, ayant besoin que d'un seul capteur, s'avère plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse. Cependant, elle présente les inconvénients suivants:

- En réalité, le courant optimal vaut de 85 à 95 % du courant de court-circuit, donc ce n'est pas vraiment linéaire ce qui implique le manque de précision ;
- Non prise en compte des caractéristiques du GPV dues aux paramètres extérieurs ;
- Perte d'énergie pendant le temps des court-circuits nécessaires pour la mesure de la référence.

d- Algorithme Hill Climbing

La technique Hill Climbing (HC) [ATR05], [XIA04] est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur (Figure I.6). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre d en l'incrémentant ou en le décrémentant de Δd jusqu'à avoir la dérivée $\Delta P/\Delta d$ nulle. La figure I.7 présente l'algorithme d'exécution de cette technique. La méthode HC est plus simple à mise en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des

oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques.

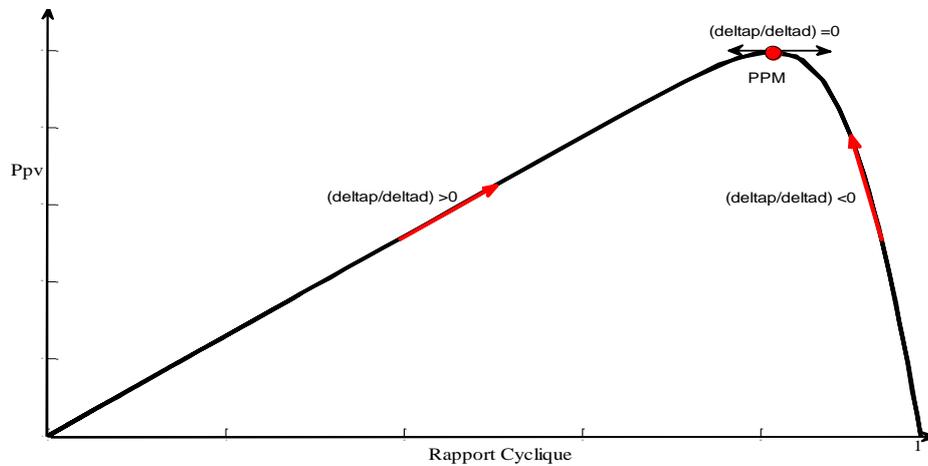


Figure I.6 : Principe de la méthode HC

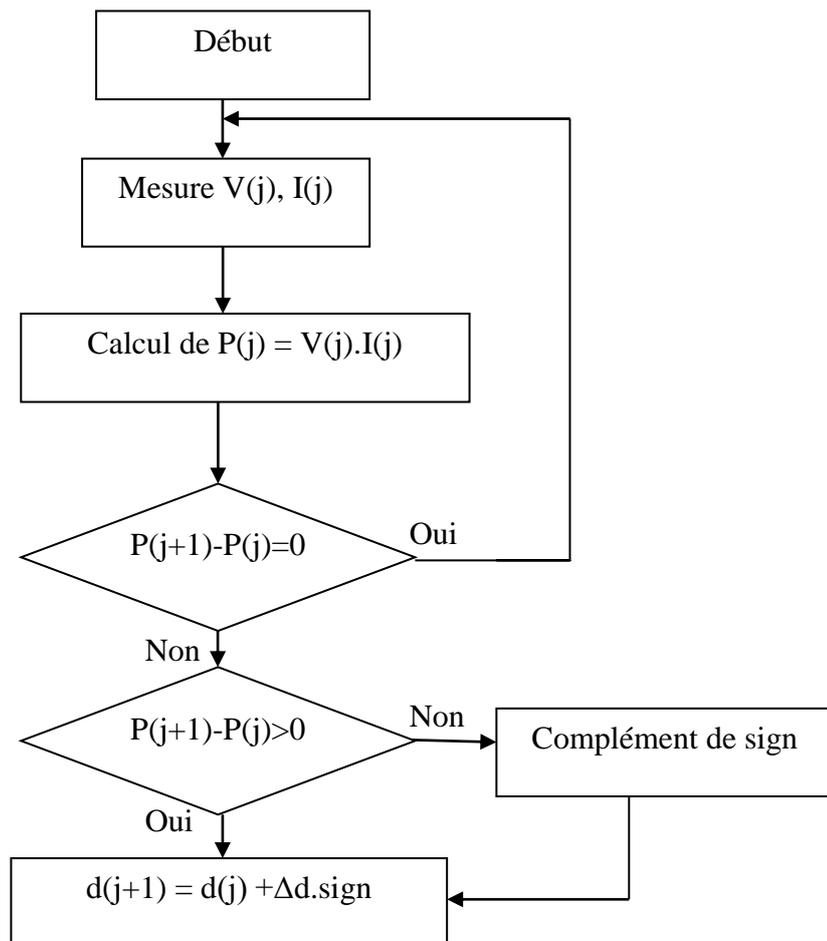


Figure I.7 : Algorithme de la méthode HC

e- 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 ($G = I/V$) et de l'incrément de la conductance ($\Delta G = \Delta I/\Delta V$) (voir la figure I.8). 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 I.9).

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

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \approx V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (I.3)$$

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

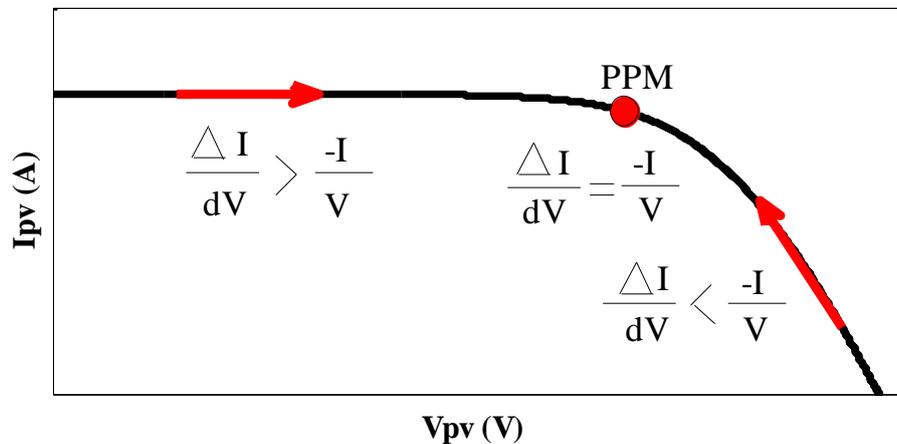


Figure I.8 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond

$$\begin{aligned} \text{Si } \frac{dP}{dV} = 0 &\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{-I}{V} \quad \text{le PF est sur le PPM} \\ \text{Si } \frac{dP}{dV} > 0 &\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > \frac{-I}{V} \quad \text{le PF est à gauche du PPM} \\ \text{Si } \frac{dP}{dV} < 0 &\Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < \frac{-I}{V} \quad \text{le PF est à droite du PPM} \end{aligned} \quad (I.4)$$

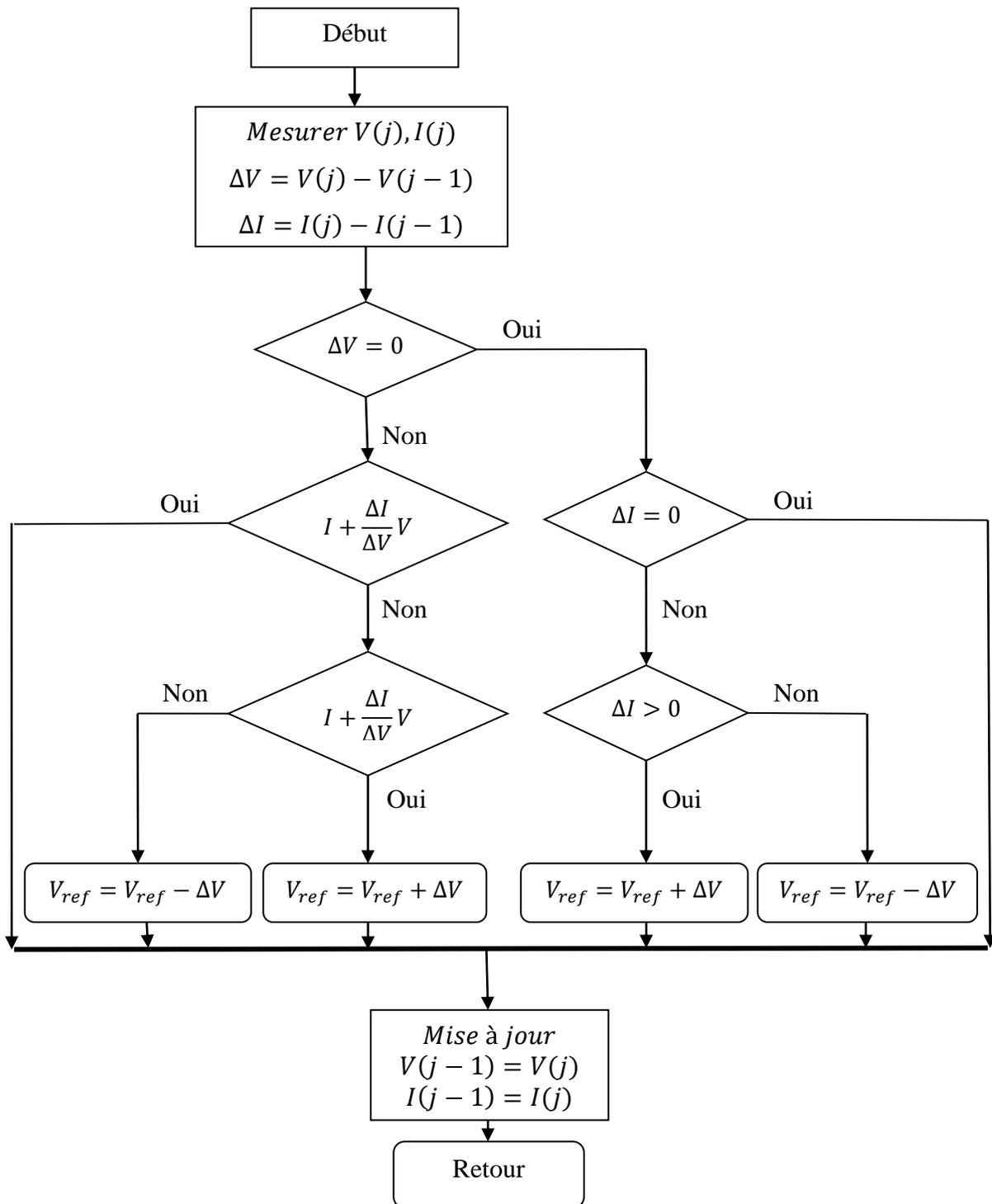


Figure I.9 : Organigramme de la méthode IncCond

I.6.2. Stratégies de stockage

Des types de stockage [PIP04] sont utilisés dans les systèmes hybrides : le stockage a court terme et le stockage à long terme.

La stratégie de stockage à court terme « peak chaving starategy » permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et /ou de la charge, cette stratégie réduit également le nombre de cycles de démarrage/arrêt des générateurs diesels, en conséquence la réduction de la consommation de carburant.

On trouve principalement des systèmes à stockage inertielle dont le développement se marie actuellement à l'utilisation de machines rapide. Et de part leur dynamique est plus rapide que celle des batteries, les super capacités s'estimant désormais jusqu'à 1800 F présentent un intérêt incontournable.

Le stockage à long terme « cycle charge strategy » est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue, notamment quand l'énergie renouvelable est insuffisante [BOY06] cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique et de réduire les cycles démarrage/arrête des générateurs diesels et donc la consommation du carburant. Avec cette stratégie, le générateur diesel est arrêté jusqu'à ce que le système de stockage atteigne un niveau maximal. Une fois ce seuil est atteint, le générateur diesel redémarre et reste en fonctionnement jusqu'à ce que le système de stockage atteigne son niveau maximal et le cycle se répète continuellement.

Le contrôle de la charge et de la décharge profonde du parc batteries ce trouve au cœur de système de génération d'énergie, il est indispensable pour protéger les batteries contre de probables surcharges afin d'éviter que la tension dépasse un certain seuil, si on laisse durer ce phénomène, les batteries deviendront surchargé, ce qui accélère la corrosion des plaques à plomb, fera perdre de l'électrolyte et endommage les plaques à plomb, par contre la protection contre les décharges profondes, le régulateur empêche les batteries d'être vidées pas plus de 30%.

I.6.3. Stratégies de supervision

Une fois la stratégie de contrôle à court terme développée, une stratégie de supervision, permettant d'adapter le système de puissance quand les unités de stockage sont pleines ou vides, doit être déterminée. Ce rôle est assuré par un algorithme de gestion de puissance, ou Power Sharing Algorithme (PSA).

[MUN12] et [KAL10] proposent un algorithme dans le cas d'un bus mixte. Le premier transfère au réseau l'excédent de puissance lorsque la production dépasse la puissance spécifique de la batterie, le second est en site isolé mais intègre un générateur Diesel, qui doit fournir le complément de puissance lorsque la batterie ne peut fournir la demande.

L'algorithme devient plus complexe quand il y a plusieurs types de stockage, comme dans le véhicule hybride à batteries /supercondensateurs /piles à combustibles de [MAP10].

Dans celui-ci, plus la demande est importante, plus on mobilise de types de stockage différents, en commençant par les supercondensateurs, puis la batterie, puis la pile à combustible.

Des solutions équivalentes sont proposées pour une hybridation batteries/supercondensateurs dans [EGH10] et [YOO08].

I.7. Configurations du système PV-diesel

I.7.1. Configuration à bus DC

Les différents systèmes composant le système hybride sont connectés à un bus à DC commun, signifie que la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à DC. Les sources d'énergie AC (générateurs diesels), leurs puissances fournies sont converties en DC. La charge principale à AC est alimentée via un convertisseur DC/AC à partir du bus DC, qui doit suivre la consigne fixée par l'amplitude et la fréquence. Les batteries et le convertisseur DC/AC seront dimensionnés pour alimenter les pics de charge, tandis que les générateurs diesels sont dimensionnés pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. Chaque configuration a ses avantages et inconvénients. Les avantages de cette configuration se résument à une simplification du système de commande et le générateur diesel peut être optimisé de telle manière qu'il fonctionne à sa puissance nominale pendant le processus de chargement de batteries [CRO13].

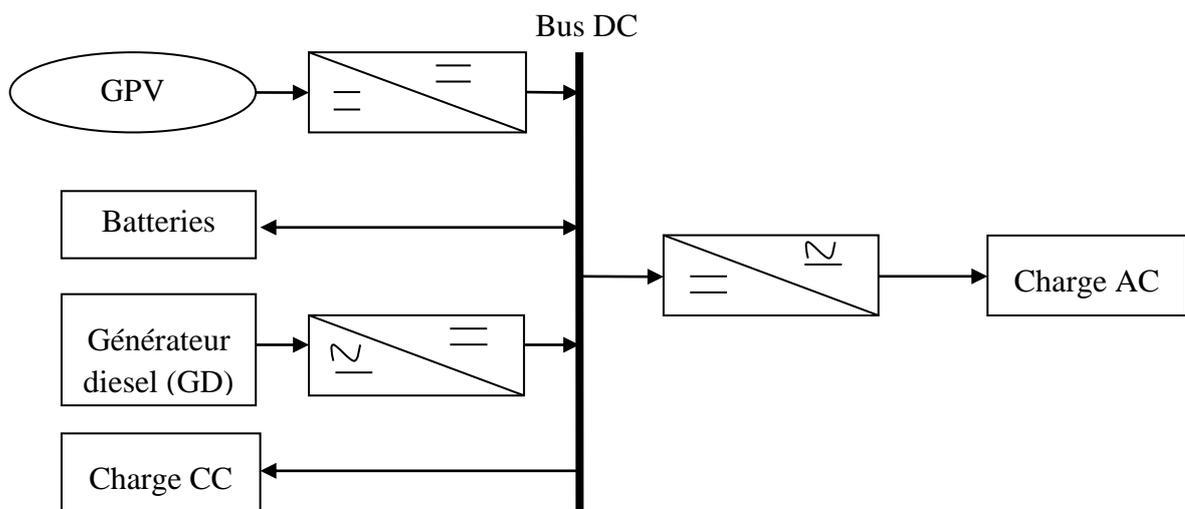


Figure I.10 : Configuration d'un système PV-diesel à bus DC

I.7.2. Configuration mixte à bus AC

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (AC). Les générateurs AC peuvent être directement connectés sur le bus AC ou avoir besoin d'un convertisseur AC/AC. Les générateurs DC utilisent un onduleur pour être connectés sur le bus AC. Les batteries sont liées au bus AC à travers un convertisseur bidirectionnel. Les charges DC peuvent éventuellement être alimentées par les batteries.

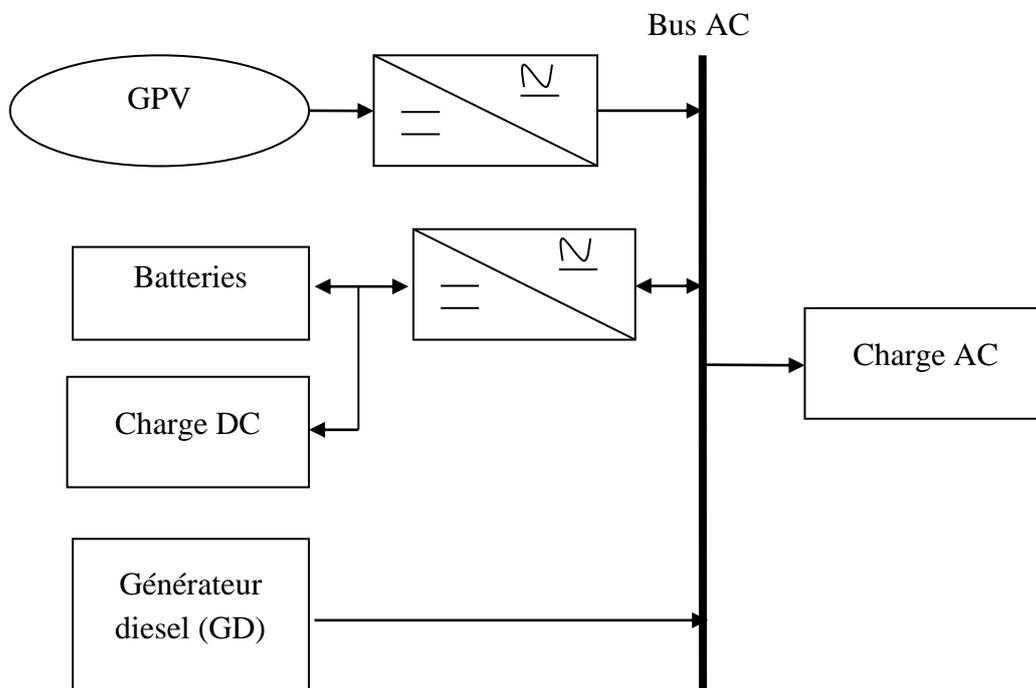


Figure I.11 : Configuration d'un système PV-diesel à bus AC

I.7.3. Configuration mixte à bus DC/AC

L'architecture mixte, à deux bus DC et AC à des performances plus élevées vis-à-vis la configuration à bus DC. Dans cette configuration une partie de la charge à AC peut être alimentée directement par les sources d'énergie renouvelables et les générateurs diesels ce qui permet d'augmenter les performances du système hybride en point de vue rendement. Cette architecture permet aussi aux générateurs diesels et à l'onduleur de fonctionner d'une manière autonome ou en parallèle en synchronisant leur tension en sortie [DAN14].

Cette configuration est mise en évidence par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel, qui remplace l'onduleur et le redresseur entre le bus à DC et à AC. Le convertisseur bidirectionnel à double fonction quand il y a un surplus d'énergie de la part des sources AC, charge le parc batteries ou il peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé.

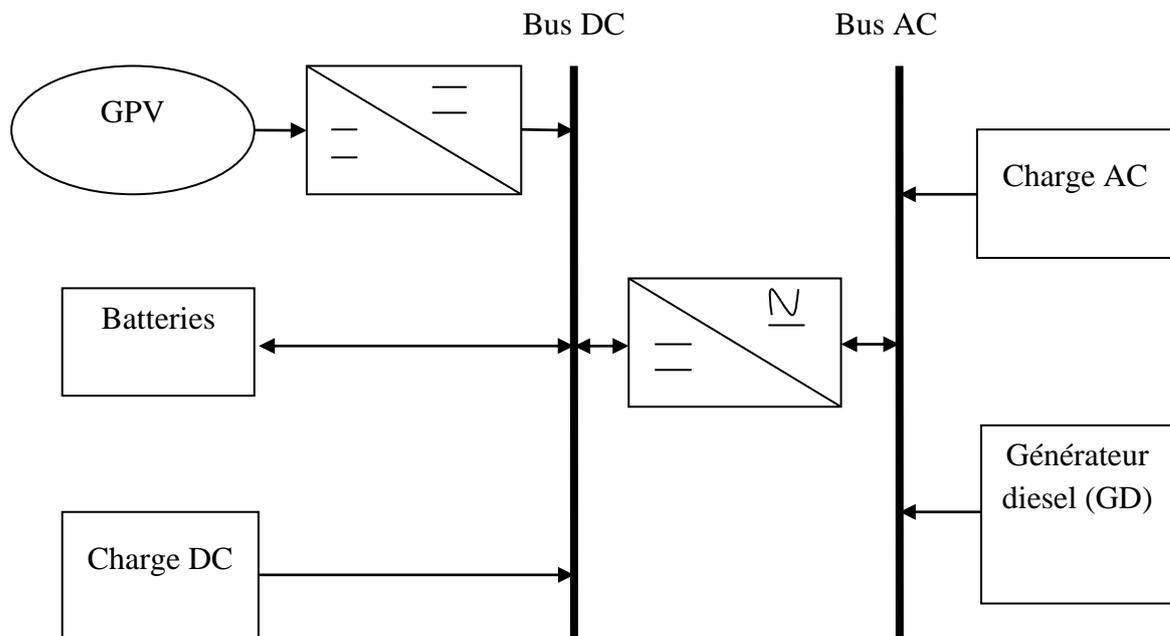


Figure I.12 : Système hybride à bus mixte (parallèle)

Les avantages de cette architecture se récapitulent au fonctionnement autonome ou parallèle du générateur diesel et l'onduleur, quand la demande de charge augmente l'un ou l'autre peut générer l'énergie nécessaire. Ainsi que les sources renouvelables et diesels peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge. La seule difficulté liée à cette configuration sa réalisation s'avère peu compliquée à cause du fonctionnement parallèle, qui demande que l'onduleur doive être capable d'évoluer en état autonome et non autonome en synchronisant la tension de sortie à la tension du générateur diesel.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre a été présenté un état de l'art des architectures existantes pour les systèmes de production d'électricité basés sur le système hybride photovoltaïque-diesel. Nous avons vu qu'il existait des solutions pour site isolé avec ou sans stockage. Enfin, l'étude des stratégies de contrôle a révélé qu'afin de maximiser la production, les consignes de commande de source photovoltaïque devaient être calculées à chaque instant par un algorithme dit de "Maximum Power Point Tracking" (MPPT). D'autres types de

contrôle ont donc été étudiés, et leurs avantages et inconvénients confrontés. Nous avons vu plusieurs types des convertisseurs (DC/DC, DC/AC) devront être utilisés pour assurer la répartition de l'énergie entre chacun.

L'alimentation d'une installation par plusieurs sources doit respecter une architecture de connexion. De même, une gestion convenable de la production des sources vis-à-vis de la consommation permet de couvrir le besoin énergétique de l'installation et garantir une exploitation optimale de l'énergie produite.

Ce chapitre fixe notre choix sur la structure du système à étudier : un système de production déconnecté du réseau, destiné à alimenter en électricité une habitation isolée, hybridé en sources mais aussi en unités de stockage : il sera en effet composé d'un groupe de panneaux photovoltaïques, un groupe diesel et un banc de batteries,

Chapitre II

Le système photovoltaïque

II.1. Introduction

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques (PV). Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elles possèdent des caractéristiques électriques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Dans ce chapitre, on présente globalement le fonctionnement du GPV, le principe de la conversion PV. On décrira une modélisation mathématique afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de GPV en montrant l'influence des conditions météorologiques (éclairement et température).

II.2. Energie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

II.3. Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 μm à 10 μm . La figure II.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 \text{ W}/\text{m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

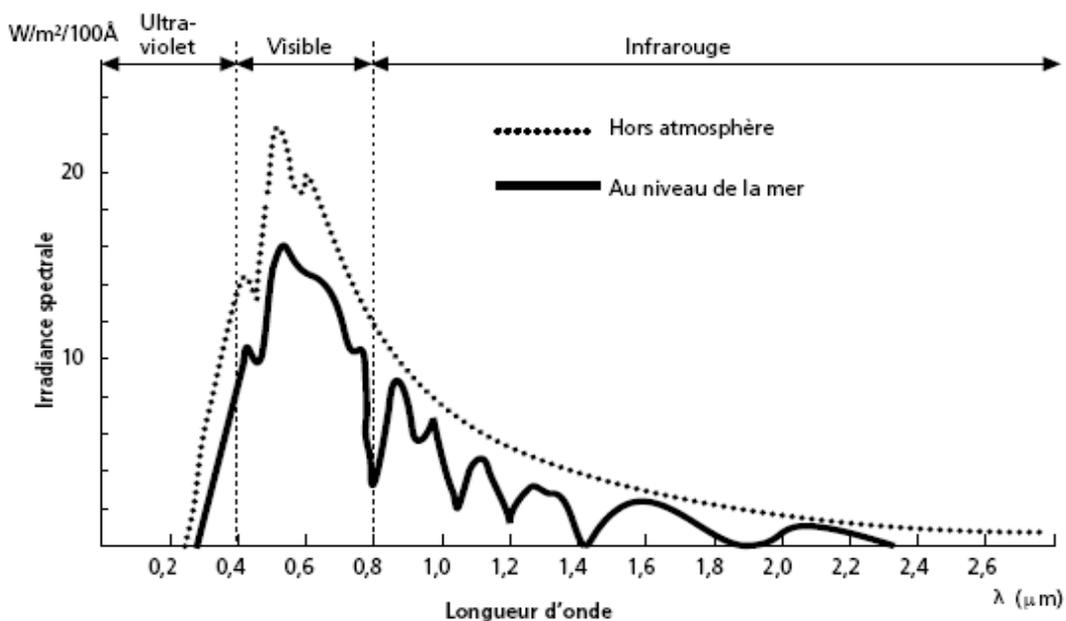


Figure II.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire

Il y a quatre types de rayonnement:

1- Rayonnement direct : rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

2- Rayonnement diffus : rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

3- Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

4- Rayonnement global : la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

II.4. Conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque.

II.5. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

Le terme « photovoltaïque » est formé à partir mots " photos " un mot grec signifiant lumière, et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque résulte de la discontinuité qui existe dans un semi-conducteur entre les niveaux d'énergie que peuvent prendre les porteuses de charges qui sont les électrons et les trous. Cette discontinuité forme une jonction.

La création d'un courant à partir du rayonnement solaire est donc liée aux trois

phénomènes suivants : la création de paires électron-trou sous l'effet du rayonnement, le mouvement de celles-ci vers la jonction sous l'action des forces de diffusion et finalement le collectage de toutes les paires électron-trou.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " Bombardés " par les photons constituant la lumière [BEN17]. Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques externes (appelés électrons de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, son agitation se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

II.5.1. La Cellule solaire

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe [GER02], [ARO13].

II.5.1.1. Cellule au silicium mono cristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher [VIG10].



Figure II.2 : Cellule au Silicium Monocristallin

II.5.1.2. Cellule au silicium poly-cristallin

Le silicium poly cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser [BED14].



Figure II.3 : Cellule au Silicium Poly cristallin

II.5.1.3. Cellule au silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces.

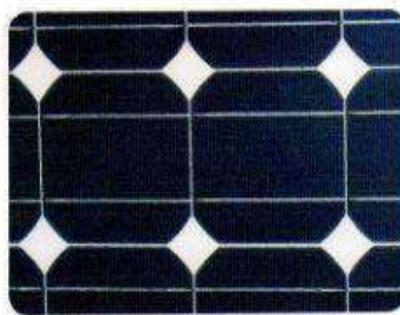


Figure II.4 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

Examinons ce que se produit à proximité d'une jonction p-n lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil. Lorsque les photons sont absorbés, des paires d'électron-trou peuvent être formées. Si ces porteuses de charge atteignent la proximité de la jonction, le champ électrique dans la barrière de potentiel pousse les trous dans la zone des charges positives où ils sont accumulés et pousse les électrons dans la zone des charges négatives où ils sont accumulés aussi, ceux qui créent une différence de potentiel qui peut être utilisé pour fournir du courant à la charge comme la figure II.5 montre.

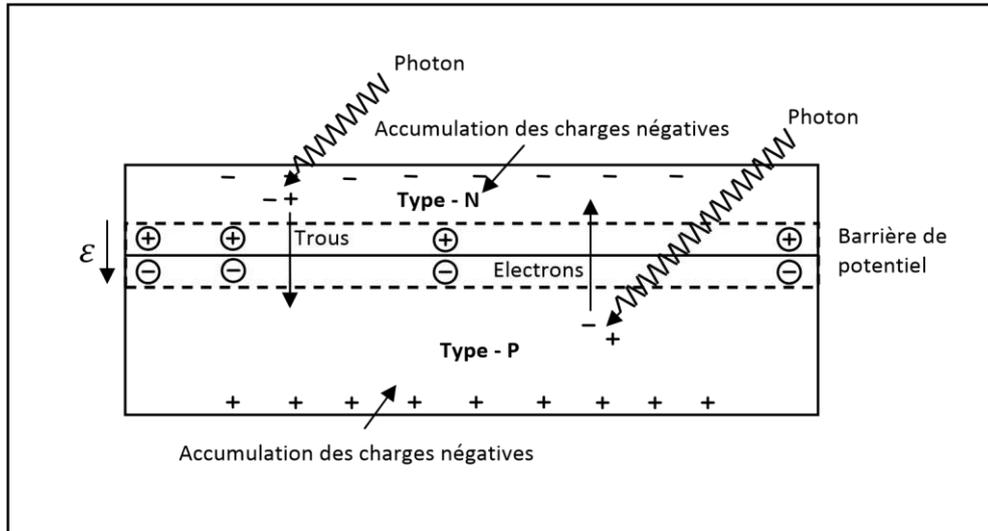


Figure II.5 : Représentation d'une jonction P-N d'une cellule PV montrant la création des paires Trous-Electrons par l'absorption des photons

Si des contacts électriques sont attachés au dessus et au dessous de la cellule, des électrons sortent du coté des charges négatives dans le fils de connexion passant par la charge et revenant au coté des charges positives comme la figure II.6 montre, puisque le fils ne peut pas conduire des trous, les électrons seulement se déplacent autour du circuit, quand ils atteignent la coté des *P* ils se combinent avec des trous pour accomplissant le circuit, par convention le courant positif circule dans la direction opposée avec les électrons, alors la flèche *I* montre le sens du courant.

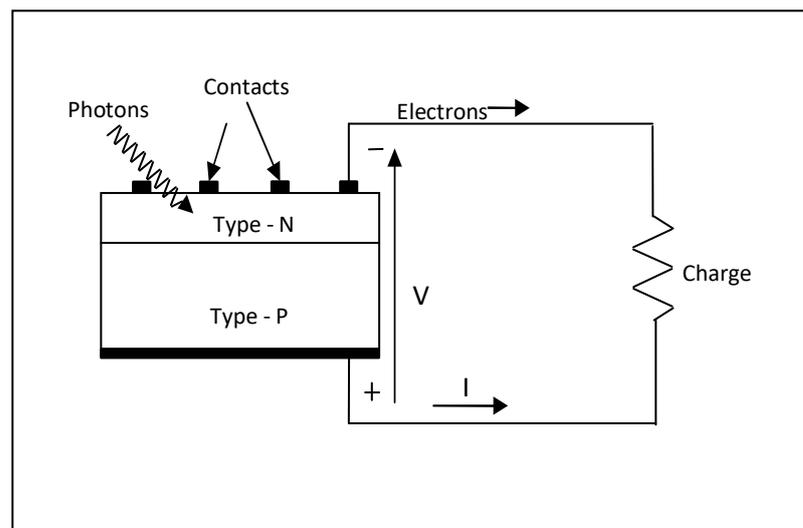


Figure II.6 : Les électrons circulent à partir du côté N, traversant la charge, et reviennent au côté P

II.6. Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule PV

Pour la modélisation de la cellule solaire on a choisi le modèle fréquemment utilisé afin de décrire ses caractéristiques électriques, [TAF08], [HOU10], [JIA12], [BEL17b]. Ce modèle prend en compte les différentes résistances internes (Figure II.7).

Le schéma d'une cellule PV sous éclairage (figure II.7) correspond à un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode, deux résistances parallèles R_s et R_{sh} sont introduites elles vont influencer sur la caractéristique courant tension de la cellule.

R_s et R_p (R_{sh}) : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle, I_{ph} : est le courant photovoltaïque (photo courant) créé dans la structure par une partie du rayonnement absorbé et généré lors de la conversion PV et il est assimilable au courant de court-circuit (engendré par les radiations lumineuses).

I_d : courant direct d'obscurité de la jonction.

I : courant généré par la cellule et fournie à la charge.

V : tension aux bornes de la charge.

D : la diode, représente la jonction PN de la cellule.

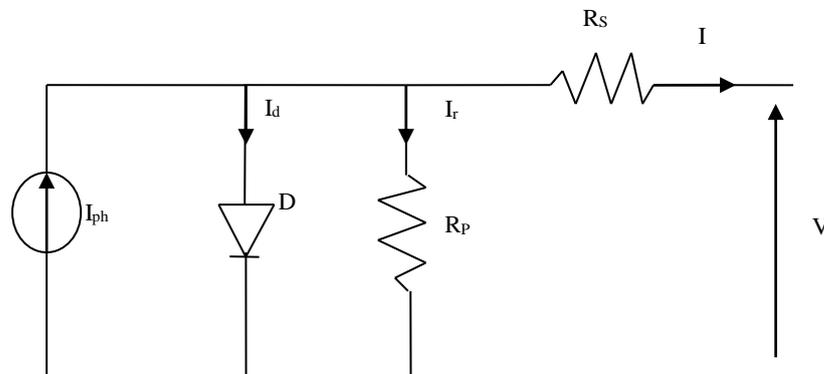


Figure II.7 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V). Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparaître des écarts importants :

Comme la montre le schéma de la figure II.7 une photopile comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I - V) de la photopile :

- La résistance série est 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 ;

- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

II.7. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque

II.7.1. Caractéristique courant-tension (I-V)

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure II.7. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière (représente les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium). La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire (résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction). Le courant photopile a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.2})$$

Le photo courant $I_{ph \max}$ est atteint à une insolation maximale, on l'exprime souvent par :

$$I_{ph} = S I_{ph \max} \quad (\text{II.3})$$

Avec S : pourcentage de l'ensoleillement. $S = \frac{G}{1000}$.

Et :

$$I_{ph \max}(T) = I_{ph}(298K) \left[1 + (T - 298)(5 * 10^{-4}) \right] \quad (\text{II.4})$$

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

I_d : Est le courant traversant la diode.

Avec :
$$I_0 = KT^3 e^{-E_g / KT} \quad (\text{II.6})$$

Ou E_g : est la bande d'énergie du semi-conducteur et $K=1,2 \text{ A/cm.k}^3$.

On peut faire apparaître la potentielle thermodynamique :

$$V_T = \frac{nKT}{q} \quad (\text{II.7})$$

- I_0 : courant de saturation inverse de la diode
- q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ c}$)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / } ^\circ\text{K}$)
- n : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique
- T : température de la jonction en $^\circ\text{K}$

➤
$$I_r = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.8})$$

I_r : Est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré Par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique (courant - tension).

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.9})$$

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 correspondante au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

II.7.2. Paramètres externes

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes (I-V), ou de l'équation caractéristique (II.9). Les plus usuels sont les suivants :

II.7.2.1. Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.9), on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{V_T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{R_s I_{CC}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.10})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_0 \left(\exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{V_T}\right) - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est

alors :

$$I_{CC} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.11})$$

Pour le silicium $I_{CC} = 30 \text{mA/cm}^2$ pour un éclairement maximal.

II.7.2.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{co}}{V_T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.12})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (\text{II.13})$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert V_{CO} est de 0.55 à 0.6V.

II.7.2.3 Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. Cependant, il est possible,

sous certaines hypothèses, de dégager des valeurs limites acceptables (R_s , R_{sh}). En effet, si on suppose que :

La cellule est en régime optimal, et si les pertes sont attribuées à la résistance série, le rapport de la puissance dissipée dans celle-ci à la puissance délivrée par la cellule est donné par :

$$QR_s = \left(\frac{R_s I_m^2}{I_m V_m} \right) = \left(\frac{R_s I_{cc}}{V_{oc}} \right) \quad (II.14)$$

De même, si on attribue toutes les pertes à la résistance shunt, et en supposant qu'on est au point de fonctionnement optimal, on aura :

$$QR_{sh} = \left(\frac{V_m^2}{R_{sh}} \right) / (I_m V_m) \cong \left(\frac{V_{co}}{I_{cc}} \right) \quad (II.15)$$

La figure II.8 montre une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

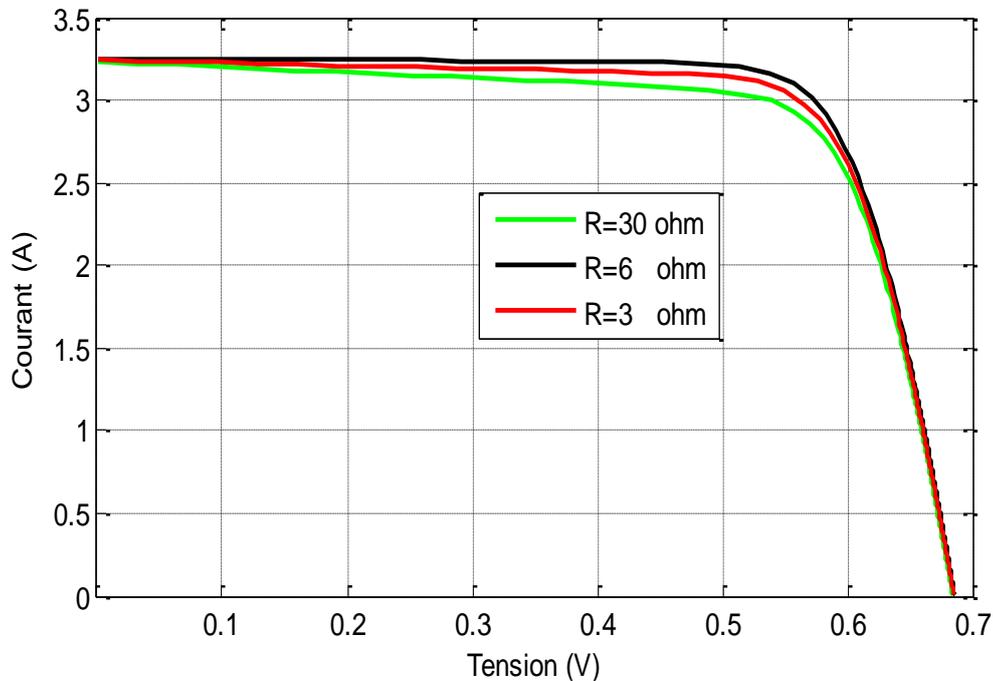


Figure II.8 : Influence de la résistance shunte sur la caractéristique I-V

II.7.2.4. Influence du flux lumineux

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux G . le courant I_d (V_d), étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement.

Le photo-courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La figure II.9 représente les caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque à $25^\circ C$ et sous diverses valeurs de l'éclairement G .

A partir de cette figure, il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

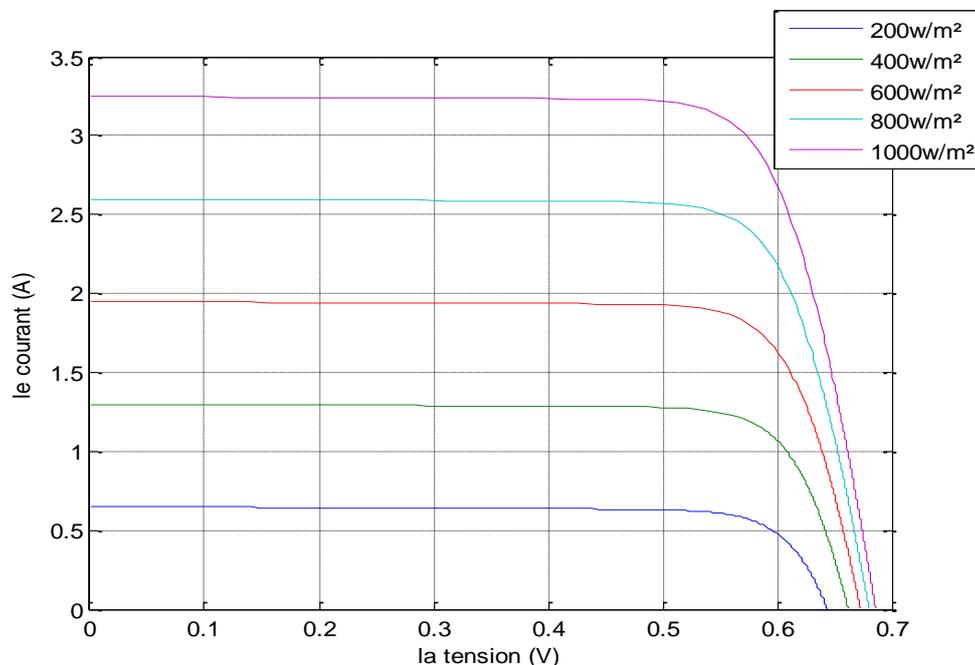


Figure II.9a : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque pour différentes valeurs de l'insolation à une température constante $25^\circ C$

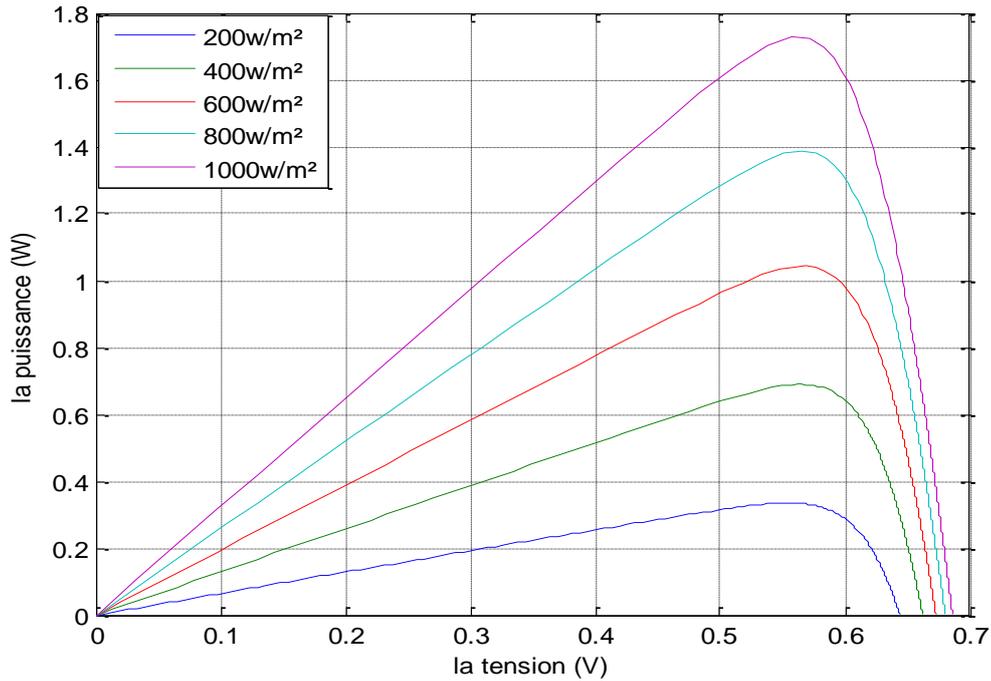


Figure II.9b : Caractéristique P-V d’une cellule pour différentes valeurs d’insolation à température constante 25°C

II.7.2.5 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3 \cdot 10^{-2} \text{ mA} \cdot \text{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule. Par contre, le courant I augmente très rapidement avec T . Il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} . Cette diminution est de l’ordre de 2 mV par degré comme le montre la figure (II.10). L’augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, de l’ordre de $5 \cdot 10^{-5} \text{ W/K}$ par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré. On peut intégrer le paramètre T dans l’équation (II.9):

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) + \lambda (I - T_{ref}) - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right) - \left[\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (\text{II.16})$$

L’influence de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) est indiquée sur les figures suivantes, pour un éclairement constant $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et différentes valeurs de températures, T égale à 0°C, 25°C, 50°C, 75°C.

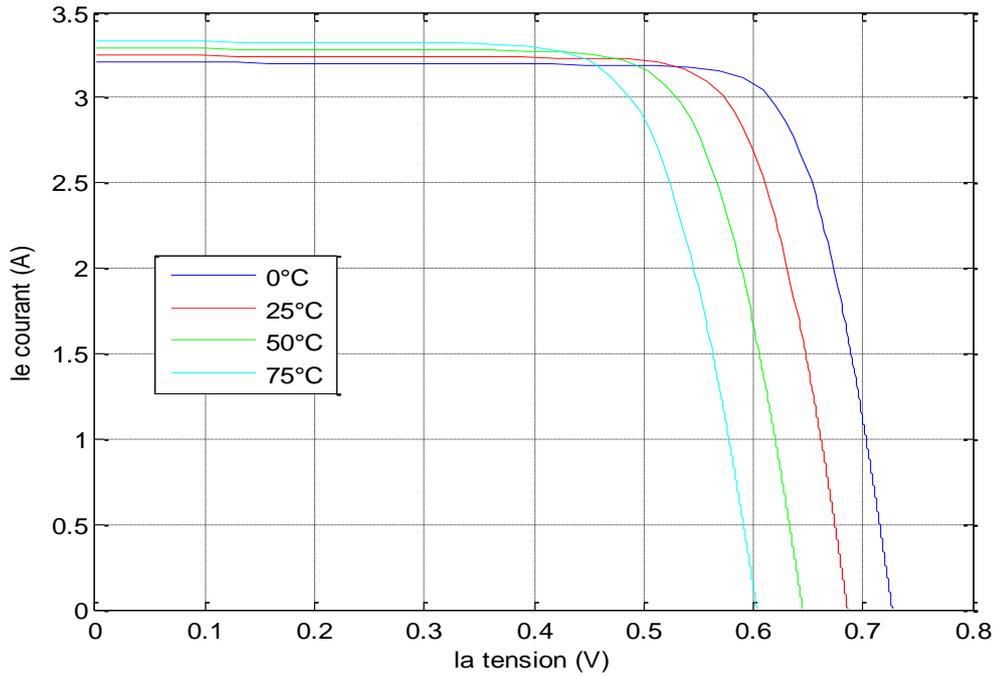


Figure II.10a : Caractéristique I-V d’une cellule pour différentes valeurs de température T à ensoleillement constant $1000\text{W}/\text{m}^2$.

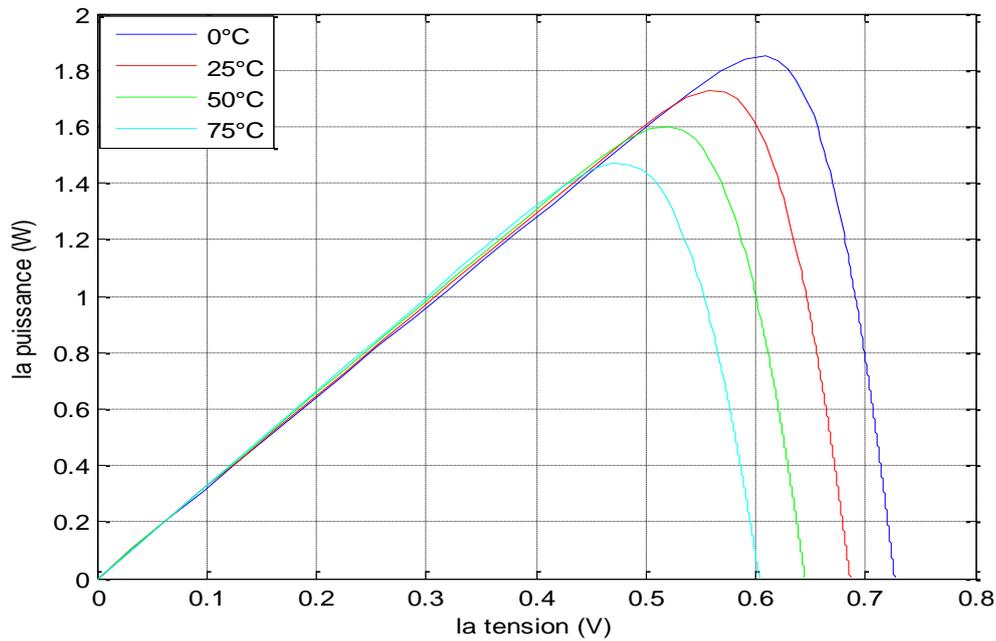


Figure II.10b : Caractéristique P-V d’une cellule pour différentes valeurs de température T à ensoleillement constant $1000\text{W}/\text{m}^2$.

II.7.3. Les différents groupements des cellules PV

Les photopiles sont connectées en séries jusqu'à obtenir, par addition, une tension facilement utilisable ; la tension nominale donnée par le constructeur est également adaptée à la charge de batterie.

II.7.3.1. Groupement série

La tension générée par une cellule étant très faible, il faudra dans la majorité des cas associer en série un certain nombre de cellule pour obtenir des tensions compatibles avec la charge à alimenter.

La caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension par N_s , avec N_s : nombre des cellules du groupement série.

$$V_{panneau} = N_s V_{cellule} \tag{II.17}$$

Nous concluons également à partir de la figure II.11 que la puissance (P) augmente également par l'augmentation de la tension, signifie aussi quand un groupement N_s cellules en séries.

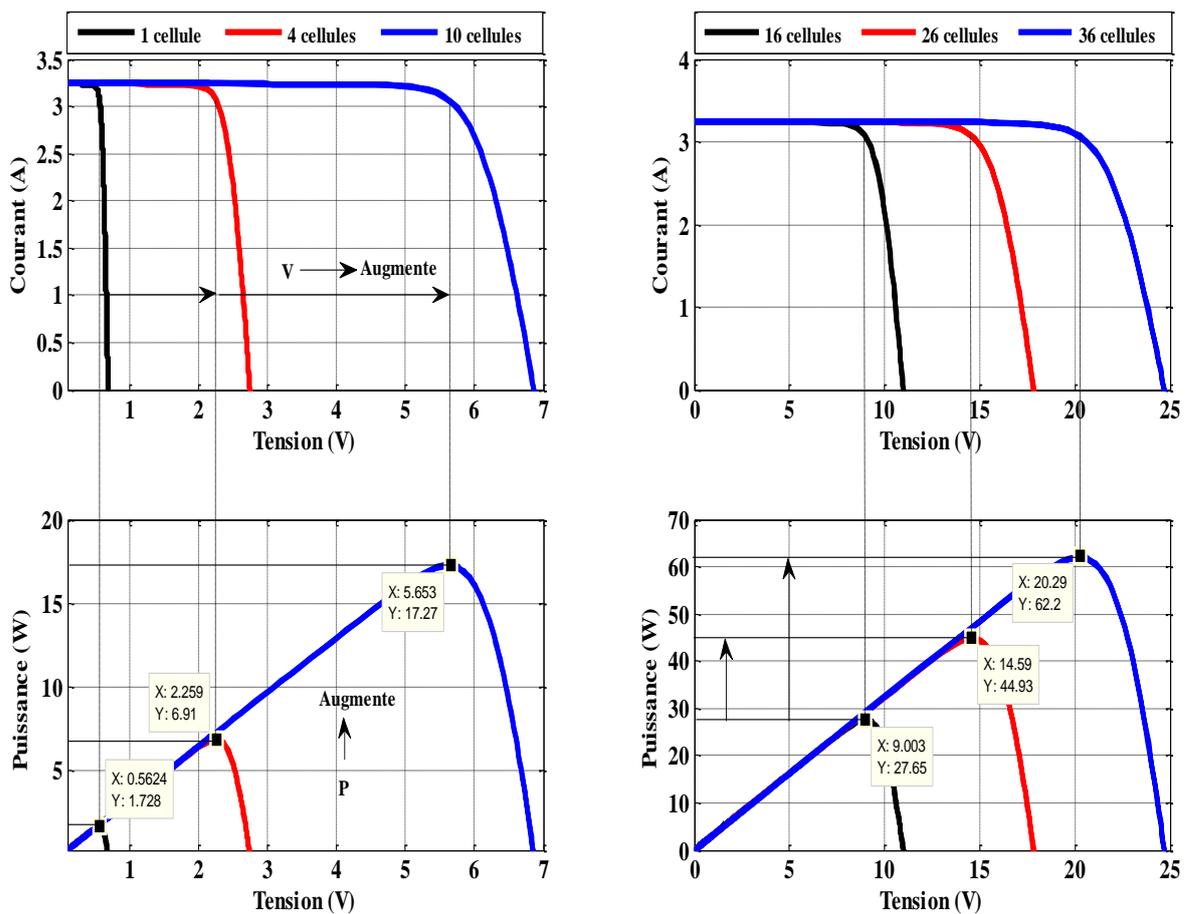


Figure II.11 : Caractéristique I-V et P-V d'un groupement N_s cellules en série

II.7.3.2. Groupement parallèle

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules PV.

On constate sur la figure II.12 que la tension générée est la même pour toutes les cellules. La courbe de puissance résultante pour le groupement parallèle est obtenue en multipliant point par point et pour la même tension le courant par N_p avec N_p : le nombre des cellules du groupement parallèle.

$$I_{\text{panneau}} = N_p I_{\text{cellule}} \quad (\text{II.18})$$

On constate également à partir de la figure II.12 que la puissance (P) augmente également par l'augmentation du courant, c'est-à-dire quand un groupement N_s cellules en parallèles.

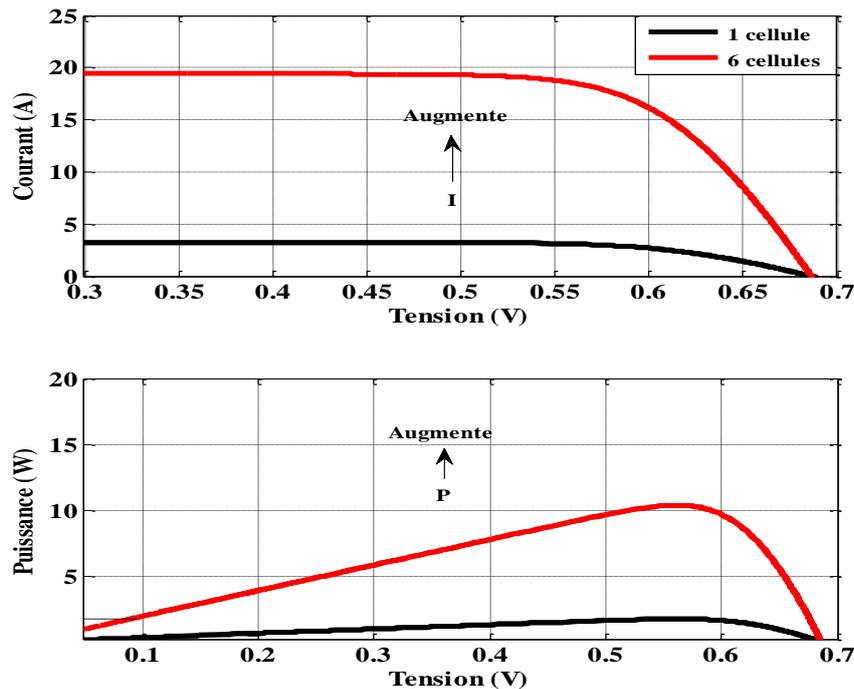


Figure II.12 : Caractéristique I-V et P-V d'un groupement N_p cellules en parallèles

II.7.3.3. Groupement mixte (série-parallèle)

Le groupement mixte est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux cellules photovoltaïques regroupés figure II.13. La caractéristique électrique globale courant/tension du groupement mixte se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux

affinités de rapport N_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport N_p parallèlement à l'axe des courants.

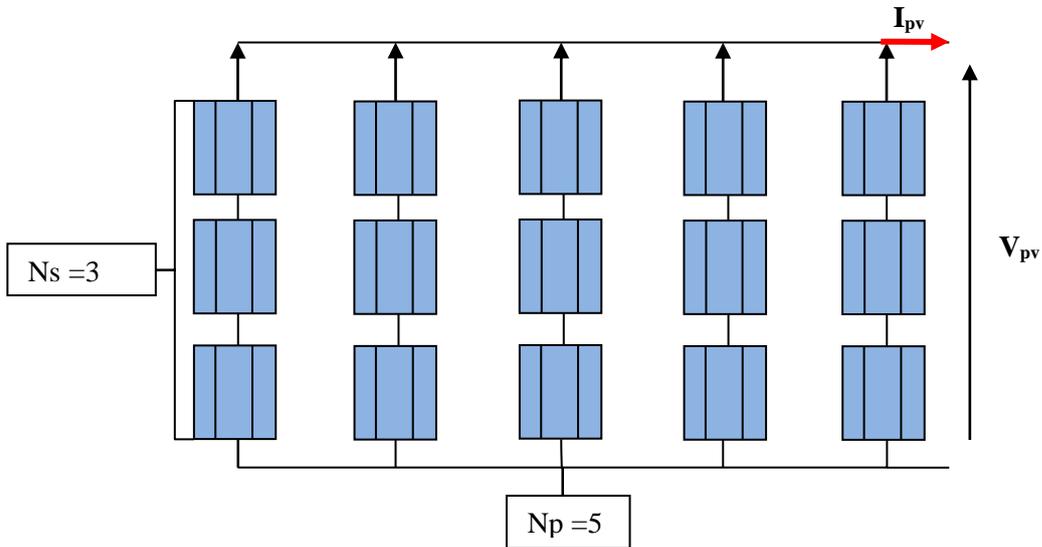


Figure II.13 : Association mixte des cellules

Les groupements mixtes sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (groupement en série) ou augmenter le courant (groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques.

La figure II.14 montre les caractéristiques I-V d'un groupement des cellules photovoltaïques en séries et en parallèles.

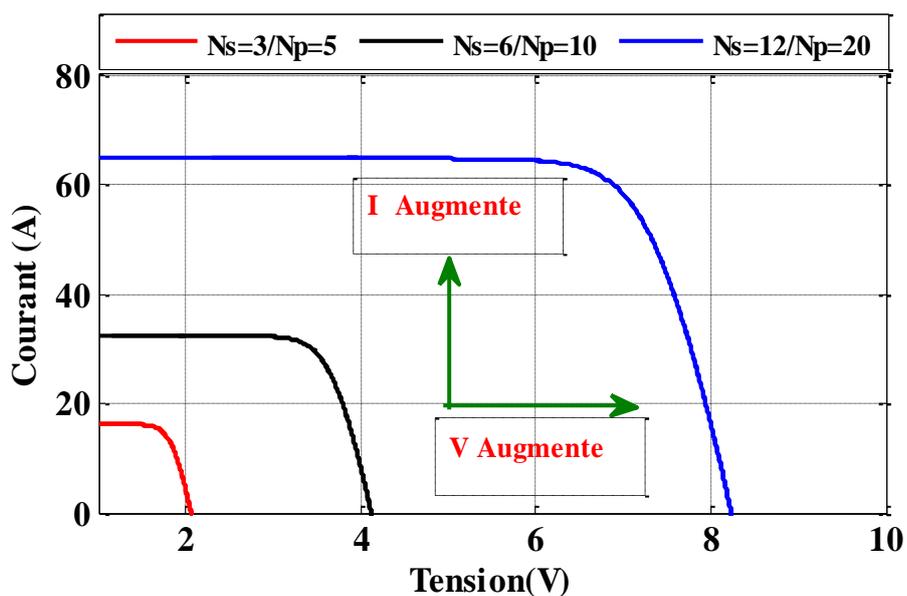


Figure II.14 : Groupement mixte des cellules photovoltaïques

II.8. Le module photovoltaïque

L'élément de base pour la fourniture d'électricité d'origine photovoltaïque est le module ou panneau solaire qui est constitué de cellules photovoltaïques (ou cellules solaires) reliées entre elles suivant un schéma préétabli et protégé de l'environnement grâce à des techniques d'encapsulation permettant des durées de vie du panneau de l'ordre d'une vingtaine d'année [LAB06],[BEL15].

Le panneau solaire assure donc la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique d'après l'expression suivante :

$$E = \eta AG \quad (\text{II.17})$$

Le module photovoltaïque est l'élément de base du générateur. Par assemblage de module on obtient l'énergie électrique nécessaire. Un module photovoltaïque est caractérisé par deux grandeurs principales :

- La puissance électrique maximum qui peut fournir.
- La tension maximale qui peut être obtenue à ses bornes et la tension nominale.

II.9. Le champ photovoltaïque

L'interconnexion de modules entre eux-en série ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande définit la notation de champ PV. Donc le générateur PV se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules (panneau) en fonction des contraintes de la charge à alimenter.

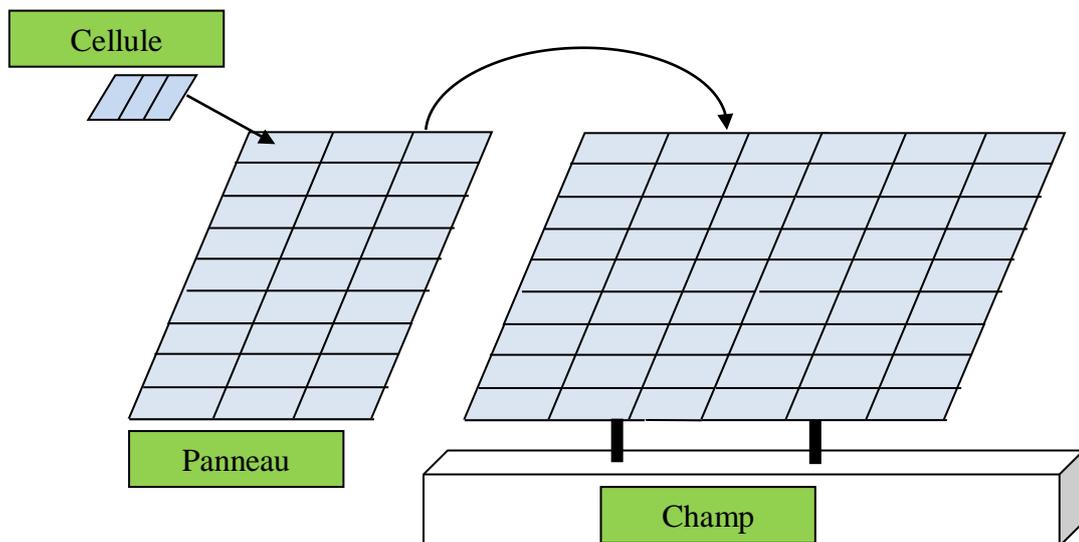


Figure II.15 : Composantes d'un champ de panneaux photovoltaïques

II.10. Simulation du panneau solaire

Le but de cette simulation, est de déterminer le comportement de système GPV face aux différents changements climatiques tel que la température et l'ensoleillement. Pour cela, nous avons utilisé dans notre travail un panneau solaire composé de 36 cellules en série.

Pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$, un ensoleillement $G = 1000\text{W} / \text{m}^2$, nous avons une résistance variable R comme charge pour déterminer les caractéristiques (I-V) et (P-V). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures II.16.

La figure II.16 montre que la caractéristique (I-V) est une caractéristique non linéaire possédant un seul point optimal où la puissance est maximale (PPM). La tension et le courant optimaux correspondants sont I_{MPP} et V_{MPP} .

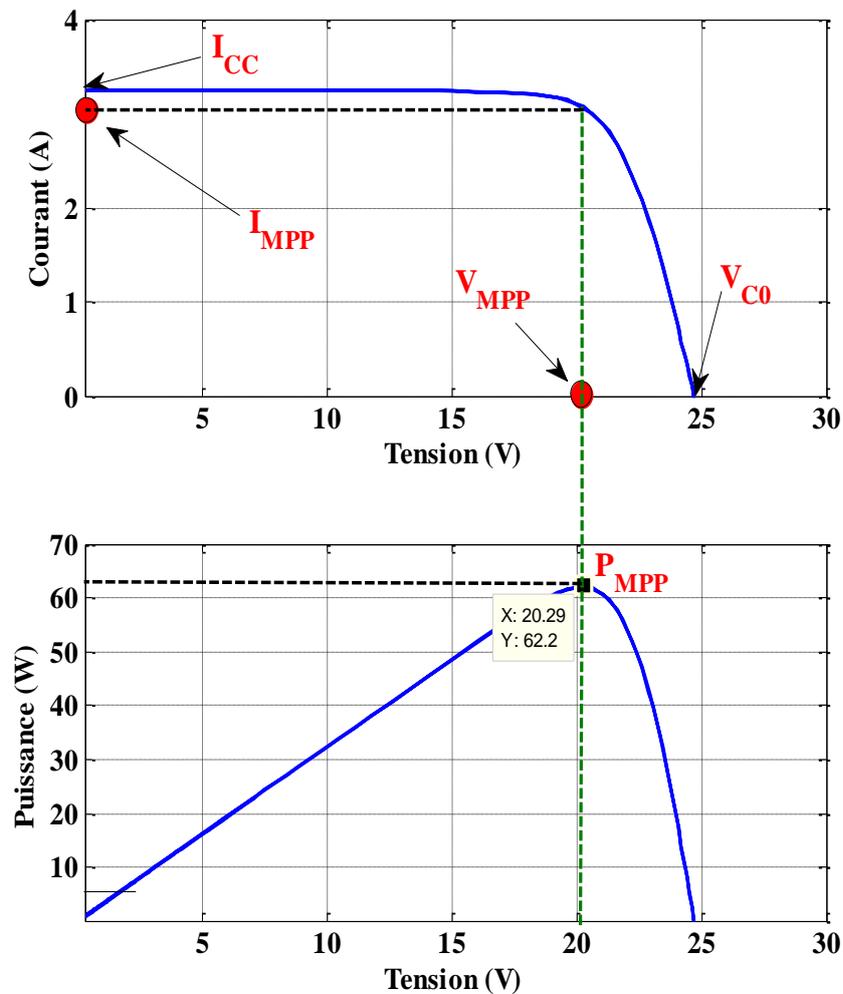


Figure II.16 : Caractéristique I-V et P-V de GPV dans les conditions climatique $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$

II.10.1. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique P-V du GPV

Le GPV est fortement influencé par la variation de l'éclairement et la température. En effet, à la figure II.17 le GPV est soumis à des variations de luminosité où il apparait clairement la diminution de la puissance et le changement du point maximum de puissance MPP.

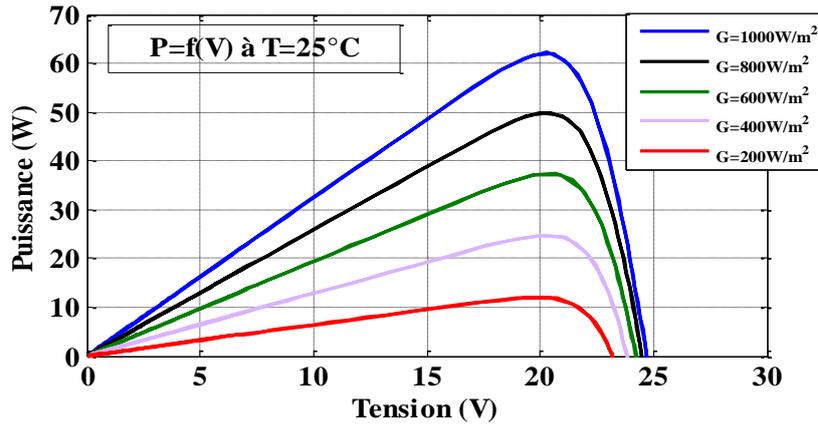


Figure II.17 : Changement du MPP en fonction de l'éclairement

Dans la figure II.18 le générateur photovoltaïque GPV est soumis à des variations de température sous une luminosité constante ; là aussi le point de puissance maximum MPP change.

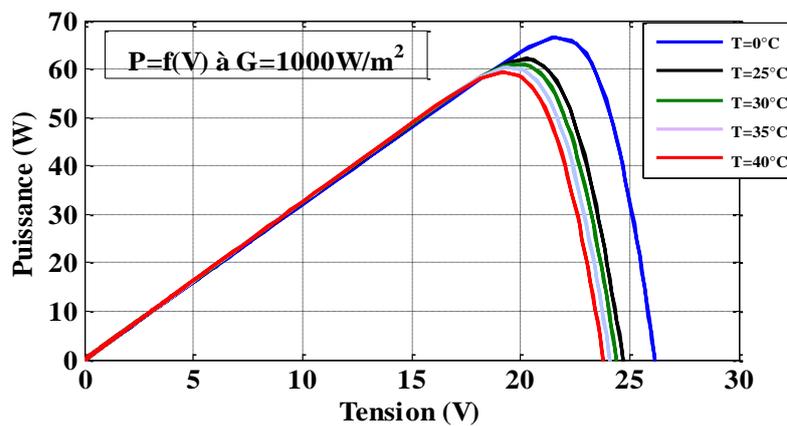


Figure II.18 : Influence de la température sur MPP

II.10.2. Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V du GPV

La figure II.19 montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V). A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais

par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

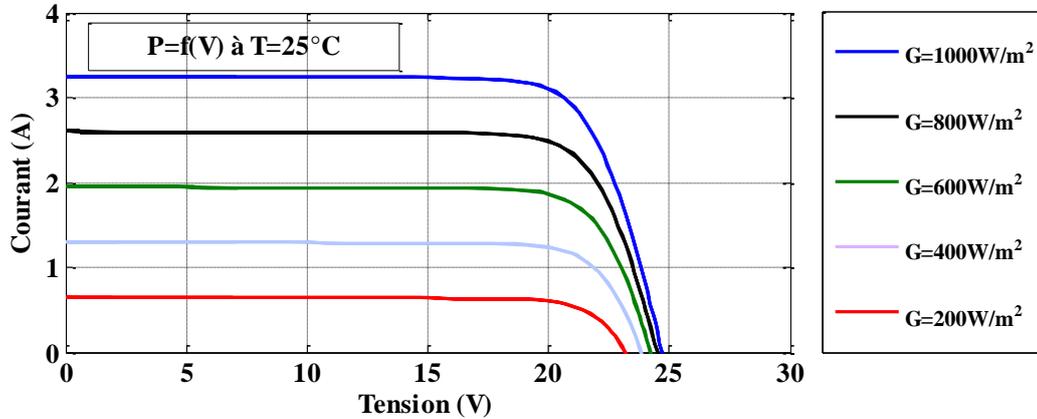


Figure II.19 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V du GPV

La figure II.20 montre l'influence de la température sur la caractéristique I-V. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I-V.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent, la puissance maximale du générateur subit une diminution.

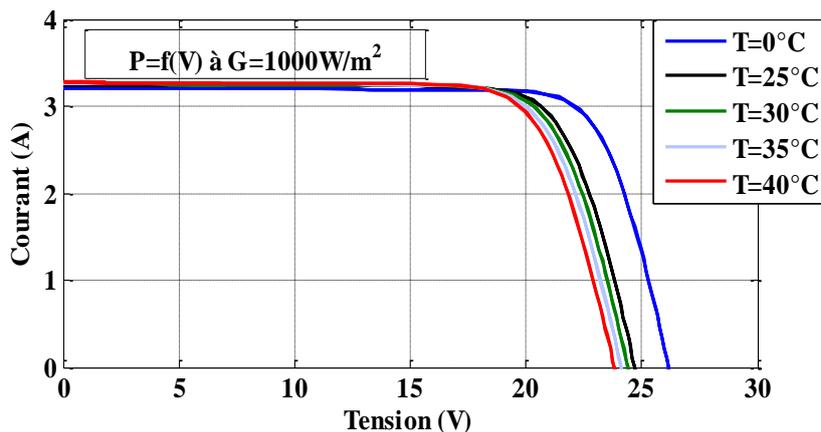


Figure II.20 : Influence de la température sur la caractéristique I-V du GPV

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre un modèle mathématique a été établi pour ce phénomène physique. Ce qui permet de tracer les caractéristiques de la cellule PV pour les différents

paramètres influant. La caractéristique puissance-tension est fortement non linéaire et présente un seul point de fonctionnement optimal. Pour une exploitation plus efficace, nous avons besoin d'une commande permettant la poursuite du point de puissance maximale qui permet de rechercher le point de fonctionnement optimal selon les conditions atmosphériques.

Chapitre III

**Élimination de déviation du mode de
recherche de la commande MPPT**

III.1. Introduction

La technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques (PV) pour extraire la puissance maximale du module PV. De nombreuses techniques MPPT ont été traitées dans la littérature telle que celle communément appelée P&O (Perturbe and Observe) [ESR07], [ENG15], [SAL06], [HUA03]. L'algorithme P&O est largement appliqué en raison de sa simplicité, de sa mise en œuvre et de son moindre coût [FEM05].

L'algorithme P&O souffre de la déviation du mode de recherche dû au changement rapide du rayonnement solaire [KIL15], [YOU11], [NAS12], [BEL17a]. Afin d'éviter cette déviation, nous avons proposé dans ce chapitre une technique d'amélioration pour résoudre ce problème. L'objectif de la stratégie proposée est d'éviter le problème de la variation rapide de l'irradiation en incorporant les informations de tension, de courant et de puissance dans le processus de décision pour mettre à jour le rapport cyclique du convertisseur.

Notre système est constitué d'un panneau photovoltaïque (PV) et d'un convertisseur continu-continu de type Boost. Ce dernier est considéré comme un étage d'adaptation entre le PV et la charge pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

III.2. Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre la figure III.1. Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC-DC (Hacheur Boost), le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie [LAR09].

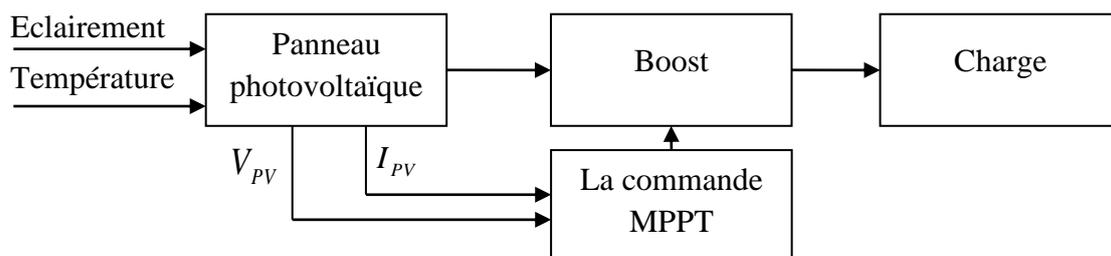


Figure III.1 : Schéma synoptique du système photovoltaïque

III.3. Convertisseur Statique (Hacheur BOOST)

Le convertisseur DC-DC est une interface qui permet l'adaptation entre le panneau PV et la charge afin d'extraire la puissance maximale du panneau [COE10]. La figure III.2 illustre le montage Boost.

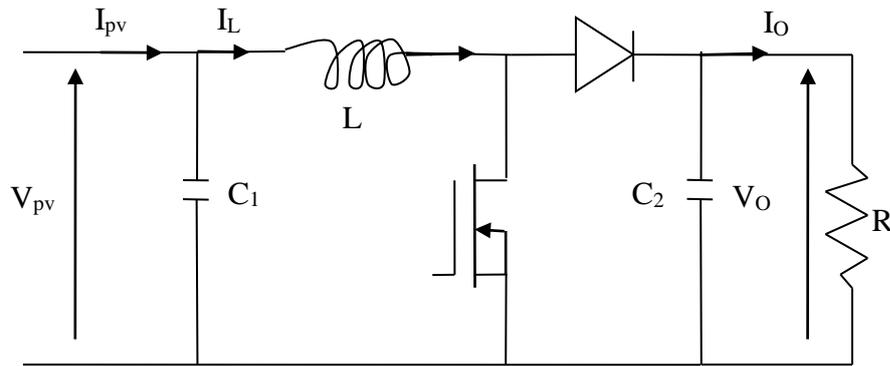


Figure III.2: Montage Boost

III.3.1. Modélisation du convertisseur Boost

Un convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue plus élevée. Il comprend deux séquences selon que l'interrupteur commandable soit fermé ou ouvert [RAS04]. La figure III.3 (a, b, c) représente respectivement, la structure globale du boost, la structure avec l'interrupteur fermé et la structure avec l'interrupteur ouvert. Pour modéliser le convertisseur, on applique les lois de kirchhoff (loi des mailles et loi des nœuds) aux circuits électriques caractérisant les deux séquences de fonctionnement.

La première séquence est caractérisée par $u = 1$, l'interrupteur fermé et la diode ouverte. Les équations qui régissent le convertisseur sont données par:

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

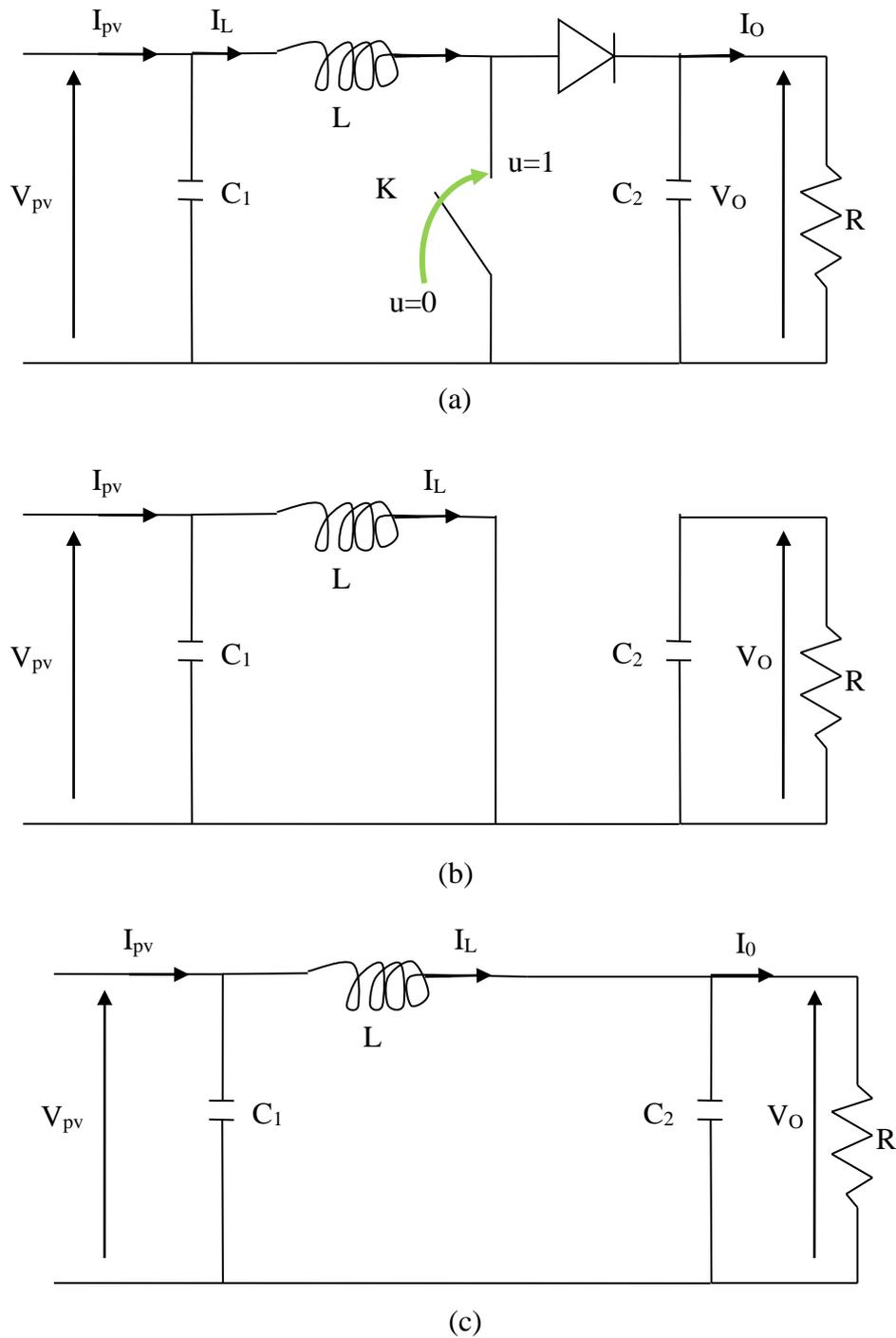


Figure III.3 : Schéma électrique de base du convertisseur Boost
 a) Structure globale,
 b) Structure avec interrupteur fermé,
 c) Structure avec interrupteur ouvert.

La seconde séquence de fonctionnement est caractérisée par $u = 0$, l'interrupteur ouvert et la diode fermée. Le système d'équations qui régit le convertisseur à l'état « off » est présenté ci-après :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_0}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{I_L}{C_2} \end{cases} \quad (III.2)$$

A partir des deux systèmes d'équations précédents (III.1) et (III.2), le modèle mathématique du hacheur Boost est déduit :

$$\begin{cases} V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_0(1-u) \\ (1-u)I_L = C_2 \frac{dV_0}{dt} + I_0 \end{cases} \quad (III.3)$$

Le rapport entre la tension d'entrée et celle de la sortie est donné par [AIR05]:

$$\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{1}{1-d} \quad (III.4)$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique [BEL15c] :

$$\frac{I_L}{I_0} = \frac{1}{1-d} \quad (III.5)$$

Où d est le rapport cyclique du convertisseur Boost

III.4. La commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [KOL13], [KAS07]. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique d en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite l'algorithme de commande la plus populaire.

III.5. P&O classique avec un pas de perturbation fixe (PPF)

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique d [SEO11]. En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant j , puis on la

compare à la précédente de l'instant (j-1). Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [SER13], [ABB13].

La figure III.4 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande le courant et la tension du PV sont nécessaires pour déterminer la puissance à chaque instant j.

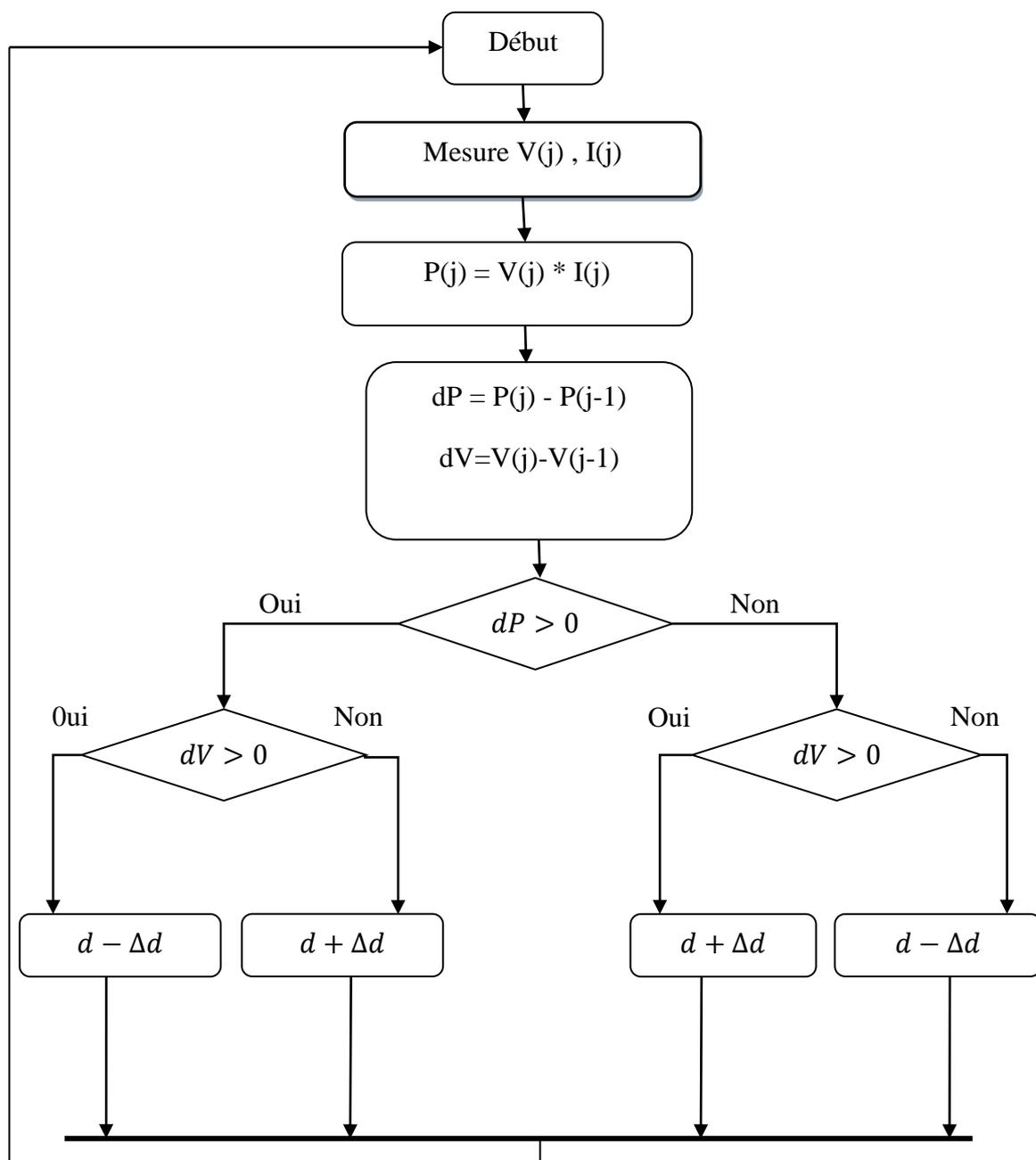


Figure III.4 : Organigramme de la commande P&O (PPF) classique

III.5.1. Application de la P&O (PPF) classique à la poursuite du MPP

Dans cette partie nous sommes en train de tester la commande P&O(PPF) classique pour connaître leurs avantages et leurs inconvénients.

Les scénarios de test sont :

- P&O(PPF) contrôlant un hacheur boost sous des conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ W/m}^2$).
- P&O(PPF) classique contrôlant un hacheur boost sous des conditions d'irradiations variables.

III.5.1.1. P&O(PPF) classique pour des conditions climatiques standards

1- P&O(PPF) classique avec un pas de perturbation $\Delta d = 0.002$

La méthode P&O(PPF) est une technique généralement très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale (MPP) d'un système PV. La Figure III.5 montre respectivement les signaux suivants : le rapport cyclique d , le courant, la tension et la puissance.

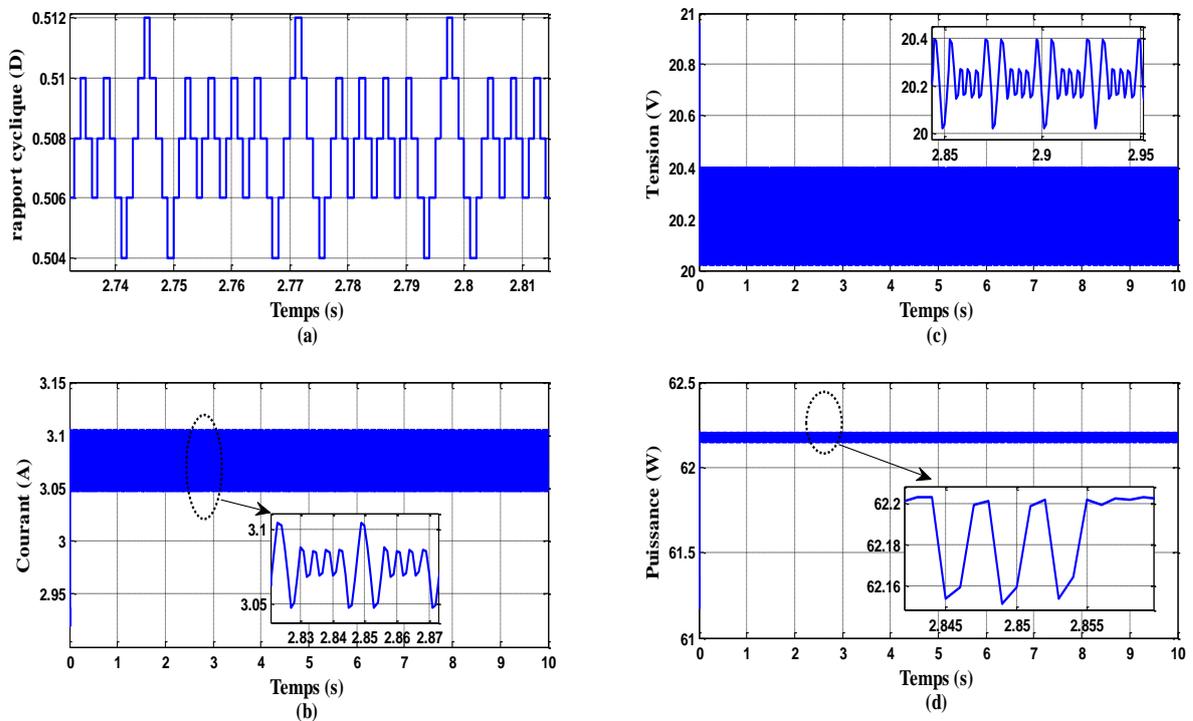


Figure III.5 : P&O(PPF) classique dans des conditions climatiques standards

($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ W/m}^2$)

a) Variation de rapport cyclique d , b) Le courant PV, c) La tension PV

Notez à travers la figure III.5 que l'inconvénient avec cette méthode est que le point de fonctionnement du PV est perturbé avec chaque cycle, même lorsque le point de puissance maximale est atteint. Nous remarquons également que l'oscillation est plus grande autour de la puissance maximale (MPP).

2- P&O(PPF) classique avec un pas de perturbation $\Delta d = 0.0002$

Dans cette partie, nous allons essayer de réduire l'oscillation autour de la puissance maximale (MPP) en utilisant un pas de perturbation inférieur à celui que nous avons utilisé précédemment, d'où $\Delta d = 0.0002$.

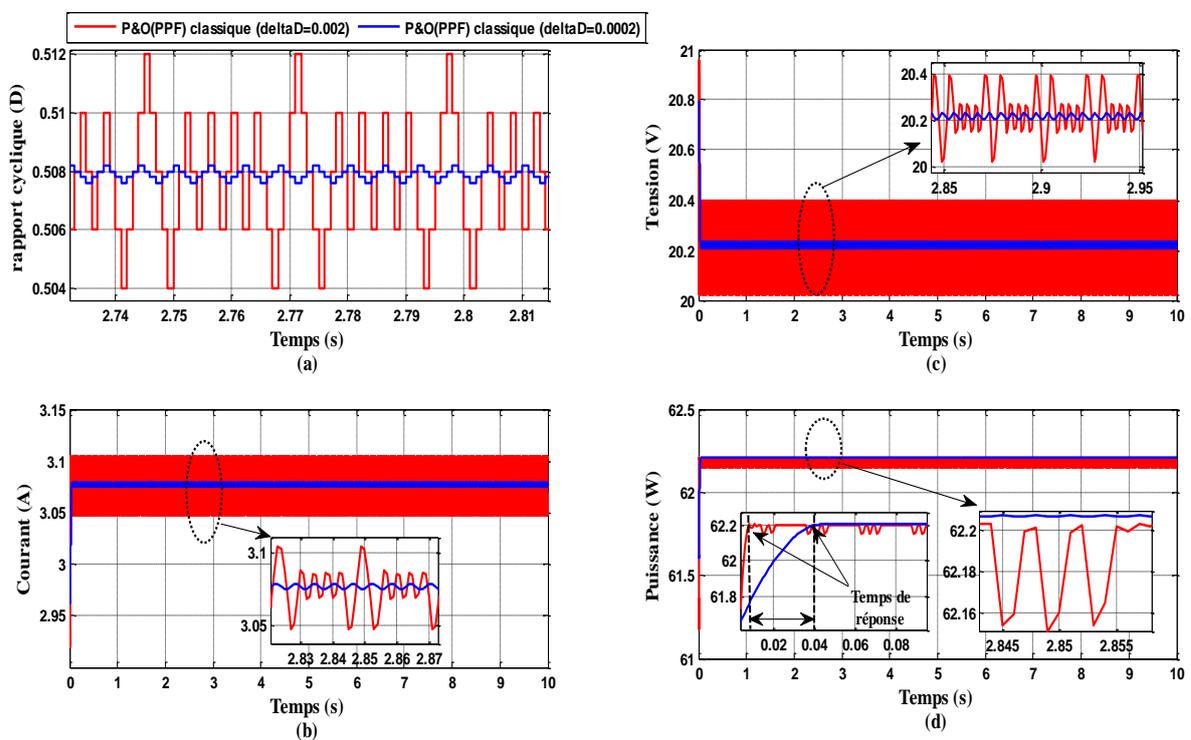


Figure III.6 : P&O(PPF) classique avec deux pas de perturbations déferents sous des conditions climatiques standards

a) variation de rapport cyclique d, b) Le courant PV, c) La tension PV

La figure III.6 montre que lorsque nous avons réduit le pas de perturbation Δd , nous avons obtenu un bon changement en performances de la commande P&O(PPF) classique, en principe est de réduire l'oscillation autour de la puissance maximale (MPP).

Donc la commande P&O(PPF) classique avec un pas très faible résoudre un peu le problème de l'oscillation autour de la MPP, mais un autre problème se pose : le temps de réponse est augmente par rapport à la commande P&O(PPF) classique avec ($\Delta d = 0.002$) comme le montre la figure III.6(d).

III.5.1.2. P&O(PPF) classique pour des conditions climatiques variables

Nous allons tester la performance de la commande P&O(PPF) classique en effectuant des variations sur l'irradiation. Nous apportons des variations sur l'irradiation solaire et nous supposons que la température est variable. L'ensoleillement passe brusquement de 1000 à 200W/m² et de 200 à 400 W/m² puis de 400 à 800 W/m² et finalement de 800 à 1000 W/m² pendant 10s.

1- P&O (PPF) classique avec un pas de perturbation $\Delta d = 0.002$

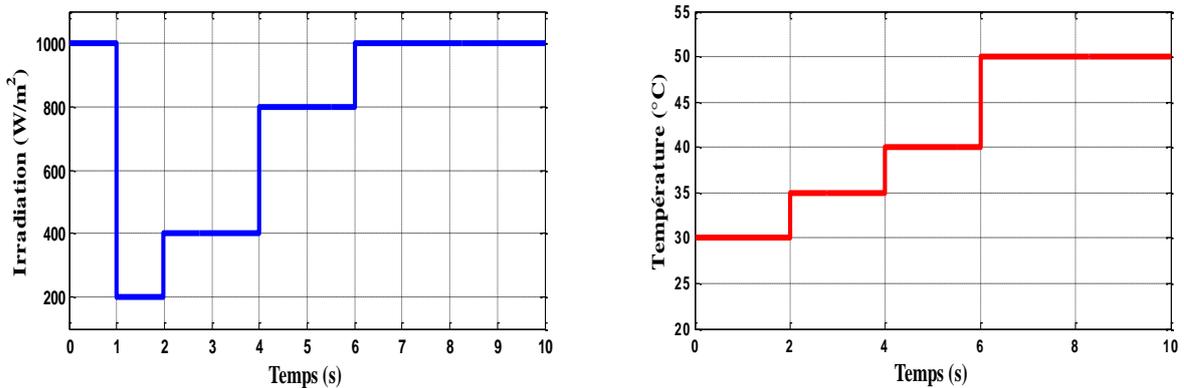


Figure III.7 : Conditions climatiques variables

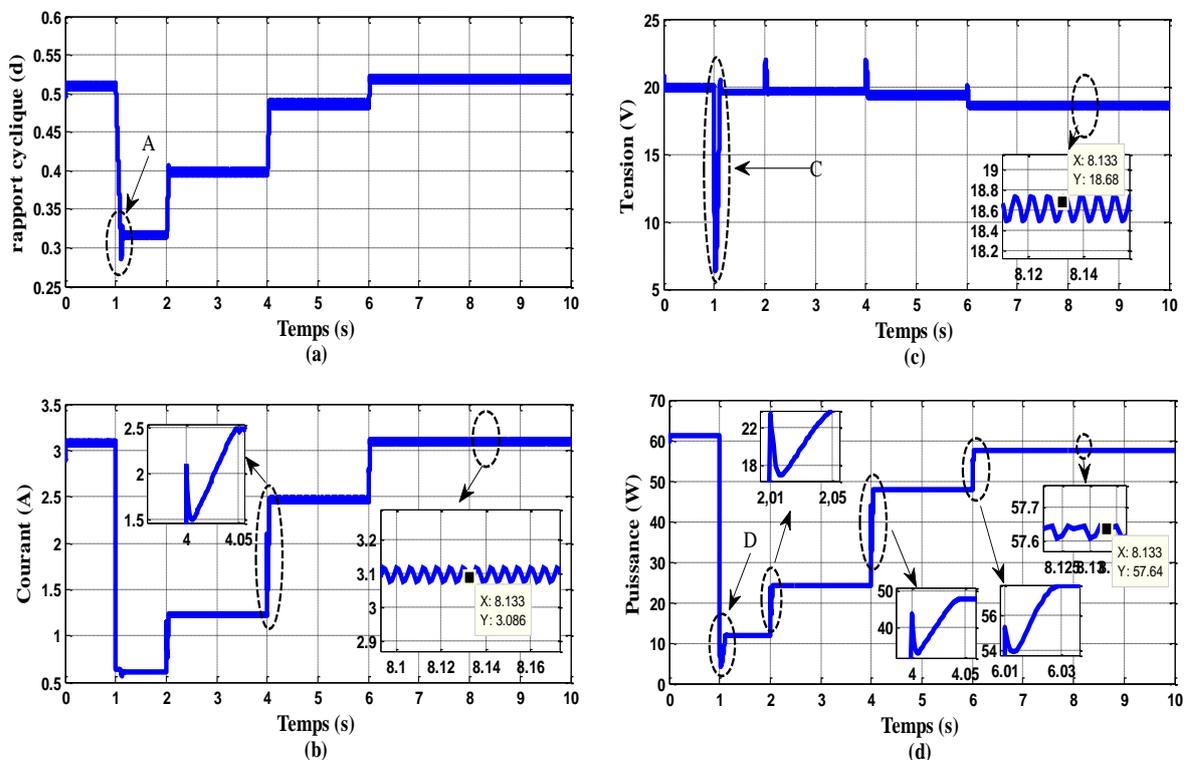


Figure III.8 : P&O(PPF) classique sous des conditions climatiques variables ($\Delta d = 0.002$)

La figure III.8 illustre la variation du rapport cyclique, le courant, la tension et la puissance fournie par le PV quand le système est soumis à la commande P&O(PPF) classique avec $\Delta d = 0.002$. Nous remarquons à partir de la figure III.8 (d) que la puissance maximale fournie par la PV varie proportionnellement à l'irradiation.

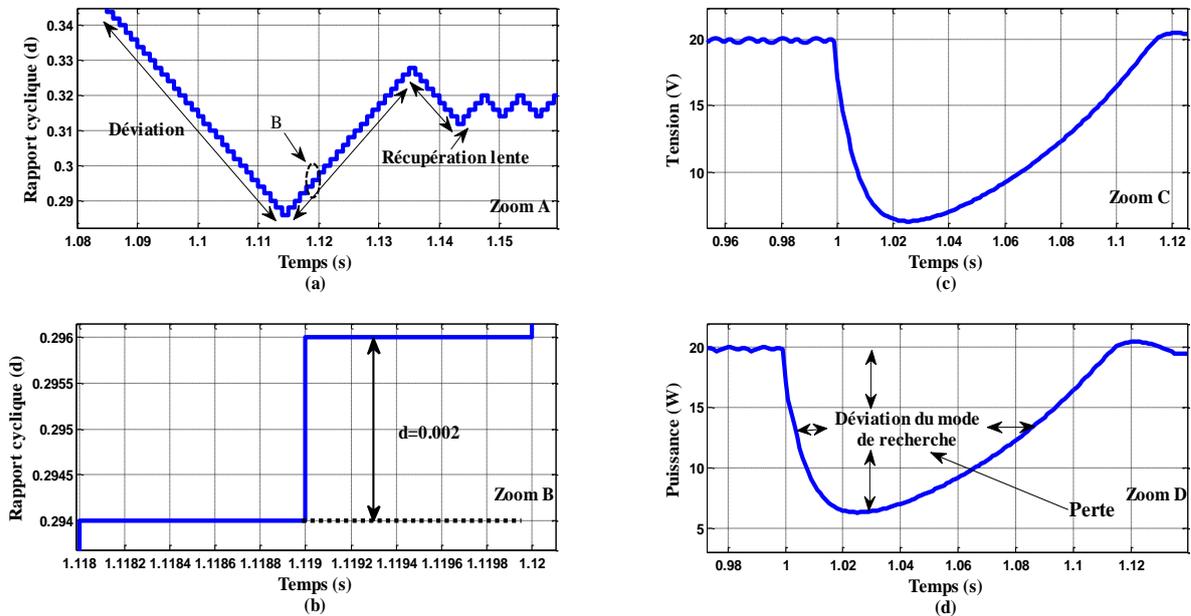


Figure III.9 : Zoom sur le rapport cyclique, le courant, la tension et la puissance du PV

La figure III.9 montre que la commande P&O(PPF) classique est affectée négativement quand un changement soudain de l'irradiation se produit, et qui cause une déviation du mode recherche de MPP. La figure III.9(a) montrée clairement que la commande est complètement perdue de son mode recherche d'origine, et elle ne peut pas stopper le problème de la déviation uniquement après une période de temps considérable, en remarque aussi que quand la commande P&O(PPF) classique corrigeait le sens du mode recherche, il avait besoin de temps pour atteindre le point (MPP).

2- P&O(PPF) classique avec un pas de perturbation $\Delta d = 0.0002$

La figure III.10 montre une comparaison entre la commande P&O(PPF) classique ($\Delta d = 0.002$) et la commande P&O(PPF) classique ($\Delta d = 0.0002$). Notez que pour le pas de perturbation faible, P&O(PPF) classique dans les conditions de changement rapide de l'irradiation elle induit une grande perte de puissance en comparaison avec la commande P&O(PPF) classique avec un grand pas de perturbation. La récupération lente du point de puissance maximum est due à la faible valeur de pas de perturbation $\Delta d \ll$.

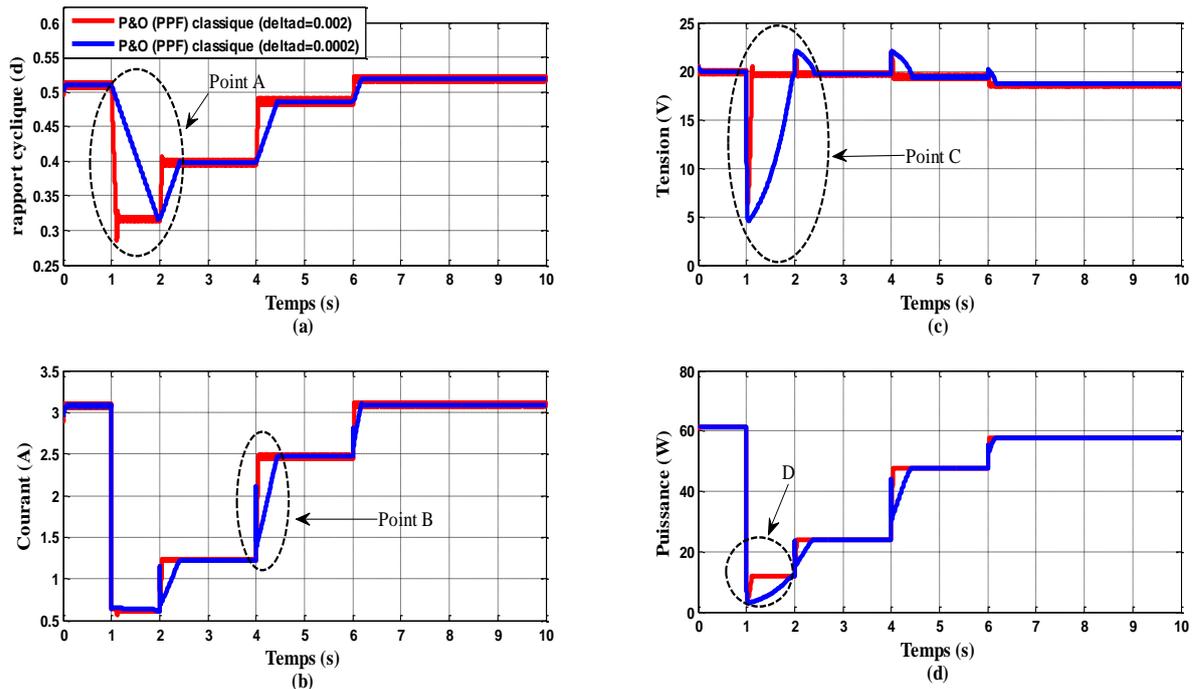


Figure III.10 : P&O(PPF) classique avec deux pas de perturbations déférents sous des conditions climatiques variables. a) variation de rapport cyclique d, b) Le courant, c) La tension et d) La puissance PV

L'avantage principal de la méthode de P&O(PPF) classique est qu'il est facile à mettre en application, c'est à la basse complexité de calcul et il est applicable pour la plupart des systèmes de PV. Pour cette raison, le P&O(PPF) classique est une méthode la plus souvent utilisée de MPPT de nos jours. Les deux principaux problèmes du P&O(PPF) classique sont :

- Les oscillations autour du MPP en états d'équilibre comme le montre la figure III.5
- Des pauvres dépistant (**déviaton du mode de recherche**) sous des irradiations rapidement changeantes.

III.6. P&O classique avec un pas de perturbation variable (PPV)

Cette méthode permet de résoudre efficacement la vitesse de poursuite et la précision du suivi du point maximal de la puissance comparé par la méthode P&O(PPF) classique [XU12]. L'amélioration de la vitesse de poursuite, c'est pour éviter les erreurs de jugement et les oscillations de puissance maximale.

Dans cette section, nous allons présenter l'organigramme de la commande P&O(PPV) classique et une étude comparative par logiciel MATLAB/SIMULINK entre cette méthode

et la méthode P&O(PPF) classique pour vérifier leur efficacité pour améliorer le temps de réponse et la minimisation de l'oscillation autour de la puissance maximale.

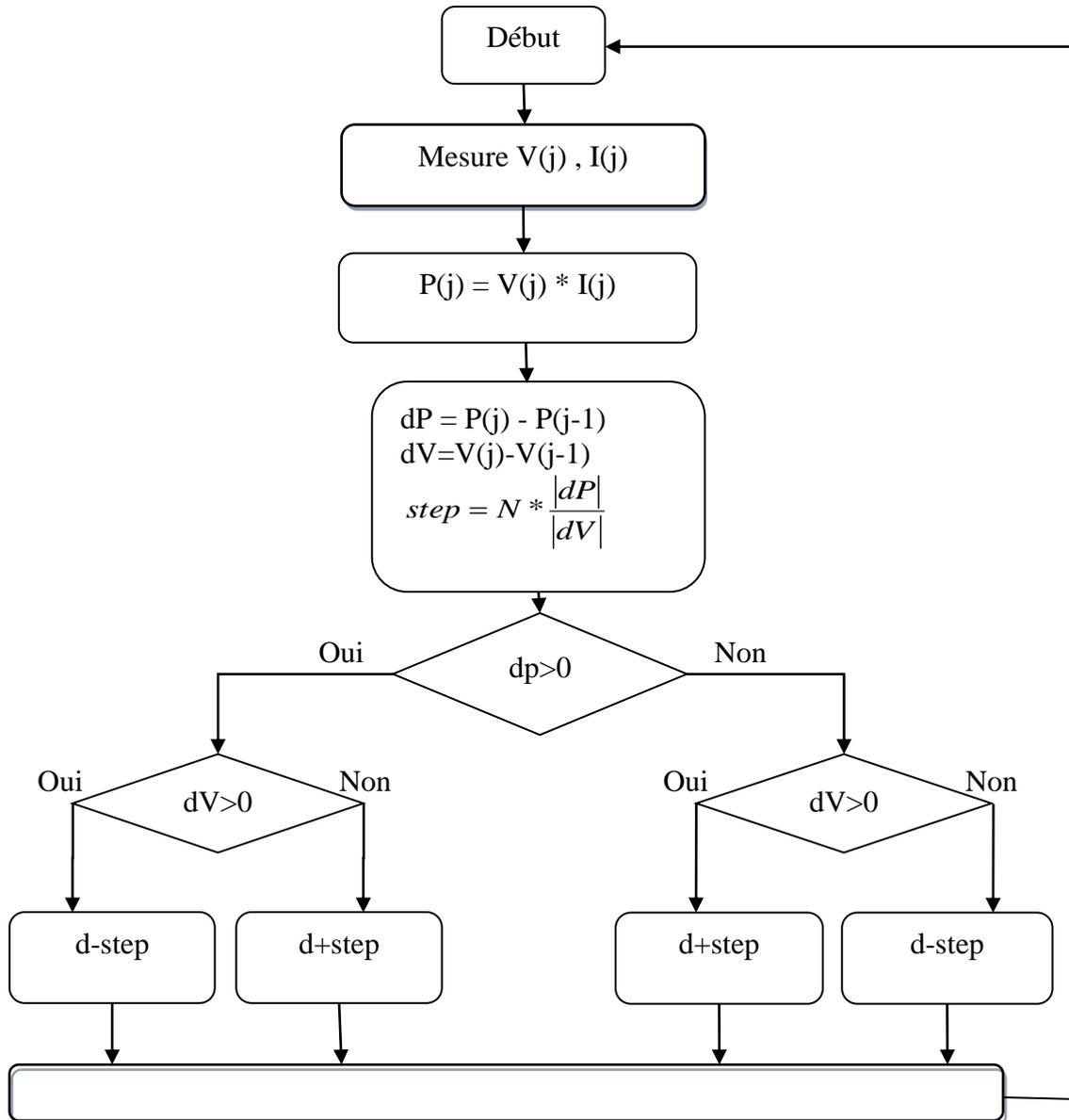


Figure III.11 : Organigramme de la commande P&O(PPV) classique

III.6.1. Application de la P&O(PPV) classique à la poursuite du MPP

III.6.1.1. P&O(PPV) classique pour des conditions climatiques standards

Dans cette section on présente, la simulation d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande P&O(PPV) classique.

La figure III.12 montre une comparaison entre les P&O(PPF) et P&O(PPV) classiques dans des conditions climatiques standards ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

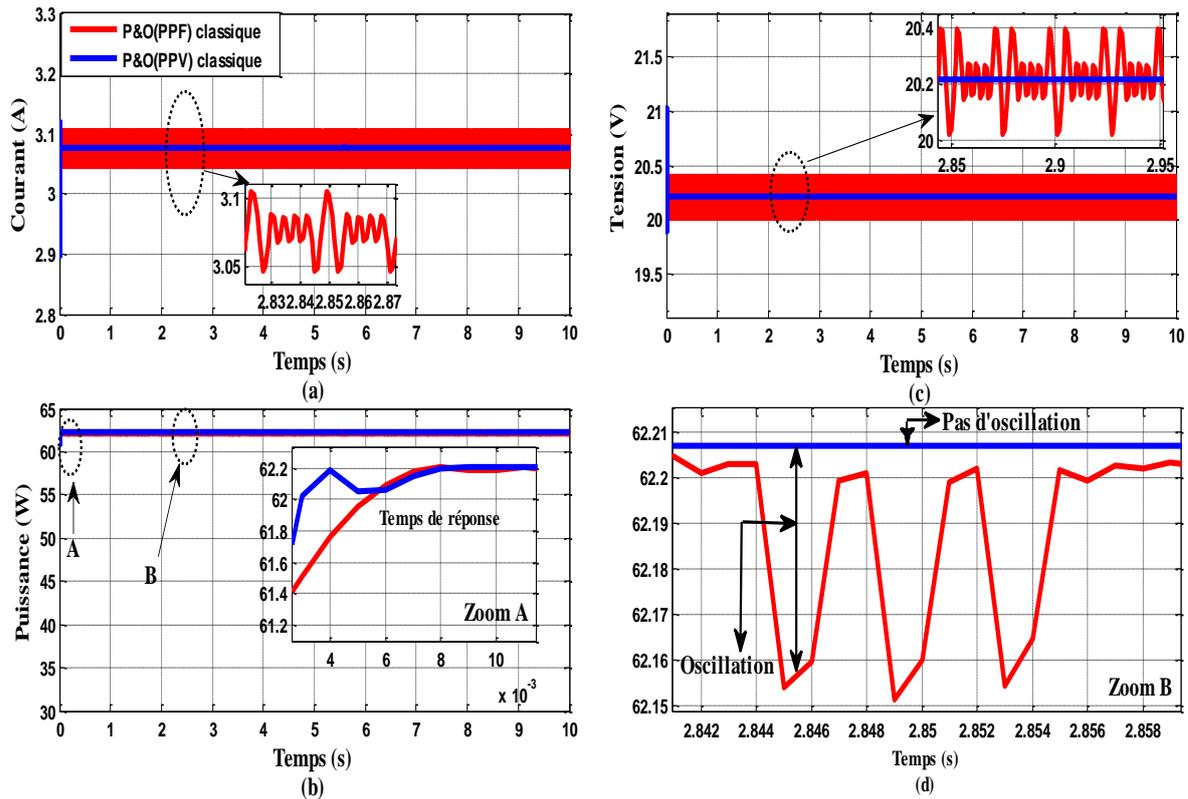


Figure III.12 : Comparaison entre P&O (PPF) et P&O (PPV) classiques dans des conditions climatiques standard

On remarque à partir de la figure III.12-b (Zoom A) que le régime transitoire est plus long, pour le système régulé par l'algorithme P&O(PPF) classique, que celui régulé par P&O(PPV) classique.

En régime permanent, la commande P&O(PPV) classique est parfaitement calée sur le point de puissance maximale, alors que P&O(PPF) classique présente des oscillations autour du point maximal MPP (figure III.12-d).

III.6.1.2. P&O(PPV) classique pour des conditions climatiques variables

Sous une température variable, on varié l'irradiation pendant 10s. La figure III.13 montre que les deux commandes poursuivent, parfaitement, les changements de consignes (figures III.7).

La figure III.13 illustre qu'en régime permanent, la P&O(PPV) classique reste efficace pour poursuivre le point maximal sans oscillation autour de MPP, mais ce que nous remarquons est qu'une fois qu'un changement rapide de l'irradiation se produit, cette dernière perd complètement le sens du mode de recherche de MPP et cela crée une perte d'énergie.

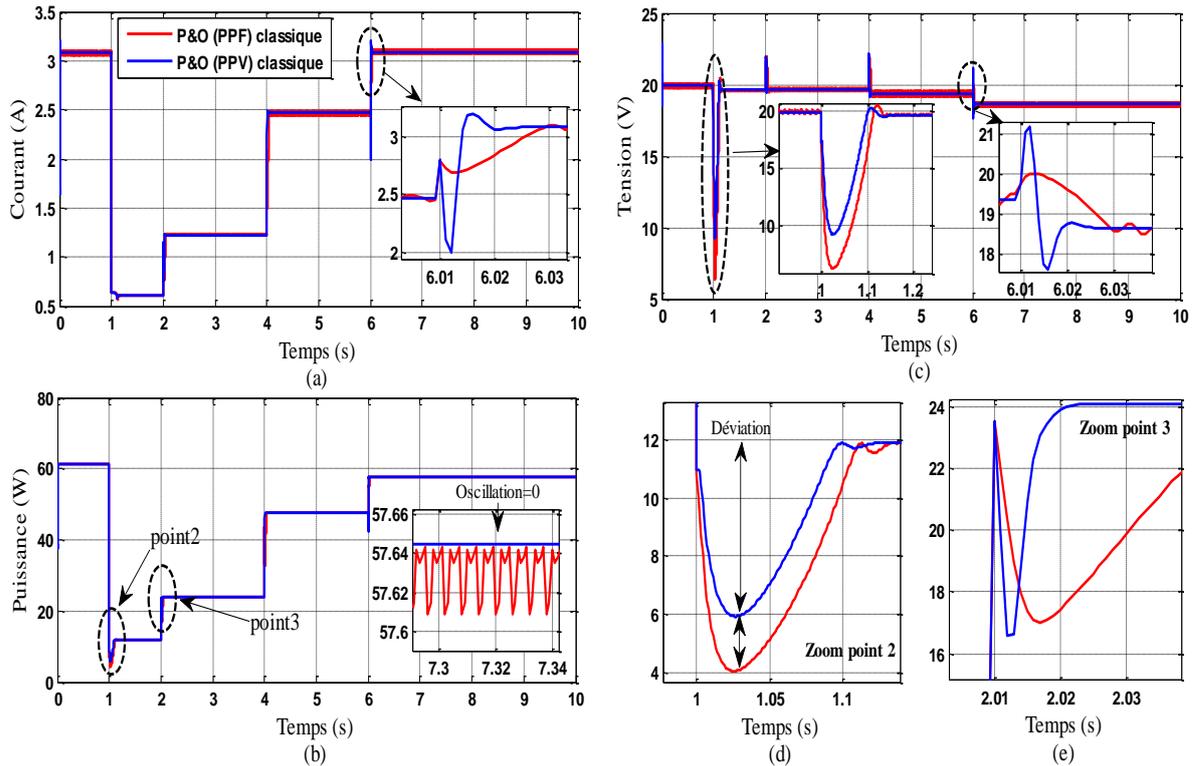


Figure III.13 : Comparaison entre P&O(PPF) et P&O(PPV) dans des conditions climatiques changeantes

III.7. Elimination de déviation du mode de recherche de MPPT

III.7.1. La déviation du mode de recherche

L'augmentation et la diminution rapides et successives de l'éclairement provoquent le problème de la déviation du mode recherche de MPP dû à l'algorithme P&O classique qui est incapable de reconnaître que le changement de puissance provient d'un changement climatique ou de perturbation [KIL15]. Supposons qu'il y ait une augmentation du niveau d'éclairement, tandis que le système PV fonctionne au point MPP1 à la perturbation j comme indiqué sur la figure III.14, le point de fonctionnement sera déplacé vers un nouveau point 2 dans la courbe d'éclairement correspondant à un changement négatif de la puissance (dP) et la tension (dV). L'information de changement négatif pendant la perturbation $j+1$ fera que l'algorithme décrémentera le pas de perturbation au lieu de l'incrémenter et déplacera le point de fonctionnement du point 2 au point 3 comme montré sur la figure III.14.

Cette fausse décision causant le point de fonctionnement du système PV est loin de MPP en raison des changements rapides de l'irradiation comme le montre la Figure III.14.

De plus, l'augmentation rapide et successive de l'éclairement dévie le point MPP de fonctionnement du système PV, comme le montre la figure III.15.

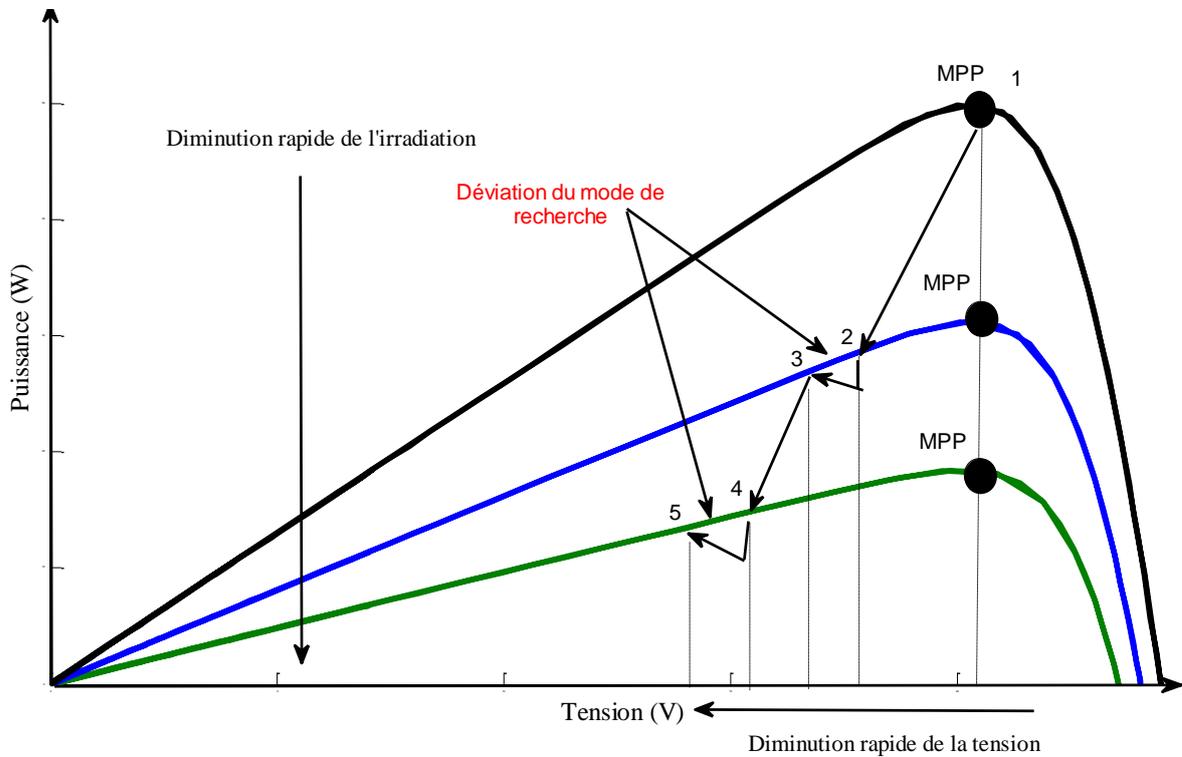


Figure III.14 : Diminution rapide de l'irradiation

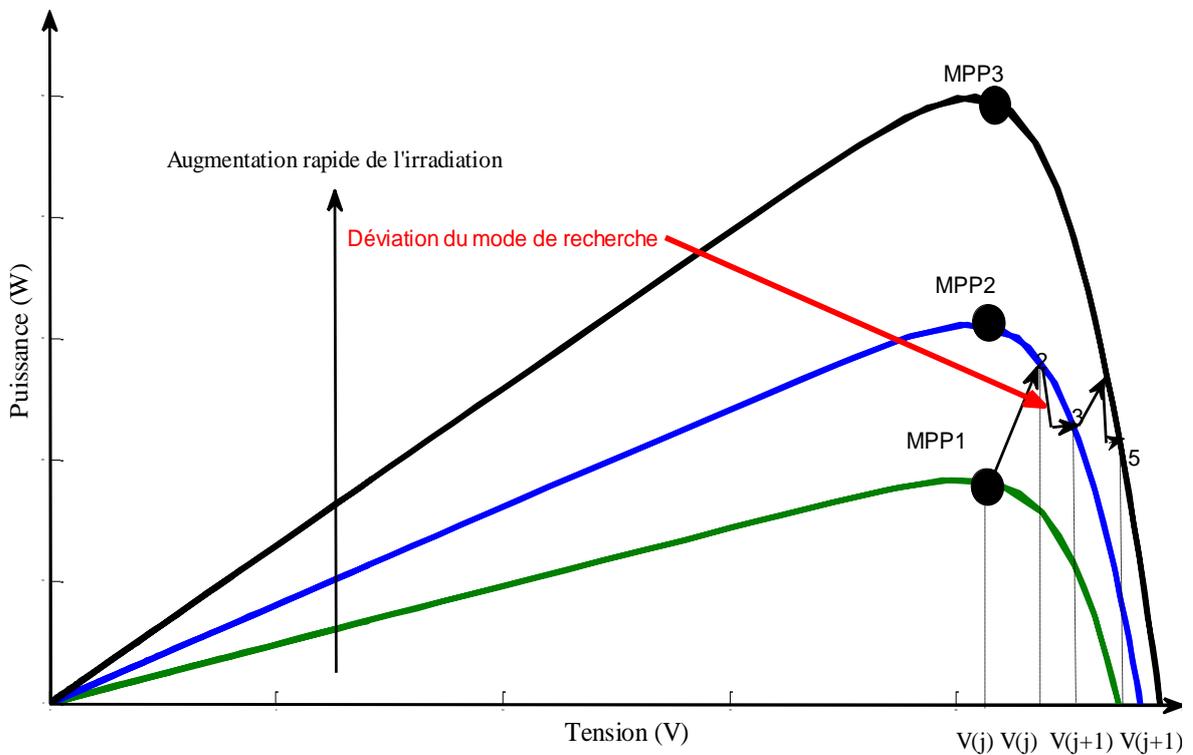


Figure III.15 : Augmentation rapide de l'irradiation

III.7.2 La commande P&O modifiée

La commande P&O classique est développée sur la base de l'observation de dP et dV en considérant les caractéristiques P-V du module PV [ISH12]. Comme indiqué précédemment, la P&O classique souffre de la déviation du mode de recherche de MPP en cas d'un changement rapide de l'irradiation dû à une confusion, et cette confusion peut être éliminée en évaluant un autre paramètre dI (changement de courant).

Avec l'information de dV , dP et dI , le phénomène de la déviation du mode de recherche de MPP est évité en cas de variation rapide de l'irradiation.

Les caractéristiques I-V du module PV et le changement de point de fonctionnement dû à un changement de l'irradiation sont montrés sur la figure III.16.

Comme le montre la figure III.16, en supposant qu'il y ait une diminution de l'éclairement au point 2, puis ce point va se fixer à un nouveau point 3 dans la nouvelle courbe d'éclairement. Maintenant, la décision doit être prise par l'algorithme au point 3, où $dI < 0$ comme indiqué sur la figure III.16. En même temps sur les caractéristiques P-V au point 3, à la fois $dP < 0$ et $dV < 0$ comme montré dans la figure III.16. Ainsi, les trois paramètres dP , dV et dI sont négatifs au point 3 comme montrent les figures III.16 et 17.

Ainsi, la valeur négative de dP est due de la perturbation ou la diminution de l'irradiation qui peut être détectée en utilisant le paramètre supplémentaire dI . Les deux dP , dV et dI ne seront négatifs que pour une diminution de l'éclairement comme le montre la figure III.16. Ainsi, une diminution de l'irradiation peut être détectée en utilisant le paramètre additionnel dI , et ainsi la décrémentation du rapport cyclique par nouveau pas variable Δd_n où il est capable d'éliminer la déviation du mode de recherche de MPP en rapprochant le point de fonctionnement du MPP comme indiqué sur la figure III.17. De même, en cas d'augmentation de l'irradiation, la commande P&O modifiée a détecté que dP , dV et dI sont négatifs et augmenté donc le rapport cyclique par Δd_n . Δd_n est un pas variable qui peut être exprimé par l'équation (III.6) [BEL17a].

$$\Delta d_n = \pm M |\Delta G| \quad (III.6)$$

M est un paramètre constant et ΔG représente le changement d'irradiation. Les organigrammes de cette technique MPPT de P&O(PPF) et P&O(PPV) modifiées sont représentées sur la figure III.18 et figure III.20

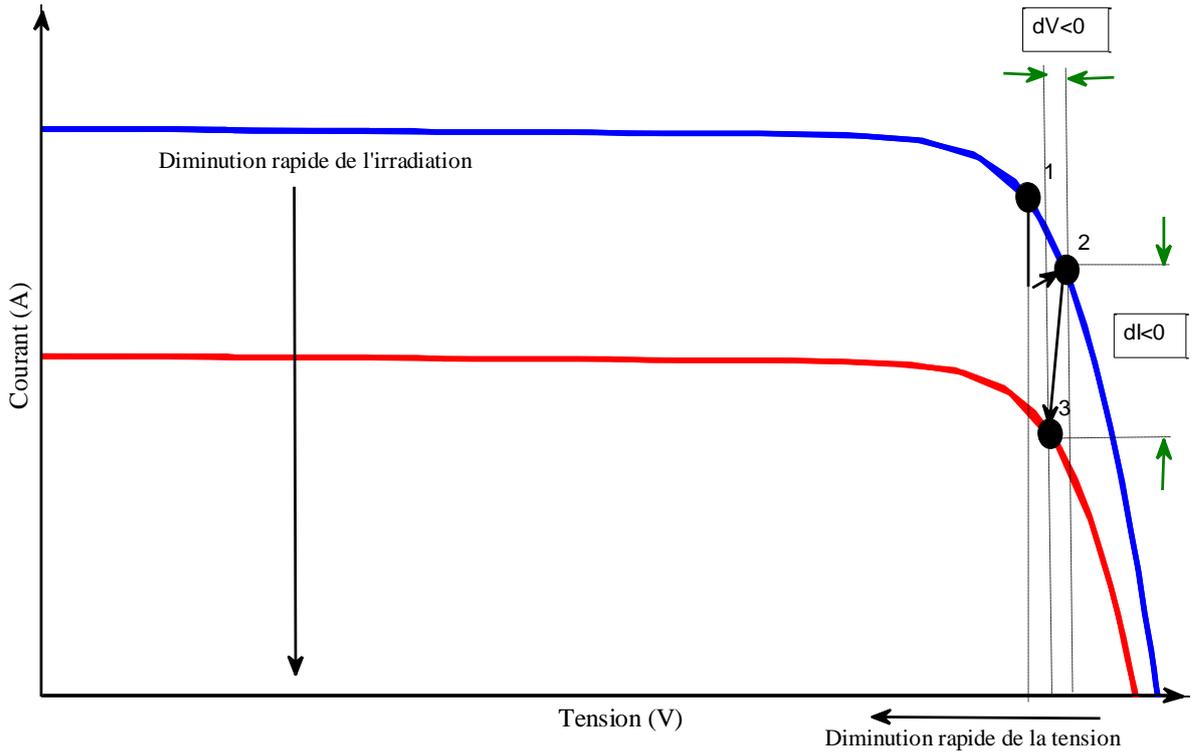


Figure III.16 : Observation du changement de courant

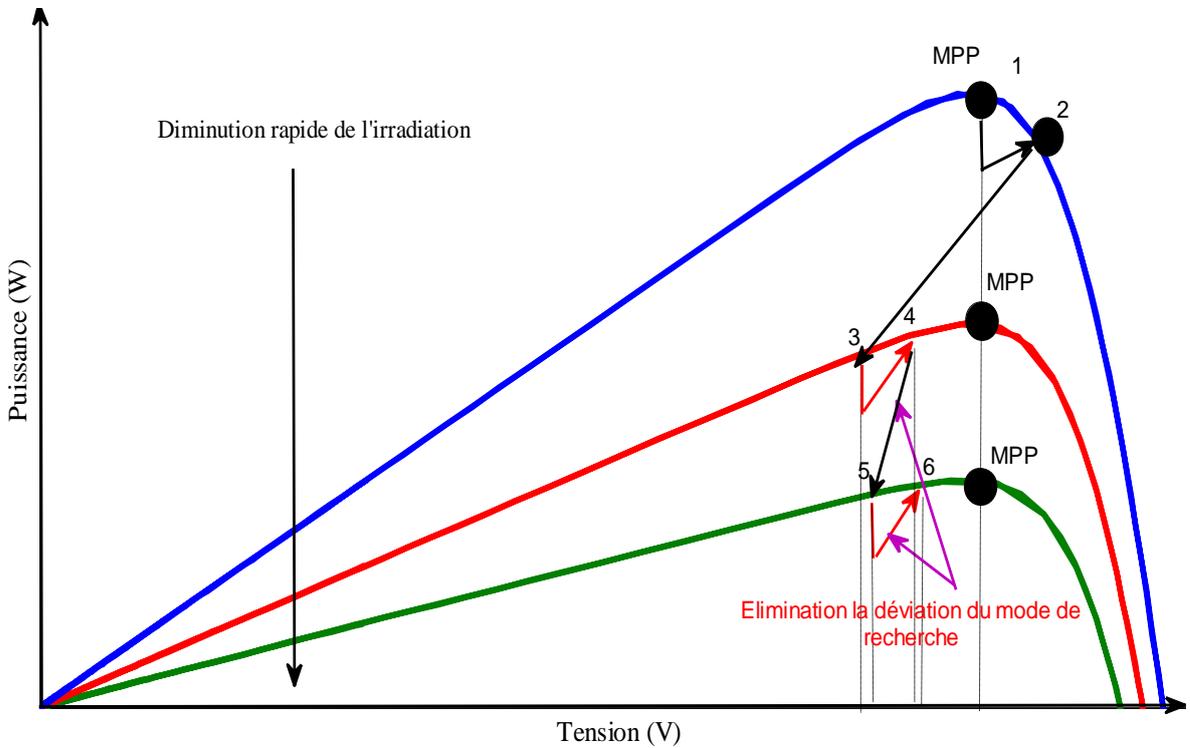


Figure III.17 : Élimination de déviation du mode de recherche de MPP

La figure III.18 représente l'organigramme de la commande P&O (PPF) modifiée [BEL17b].

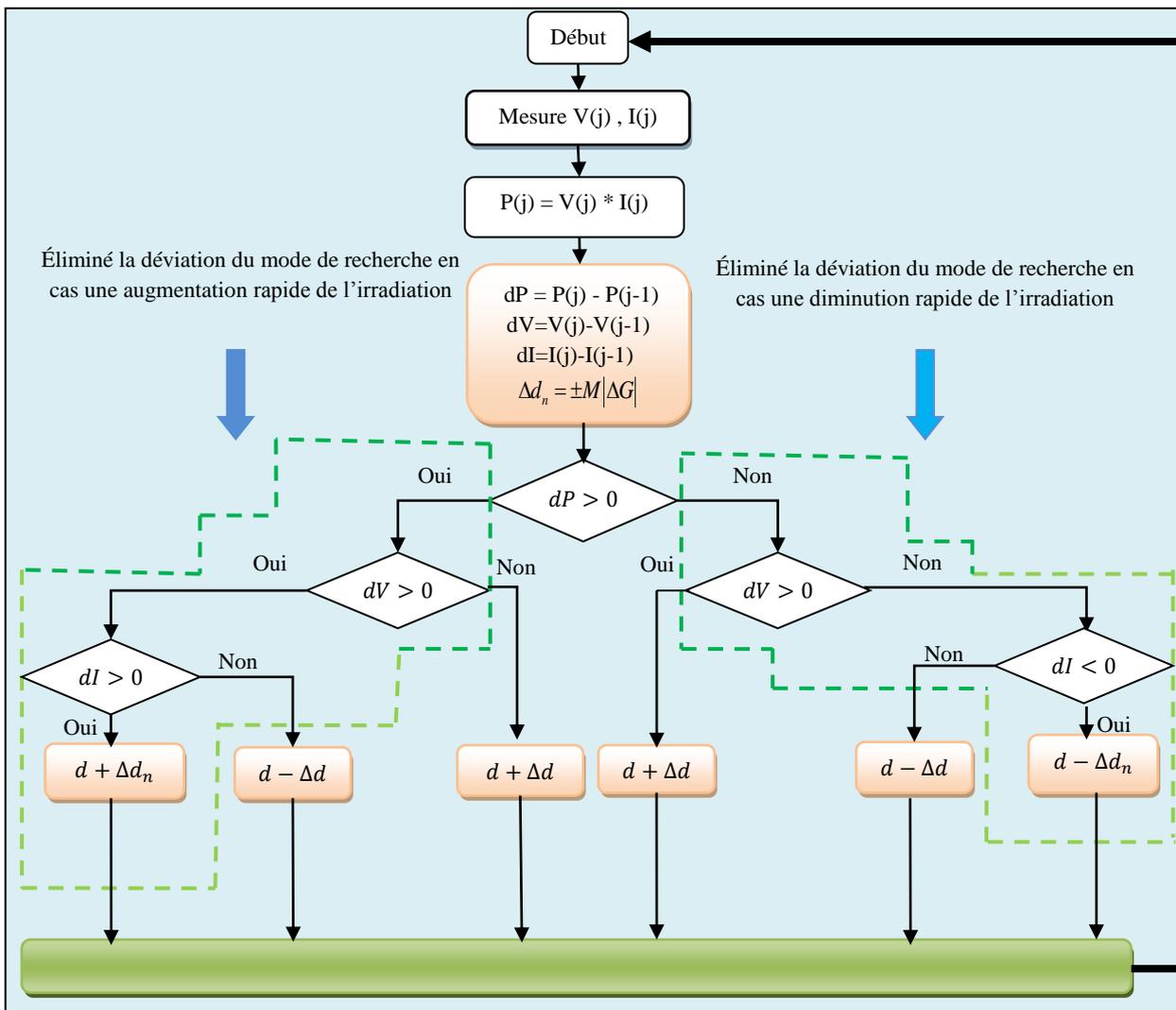


Figure III.18 : Organigramme de P&O(PPF) modifiée

III.7.2.2 Application de la P&O (PPF) modifiée à la poursuite du MPP

La figure III.19 illustre la simulation de la commande P&O(PPF) modifiée dans des conditions de changement climatique.

Nous observons à partir de la figure III.19 que la commande P&O (PPF) modifiée a réussi à redresser le problème de la déviation du mode recherche de MPP en cas d'un changement rapide de l'irradiation.

Cependant, nous notons aussi à partir de la figure III.19 que cette commande reste faible pour éliminer totalement l'oscillation autour de la puissance maximale malgré l'application de la modification.

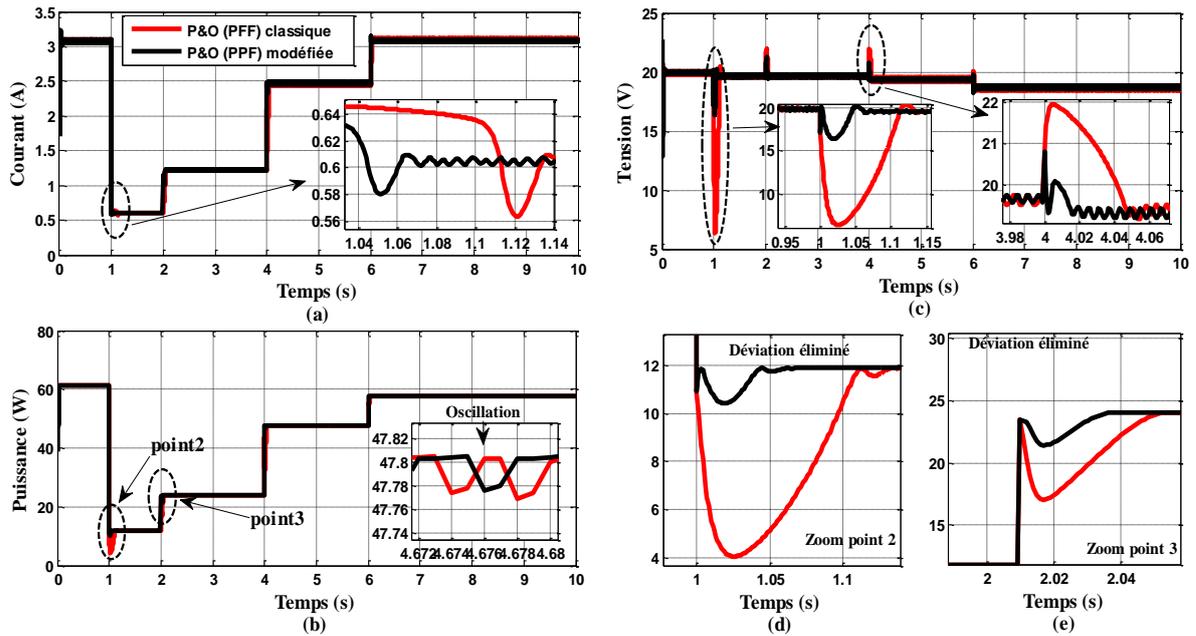


Figure III.19 : Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPF) modifiée dans des conditions climatiques variables

Le problème de l'oscillation autour de la puissance maximale, nous a poussés à appliquer la nouvelle modification sur la commande P&O(PPV) classique.

La figure III.20 représente l'organigramme de la commande P&O (PPV) modifiée [BEL17a].

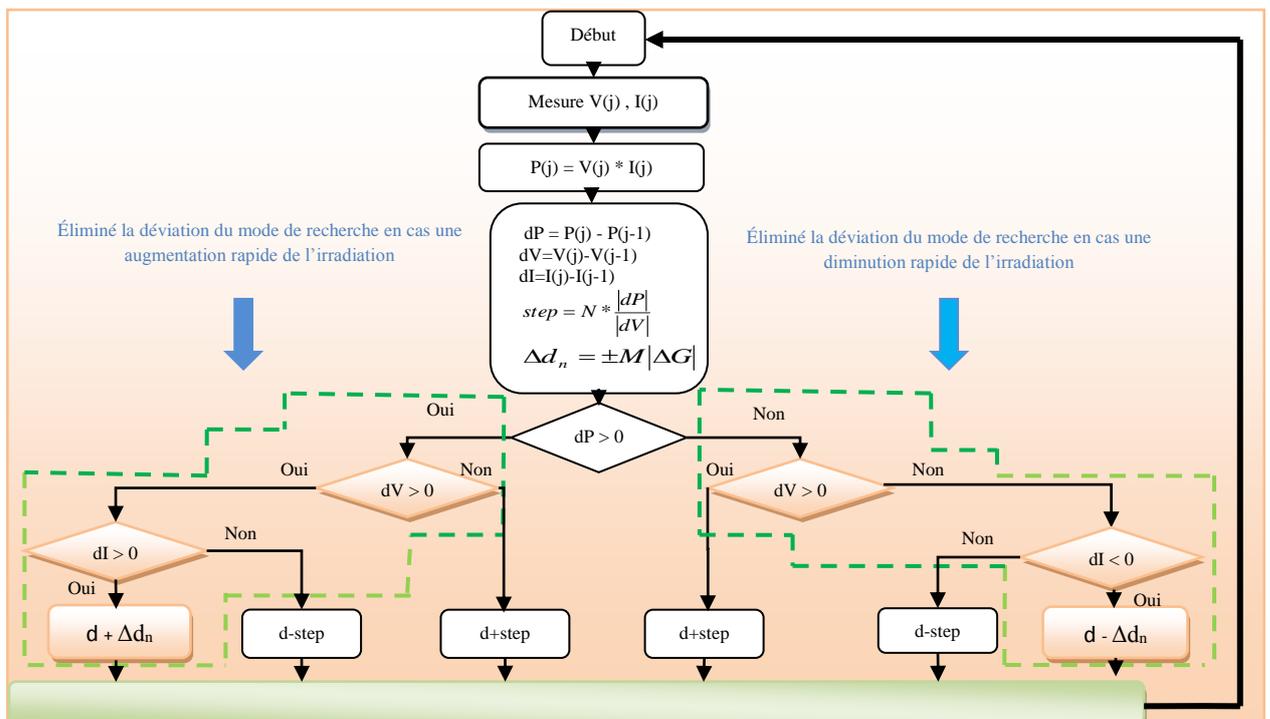


Figure III.20 : Organigramme de P&O(PPV) modifiée

III.8. Résultats de simulation

Après la simulation du système avec la commande P&O(PPV) modifiée, dans les mêmes conditions de variations climatiques, les figure III.21 et III.22 représente respectivement les résultats comparatifs de la simulation P&O (PPF) classique et P&O (PPV) modifiée ainsi que P&O (PPV) classique et P&O (PPV) modifiée.

Nous avons noté à partir de la figure III.21 que dans le cas d'une perturbation causée par la variation rapide de l'irradiation, le système converge vers MPP et reste stable avec un zéro d'oscillation par rapport au P&O(PPF) classique. Nous avons également remarqué à travers la figure III.22 que cette nouvelle modification appliquée sur la commande P&O(PPV) classique permet de supprimer totalement la déviation du mode de recherche de MPP.

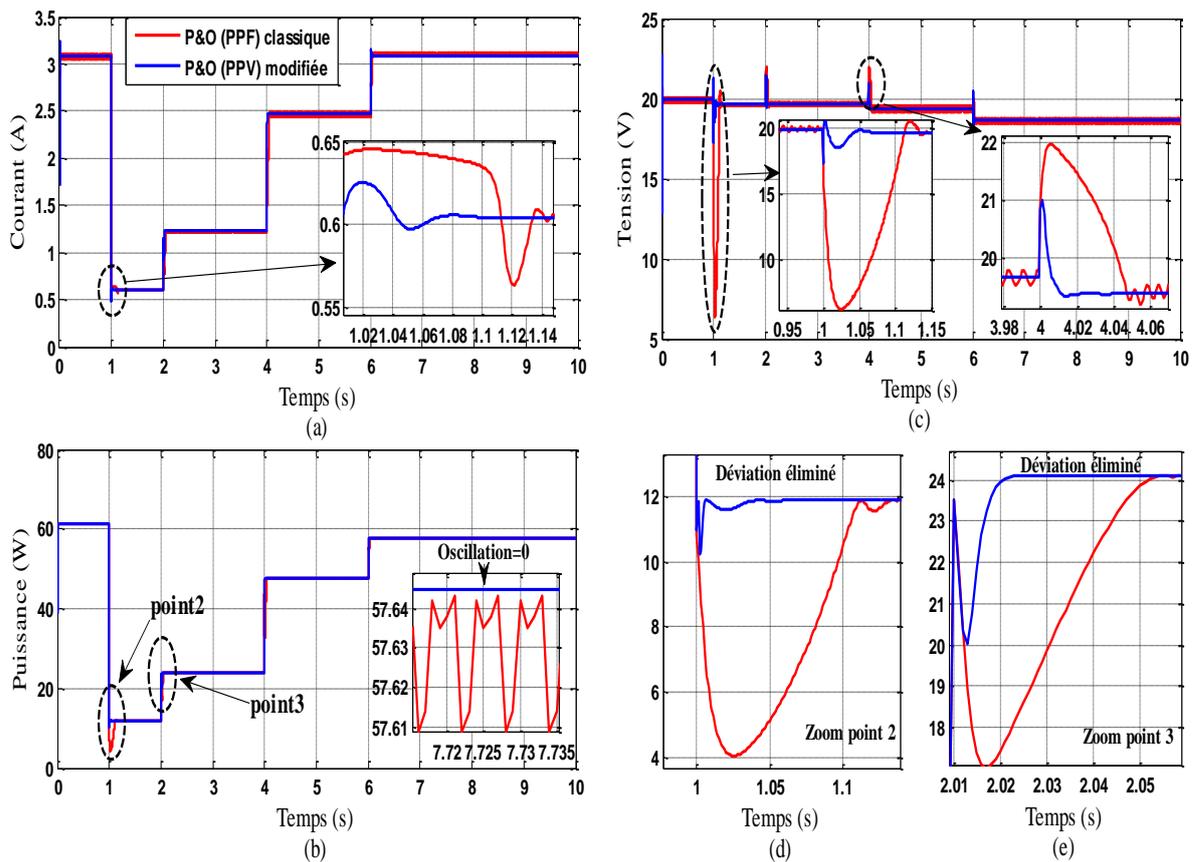


Figure III.21 : Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPV) modifiée dans des conditions climatiques variables

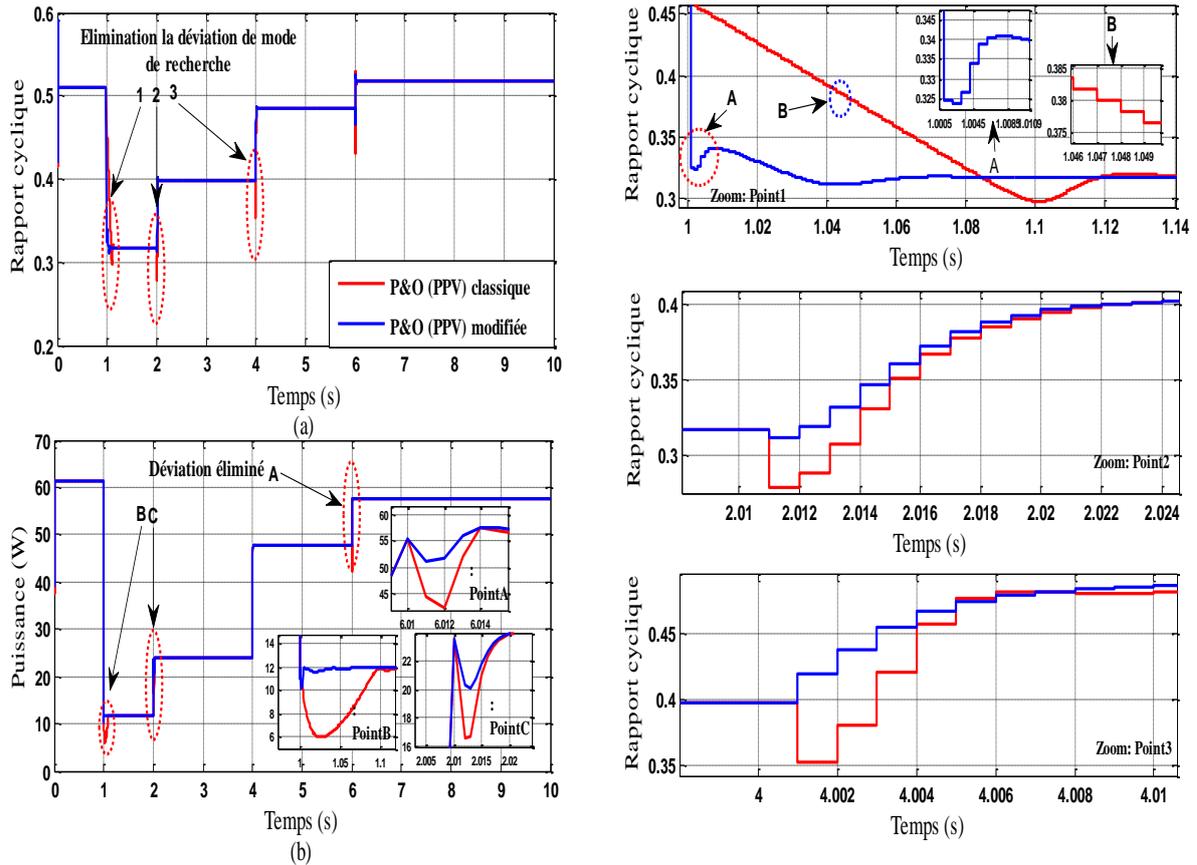


Figure III.22 : Comparaison entre P&O(PPV) classique et P&O(PPV) modifiée dans des conditions climatiques variables

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, la commande P&O a été étudiée pour la poursuite du point maximum de puissance et la structure de type Boost a été adoptée pour sa simplicité et pour son gain en tension relativement plus élevé. Nous avons présenté la technique P&O(PPF) classique puis la P&O(PPV) classique qui offre un meilleur comportement que la P&O(PPF) classique.

La commande P&O (PPV) modifiée a été comparée avec la commande P&O(PPF) et la P&O(PPV) classiques. Cette commande permet d'améliorer le régime transitoire, réduire les oscillations à zéro et éliminé le mode de recherche de MPP.

Chapitre IV

Optimisation d'une Commande MPPT dans une Installation Hybride PV-Diesel

IV.1. Introduction

Le changement climatique fait parfois que le système photovoltaïque est incapable de fournir de l'électricité au consommateur. Le changement rapide du rayonnement solaire fait que la méthode de contrôle MPPT perd sa performance à extraire le point maximum de puissance, ce qui entraîne une perte d'énergie. Le déficit à fournir de l'électricité au consommateur par le système photovoltaïque a incité les chercheurs à trouver des solutions leur permettant d'ajouter d'autres sources d'énergies pour compenser le besoin d'électricité.

Nous avons choisi le diesel et les batteries comme sources de compensation de puissance quand la puissance demandée est plus élevée que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Le diesel est un système fiable de fourniture de l'électricité au consommateur à tout moment, mais en raison de son utilisation d'énergie fossile (carburant) pour la production d'électricité, il cause la pollution de l'air, ce qui nous a forcés à utiliser les batteries pour protéger l'environnement.

Dans ce chapitre nous allons apporter des améliorations, la première amélioration est la subordination du système photovoltaïque-batterie-diesel à un algorithme de supervision et gestion pour une utilisation optimale de l'énergie, protéger les batteries contre les dommages et pour éviter le déficit de la puissance. La deuxième amélioration est optimiser la performance de la commande MPPT pour éviter le phénomène de déviation du mode de recherche du MPP ce qui causait la perte d'énergie ; l'énergie que nous gagnons est exploitée comme énergie stockée dans les batteries pour prolonger la durée « Off » du diesel.

IV.2. Représentation du système étudié

La figure IV.1 représente le bloc du système étudié, le générateur photovoltaïque, le groupe diesel et les batteries complémentaires permettant une alimentation sans interruption à la charge alternative. Afin d'assurer cette complémentarité, un système de commutation s'impose. Ce système est formé par cinq commutateurs (S_1 , S_2 , S_3 , S_4 et S_5) qui relient respectivement les sources du système. L'interrupteur S_3 joue le rôle d'un démarreur qui permet de lancer le diesel, S_1 et S_5 convertissent la puissance surplus en batteries, S_2 et S_4 pour ouvrir le passage de l'énergie compensée.

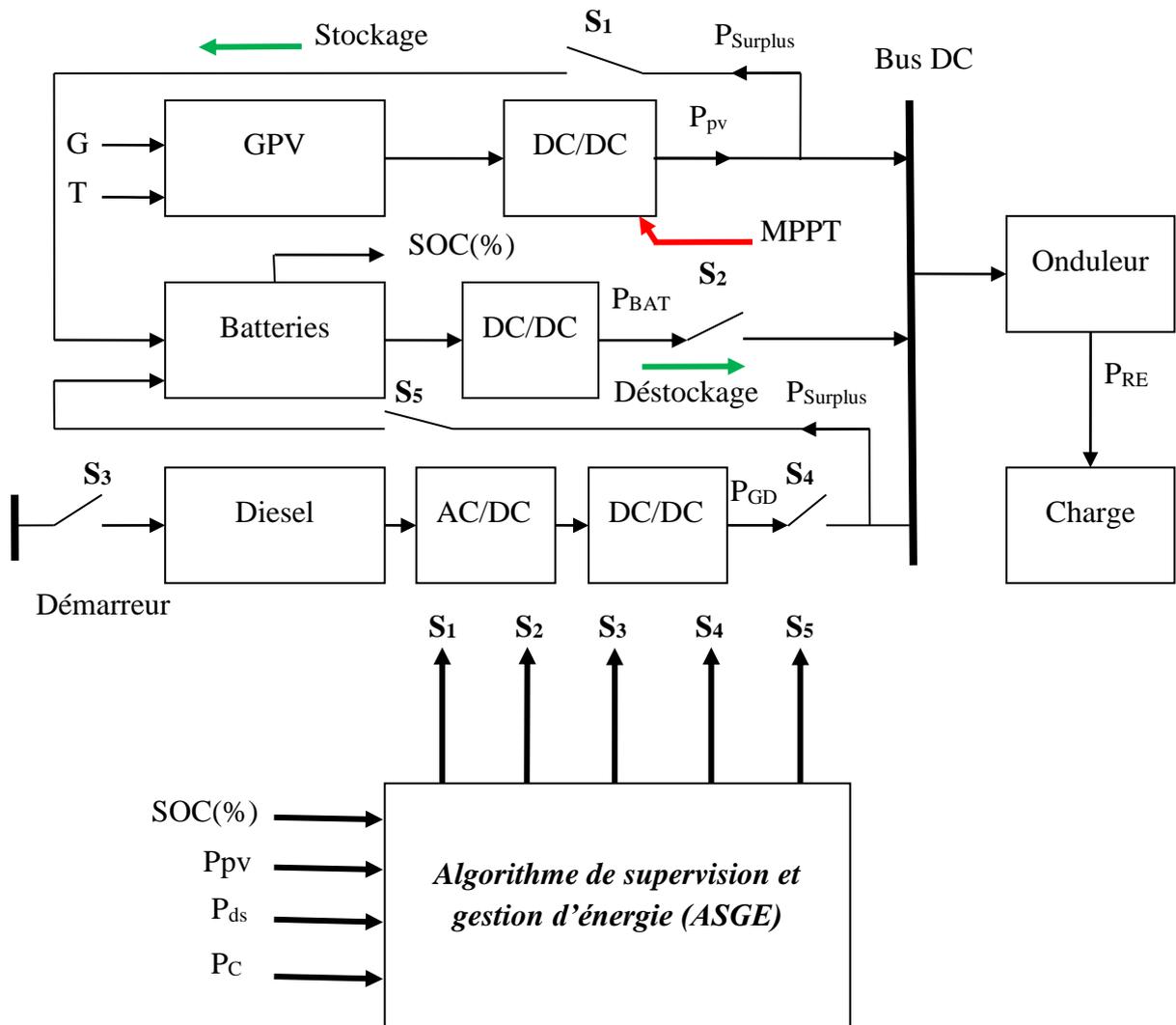


Figure IV.1 : Configuration le système hybride étudié avec ASGE

IV.3. Le rôle de stockage dans une installation hybride PV/Diesel

L'utilisation des batteries dans les installations hybrides vise à répondre à quatre problématiques principales [IDD14]:

- 1- La récupération de la production d'énergie surplus par rapport à la demande du moment ;
- 2- La fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance ;
- 3- La fourniture d'énergie pour aplanir le pic de la demande ;
- 4- La fourniture d'énergie en cas de défaillance du diesel.

IV.3.1. Modélisation du système de stockage

L'expression de charge-décharge de la batterie plomb-acide est donnée par l'expression suivante [BOU14], [BEL11], [LAY14], [HAS10], [KAF15]:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + (P_{pv} - \frac{P_C(t)}{\eta_{Ond}}) \frac{\eta_{BAT}}{V_{bus}} \Delta t \quad (IV.1)$$

Où :

$P_C(t)$: Puissance demandée par la charge pendant un instant t ;

η_{BAT} : Rendement de charge-décharge de la batterie, égal à 1 pendant la charge et égale à 0.8 pendant la décharge.

Δt : Pas de simulation;

IV.4. Stratégie de l'algorithme de supervision et gestion d'énergie

En raison des nombreuses sources disponibles dans le système hybride (photovoltaïque, batteries et diesel), le système nécessite un système du bloc de gestion d'énergie qui maintient l'alimentation électrique si le système photovoltaïque ne peut continuer à fournir l'électricité nécessaire, ceci est fait avec l'utilisation correcte des batteries et si absolument nécessaire, par le diesel. À cause de l'utilisation intensive des batteries dans le système hybride, il est nécessaire de protéger ces dernières contre les dommages en ne permettant pas de dépasser les normes de l'état charge /décharge des batteries. Nous avons donc utilisé un système de supervision qui dépend de la condition de l'état de charge (SOC) où les batteries ne sont pas autorisées à dépasser l'état maximal de charge (SOC=100%) et l'état profond de décharge (SOC=30%). Pour réaliser la supervision et la gestion d'énergie, nous avons proposé un algorithme appelé algorithme de supervision et de gestion d'énergie, capable d'atteindre les points suivants:

- Éviter les décharges profondes des batteries.
- Éviter les surcharges de batteries.
- Assurer l'alimentation continue de l'installation en engageant le diesel.
- Calculer le temps de démarrage du diesel en respectant son temps de réponse et l'état de charge des batteries.
- Solliciter le maximum possible du système photovoltaïque-batteries.

IV.4. 1 Scénario stratégie de supervision et gestion d'énergie

La puissance du système PV à travers l'onduleur est mesurée par :

$$P_{RE}(t) = \eta_{Ond} \times P_{pv}(t) \quad (IV.2)$$

Où :

$P_{RE}(t)$: La puissance renouvelable.

Où η_{Ond} : Rendement de l'onduleur.

Le principe de scénarios charge /décharge des batteries est dépendent de l'état des $P_{RE}(t)$, SOC_{Min} (30%), SOC_{Max} (100%) et de la demande de puissance de la charge à l'heure t ($P_C(t)$).

- 1- Si la valeur de $P_{RE}(t) > P_C(t)$ et $SOC < 30\%$: fermer S_1 et la puissance $P_{Surplus}(t)$ restante sera utilisée en continu pour charger les batteries :

$$P_{BAT}(t) = P_{pv}(t) - \frac{P_C(t)}{\eta_{ond}} \quad (IV.3)$$

- 1.1 - Si la valeur de $P_{RE}(t) > P_C(t)$ et $30\% \leq SOC \leq 100\%$: ouvrir S_1 c-à-d débranchez les batteries.
- 1.2 – Si la valeur de $P_{RE}(t) = P_C(t)$ donc $P_{Surplus}(t) = 0$ et S_1 reste ouvert.
- 2- $P_{RE}(t) < P_C(t)$: La puissance restante sera fournie par le diesel et/ou les batteries selon la stratégie de répartition suivante:
 - 2.1- Si les batteries sont capables de compenser le manque d'énergie ($30\% \leq SOC \leq 100\%$); l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie ferme S_2 , et ouvre S_3 et S_4 .

Dans ce cas, la puissance des batteries peut être déterminée à partir de l'équation suivante:

$$P_{BAT}(t) = \frac{P_C(t)}{\eta_{ond}} - P_{pv}(t) \quad (IV.4)$$

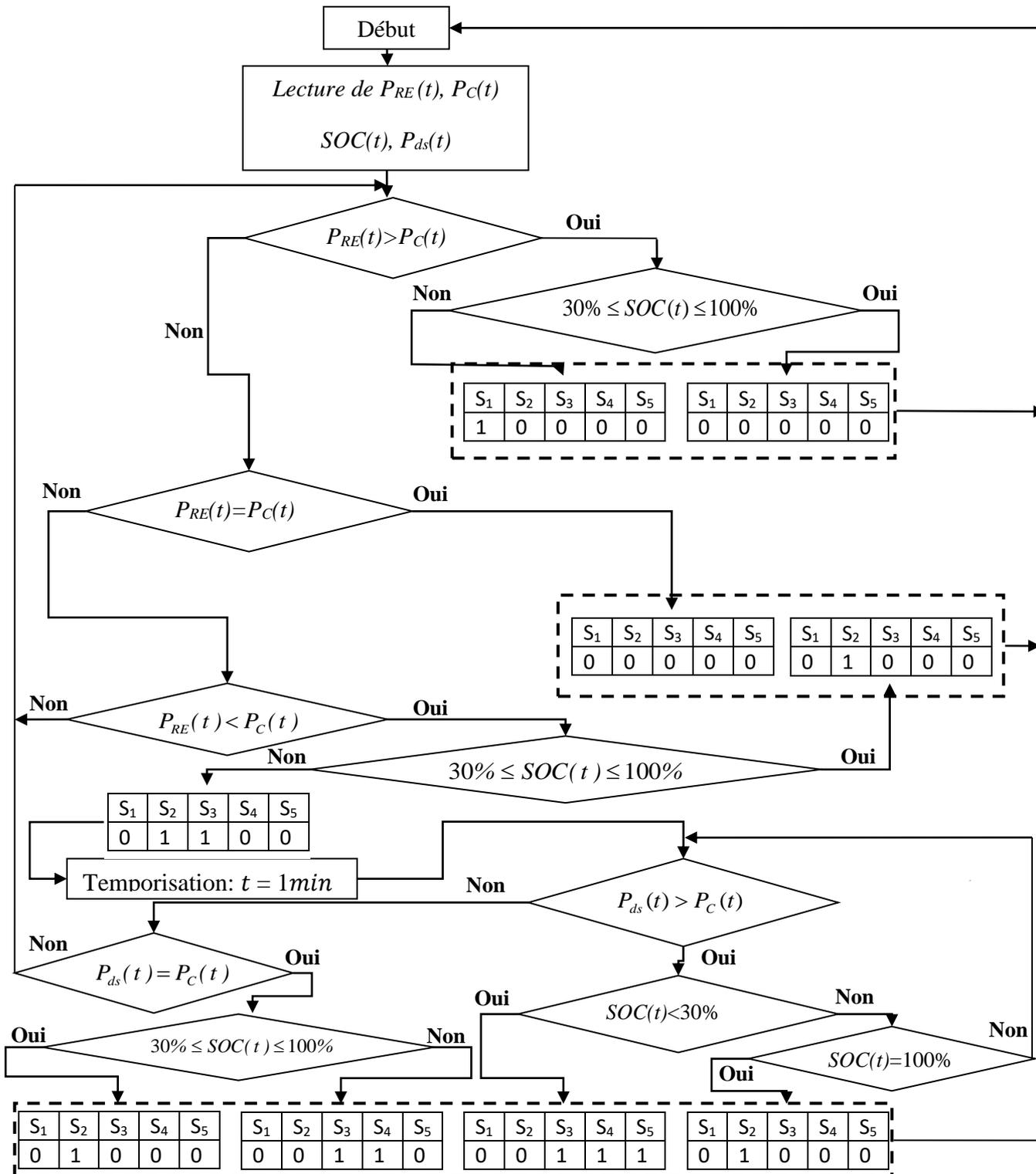
- 2.2- Si l'état de charge des batteries est $SOC(t) < 30\%$, l'algorithme de supervision et gestion d'énergie donne un ordre de ferme S_2 et S_3 (Temporisation $t=1$ min) puis si $P_{ds}(t) \geq P_C(t)$ et $SOC < 30\%$ fermer S_4 pour démarrer le diesel.

$$P_{GD}(t) = \frac{P_C(t)}{\eta_{ond}} - P_{pv}(t) \quad (IV.5)$$

Le but d'utilisation du diesel est d'alimenter la charge et de charger les batteries en même temps (S_5 est fermé si $P_{ds}(t) > P_C(t)$ et $SOC < 100\%$).

$$P_{BAT}(t) = P_{GD}(t) - \frac{P_C(t)}{\eta_{ond}} \quad (IV.6)$$

La figure IV.2 montre l'organigramme de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie.



A travers l'organigramme de supervision et de gestion d'énergie photovoltaïque–batteries–diesel nous pouvons résumer tous les cas de commande des interrupteurs (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5) dans le tableau suivant.

	Interrupteurs					Etat de charge des batteries	Puissances
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	SOC(%)	P_{PV}, P_C, P_{ds}
Cas 1	0	0	0	0	0	$30\% \leq SOC \leq 100\%$	$P_{RE} > P_C$
Cas 2	1	0	0	0	0	$SOC < 30\%$	$P_{RE} > P_C$
Cas 3	0	0	0	0	0	$30\% \leq SOC \leq 100\%$	$P_{RE} = P_C$
Cas 4	0	0	0	0	0	$SOC < 30\%$	$P_{RE} = P_C$
Cas 5	0	1	0	0	0	$30\% \leq SOC \leq 100\%$	$P_{RE} < P_C$
Cas 6	0	0	1	1	1	$SOC < 30\%$	$P_{RE} < P_C$ et $P_{ds} > P_C$
Cas 7	0	1	0	0	0	$SOC = 100\%$	$P_{RE} < P_C$ et $P_{ds} > P_C$
Cas 8	0	0	1	1	0	$SOC < 30\%$	$P_{RE} < P_C$ et $P_{ds} = P_C$
Cas 9	0	1	0	0	0	$30\% \leq SOC \leq 100\%$	$P_{RE} < P_C$ et $P_{ds} = P_C$

Tableau IV.1 : La commande des interrupteurs

IV.5. Résultats de simulation et discussions (Commande P&O)

La satisfaction permanente de la charge est assurée par le générateur photovoltaïque, le générateur diesel (GD) et les batteries. Le fonctionnement du diesel dépend exclusivement de l'état de charge/décharge des batteries. Ainsi, afin de contrôler le fonctionnement (marche/arrêt) du diesel, deux seuils (SOC_{max} et SOC_{min}) sont définis. Celui-ci permet de connaître toutes les puissances fournies par les générateurs, l'état de charge des batteries (SOC) à chaque pas d'échantillonnage pendant la journée. Notre système est simulé à deux scénarios par différents tests avec un profil de charge variable dans des conditions climatique fixe puis avec un profil de charge fixe dans des conditions d'irradiations variables.

- Teste 1 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O sans système de stockage.
- Teste 2 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage.
- Teste 3 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage et diesel en secours.

Dans cette section nous allons présenter les résultats de simulation par le logiciel MATLAB/SIMULINK pour les différentes catégories de tests.

IV.5. 1. Scénarios 1 : Profil de charge variable et condition climatique fixe

a- Test 1 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O sans système de stockage

La figure IV.3 montre l'évolution de la puissance électrique produite par le système photovoltaïque P_{pv} et la consigne puissance demandée par la charge P_C .

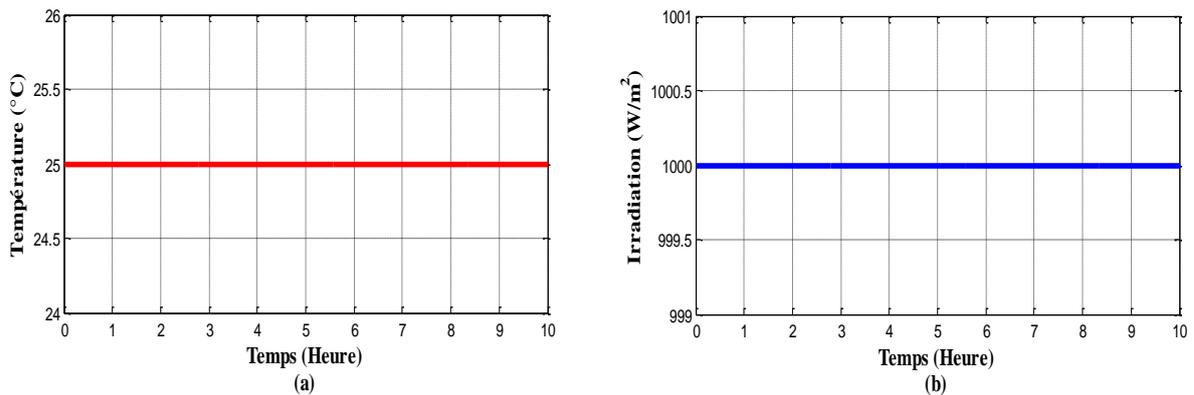


Figure IV.3 : Température et irradiation

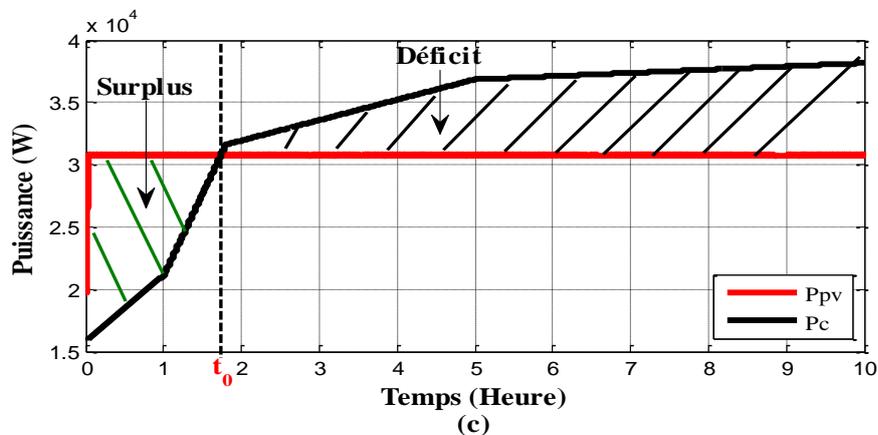


Figure IV.4 : Puissance électrique produite par le système PV

D'après la figure IV.4 nous pouvons dire que le système photovoltaïque de $t=0$ jusqu'à $t=t_0$ est en mesure de répondre à la demande de la charge et peut fournir un surplus d'énergie, mais de $t>t_0$, le système n'a pas pu fournir l'énergie nécessaire pour satisfaire la charge (Déficit).

b- Test 2 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage

La figure IV.5 illustre le comportement du système hybride après l'ajout d'un système de stockage (Batteries). Au début le système hybride alimente la charge par le système photovoltaïque, dans ce cas ($S_1=1$) et les batteries continuent à stocker l'énergie surplus jusqu'à $t=t_0$, après à $t=t_0$ la puissance photovoltaïque est inférieure à celle demandée par la charge donc ($S_2=1$) et les batteries commencent à fournir l'énergie jusqu'à la décharge profonde ($t=t_1$). A $t>t_1$ nous remarquons que le SOC < 30% donc ($S_2=0$) et en ce moment la charge n'est pas satisfaite.

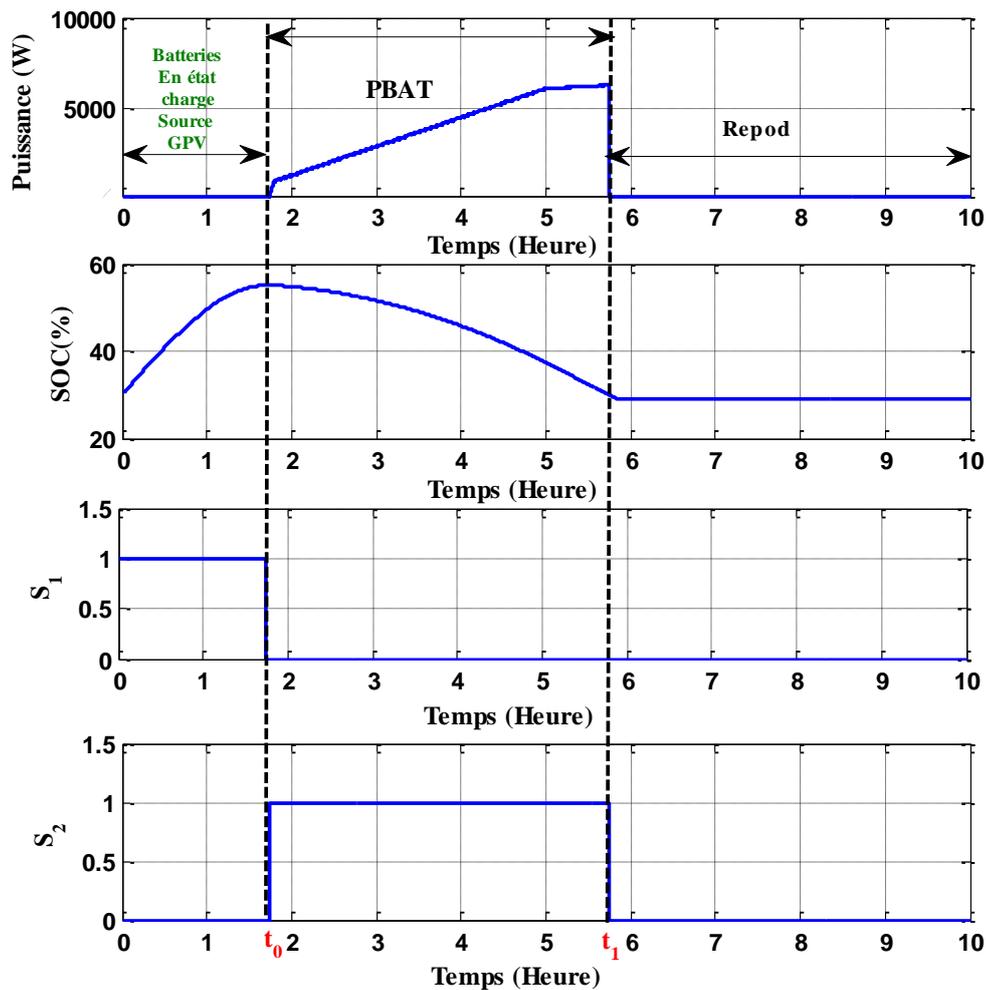


Figure IV.5 : Comportement des batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque

Les courbes de puissance de PV et des batteries sont représentées par la figure IV.6. Elle montre que la puissance fournie par les batteries compense le besoin d'énergie entre la période t_0 et t_1 .

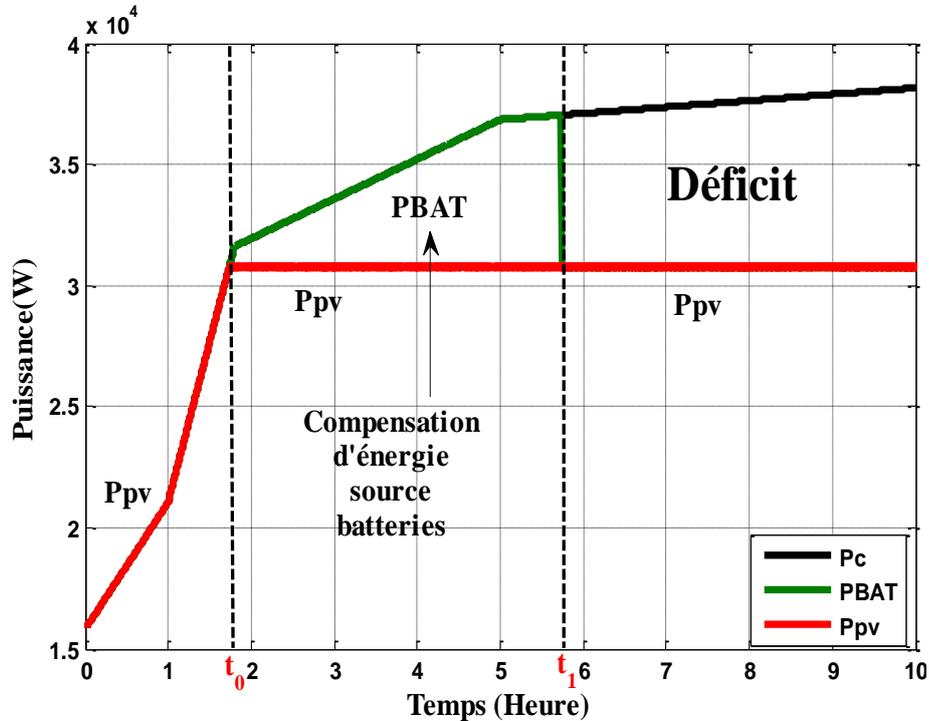


Figure IV.6 : Puissance électrique produite par le système PV-batteries

c- Test 3 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage et diesel en secours

Après avoir ajouté le système de stockage (batteries) et du diesel en secours, nous avons complété tous les éléments du système proposé. Dans ce cas, nous pouvons voir à quel point le bloc ASGE proposé est capable de superviser l'état charge/décharge des batteries et gérer les différentes sources d'énergie.

Les résultats de simulation présentée à la figure IV.7 illustrent les étapes de fonctionnement du système hybride proposé.

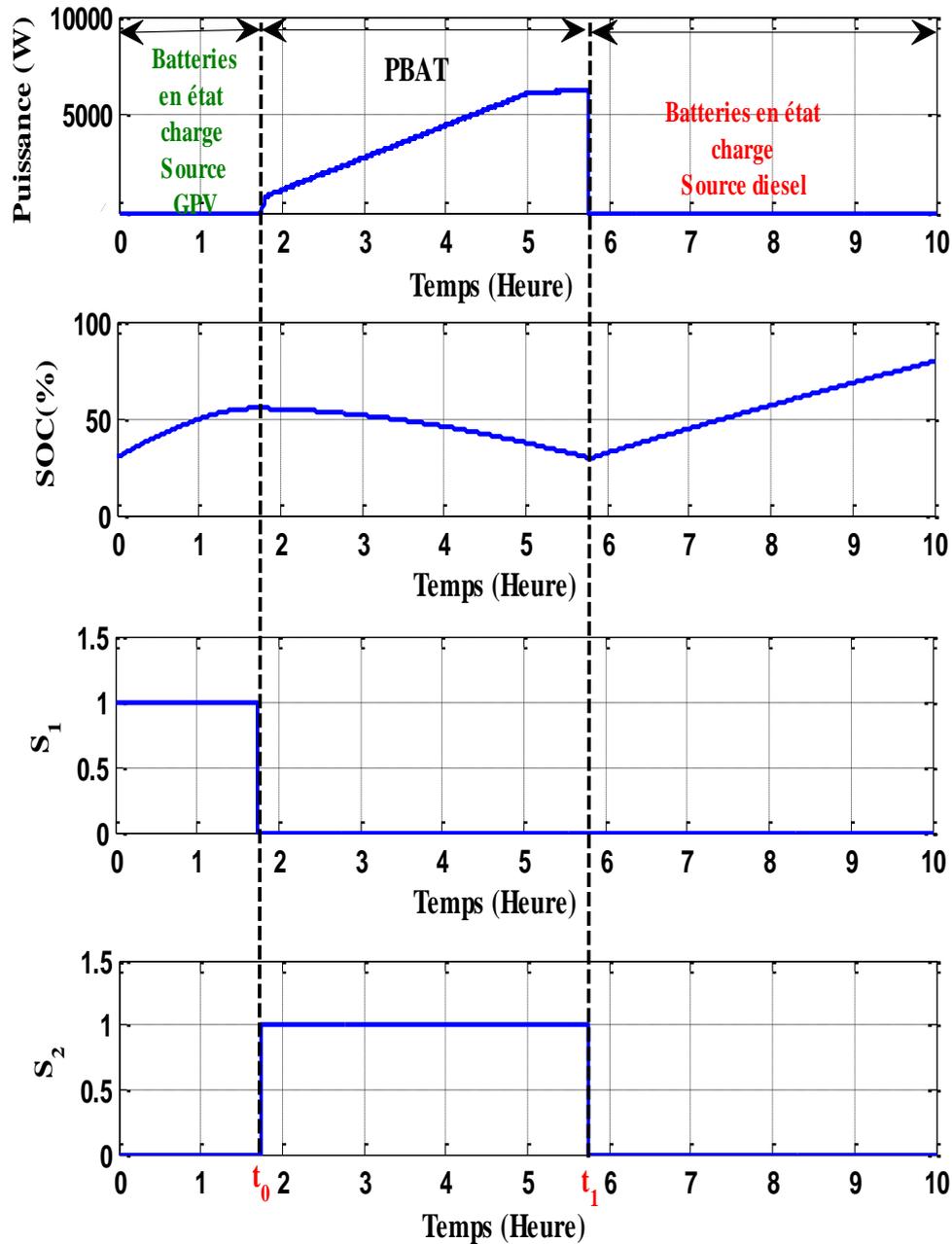


Figure IV.7 : Comportement des batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque-diesel

Entre la période de temps $t=0$ et $t=t_0$ nous observons que l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie a fermé l'interrupteur S_1 afin de permettre le transfert de l'énergie surplus vers les batteries, l'état de charge des batteries (SOC) augmente progressivement jusqu'à il atteigne un niveau (SOC=55%). Avec l'augmentation continue de la charge, nous remarquons entre la période $t=t_0$, $t=t_1$ que le système photovoltaïque est incapable de répondre au besoin d'énergie donc l'algorithme de supervision et de gestion ouvre S_1 et ferme S_2 pour compenser le manque d'énergie à l'aide des batteries.

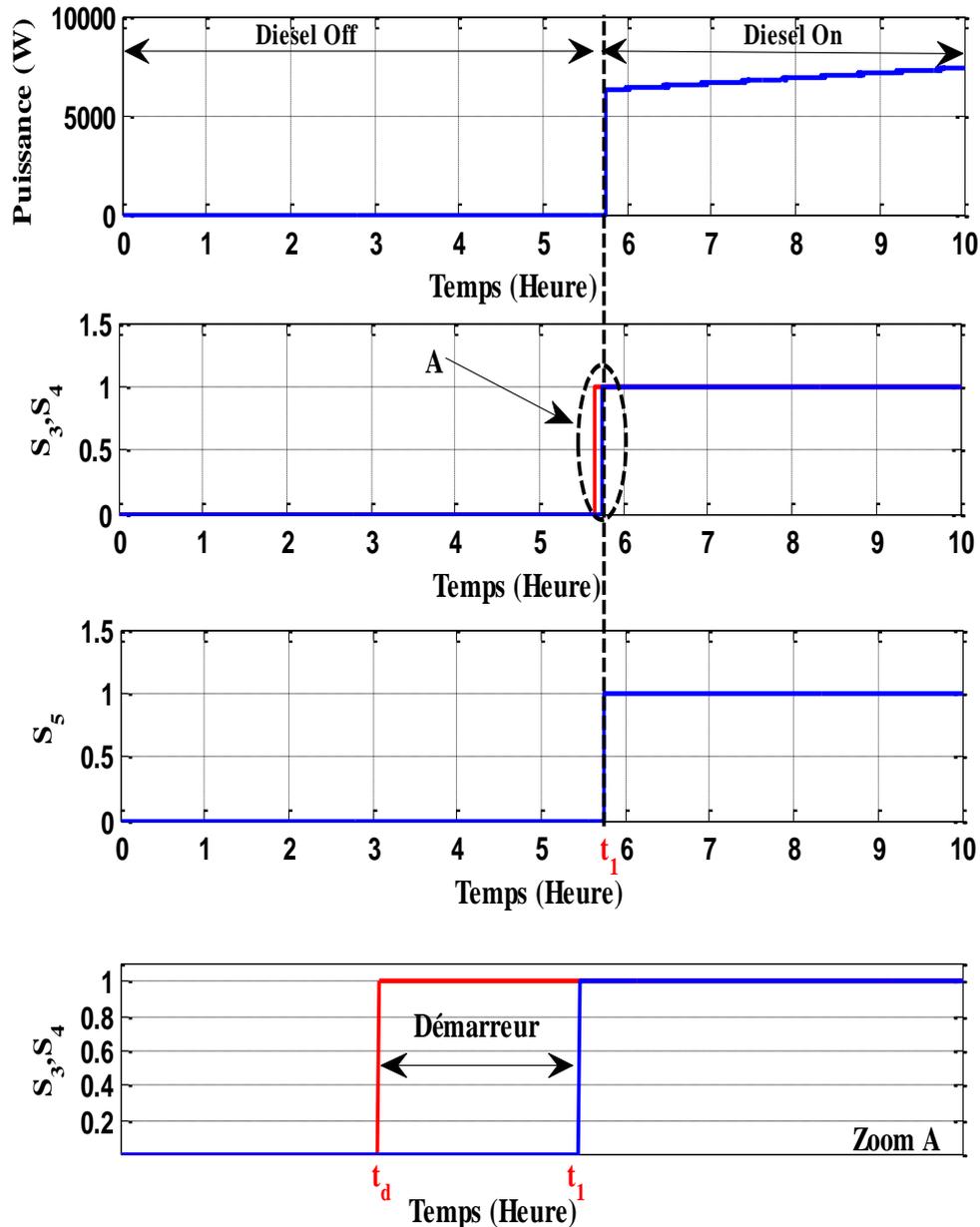


Figure IV.8 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs

La figure IV.8 montre que l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie ferme S_3 entre la période $t=t_d$ et $t= t_1$ pour mettre le démarreur du diesel en état « On » avant que les batteries n'atteignent le profond de décharge (SOC=30%).

Lorsque les batteries atteignent le profond de décharge, S_4 est fermé entre $t=t_1$ et $t=10$ h pour permettre le rôle du diesel à répondre au besoin d'énergie et $S_5=1$ pour transférer l'énergie surplus fournie par le diesel aux batteries, à ce moment l'état de charge des batteries (SOC) commence à augmenter progressivement jusqu'au niveau maximal 100%.

À ce niveau de l'état de charge l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie met $S_4=0$, $S_5=0$ et $S_2=1$ pour compenser l'énergie insuffisante à l'aide des batteries.

La figure IV.9 montre la bonne gestion de l'algorithme ASGE pour gérer le système hybride selon la priorité d'alimentation en énergie.

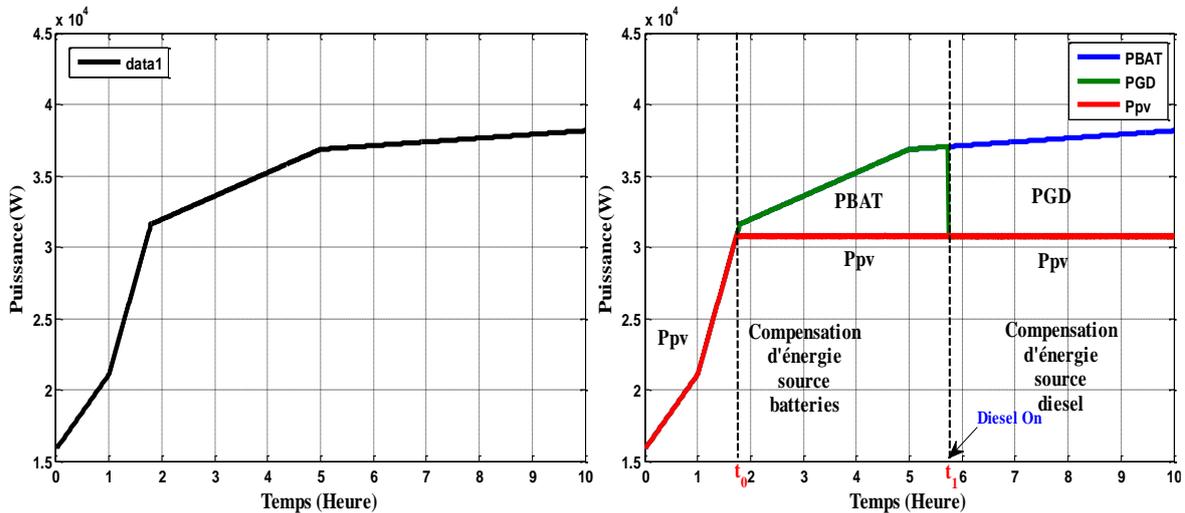


Figure IV.9 : Puissance électrique produite par le système PV-batteries-diesel

À partir des résultats de simulation de système PV-Diesel avec un système de stockage (batteries), il est facile de conclure que le fonctionnement du système de stockage permet de réduire l'état « On » du diesel.

IV.5. 2. Scénarios 2 : Profil de charge fixe dans des conditions climatiques variables

a- Test 1 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O sans système de stockage

La figure IV.10(a) montre que la température est variable et la figure IV.10(b) montre le changement d'irradiation tout au long de la journée où il passe de haut en bas, comme le montre la figure IV.10 (b). Le niveau initial est fixé à $G = 1000 \text{ W/m}^2$, à $t=t_{pv1}$ l'irradiation est soudainement abaissé à $G = 800 \text{ W/m}^2$ et à $t=5\text{h}$ elle est également diminué jusqu'à $G = 400 \text{ W / m}^2$.

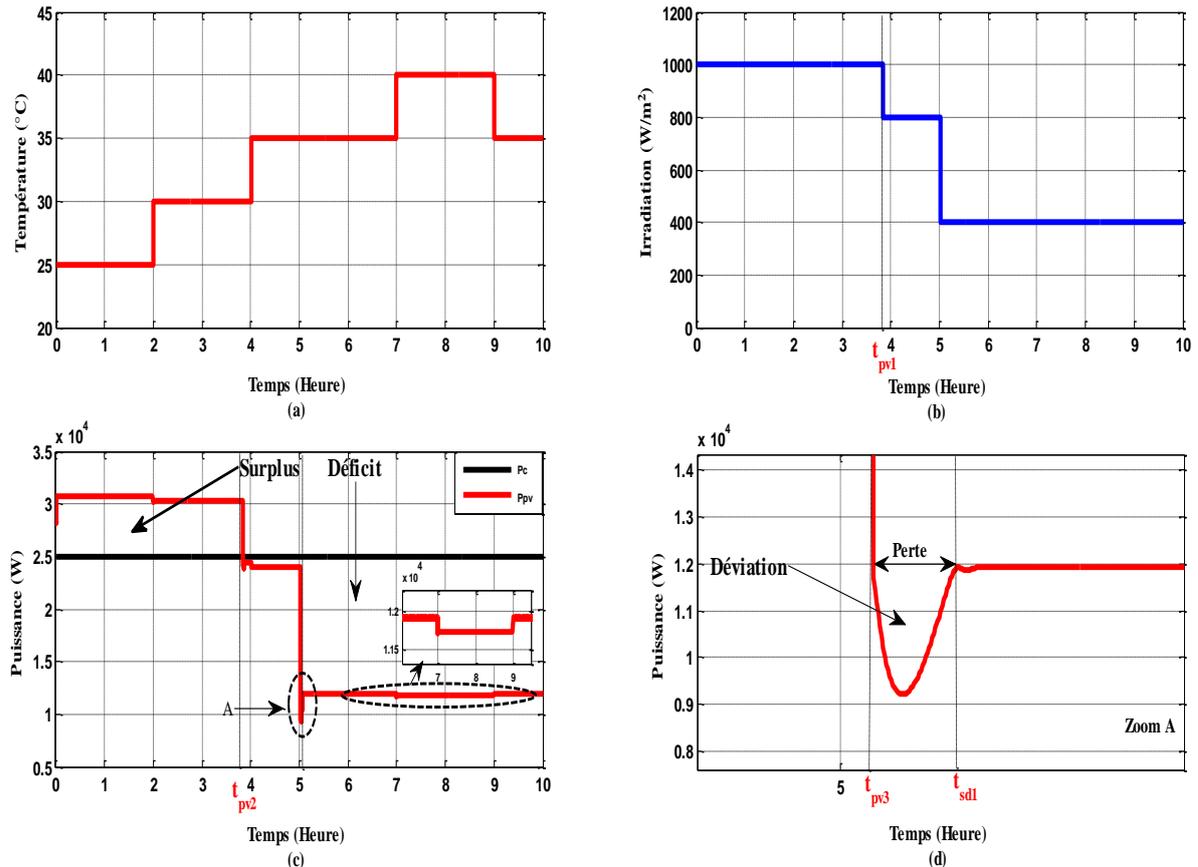


Figure IV.10 : (a) Température variable. (b) Irradiation variable. (c) Puissance électrique produite par le système PV

La figure IV.10(c) montre que dans la période $t \in [0, t_{pv2}]$ il y a un surplus d'énergie, le système photovoltaïque est donc capable d'alimenter la charge, mais dans la période $t \in [t_{pv2}, 10h]$, nous constatons qu'il y a un déficit d'énergie et cela est dû au changement climatique, donc le système photovoltaïque est incapable d'alimenter la charge. Nous remarquons également que lorsqu'il y a un changement soudain d'irradiation, la commande P&O perd le point de puissance maximale MPP et cela crée une perte d'énergie.

b- Test 2 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage

Les figures IV.11 et IV.12 montrent le fonctionnement de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie dans le système photovoltaïque - batteries lorsque la charge est constante et le climat change rapidement. On remarque à travers la figure IV.11 que l'état de SOC augmente progressivement entre la période de temps $t = 0$, $t = t_1$, et $S_1=1$ ce qui signifie que les batteries sont chargées à l'aide de la puissance surplus du PV. Dans

la période entre $t = t_1$ et $t = t_2$ nous observons une diminution de l'état SOC et $S_2=1$ ce qui indique que les batteries sont déchargées à cause d'un déficit de l'alimentation en énergie électrique par le système photovoltaïque. Dans la période entre $t = t_2$ et $t = 10h$, nous remarquons que l'état SOC reste constant à 29%, et ($S_1=0$, $S_2=0$) ce qui signifie que les batteries ne sont pas chargées ou déchargées et ce qui montre que le système photovoltaïque est toujours incapable de fournir le surplus ou le besoin de l'électricité à cause du changement climatique.

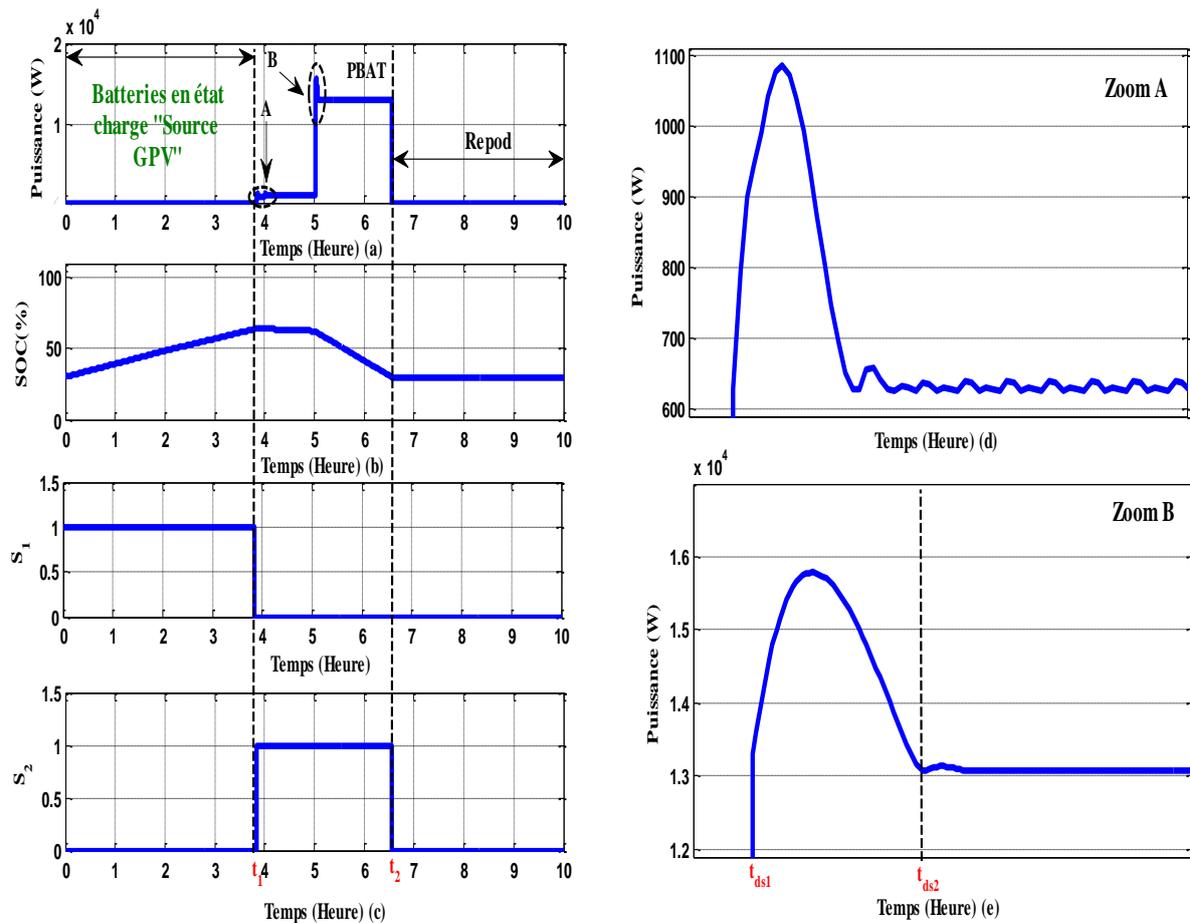


Figure IV.11 : Comportement des batteries avec algorithme de gestion dans le système photovoltaïque (25KW)

Dans la période entre $t = t_{ds1}$ et $t = t_{ds2}$, nous observons sur la figure IV.11(e) que les batteries fournissent une énergie apparue sous la forme de pic et cela pour compenser la perte d'énergie causée par la commande P&O en raison du changement rapide du rayonnement solaire.

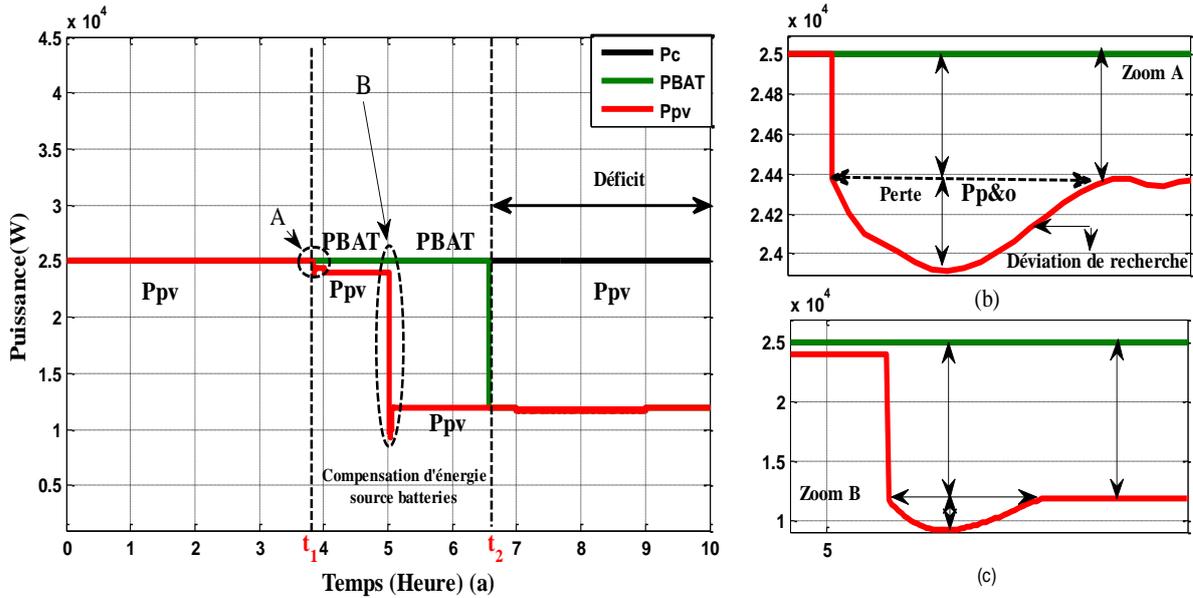


Figure IV.12 : Puissance électrique produite par le système PV-batteries (charge de 25KW)

Les figures IV.12(b) et IV.12(c) expliquent l'une des causes qui ont réduit la durée des batteries de manière à continuer à fournir l'énergie le plus longtemps possible. Le changement rapide du rayonnement solaire affecte la performance de la commande P&O, ce qui dans ce cas a causé une perte d'énergie due à la déviation du mode de recherche du MPP comme le montre le figure IV.12(b) et figure IV.12(c), cela nous amène à une conclusion (**Déviation de recherche MPP= Perte d'énergie = Accélération de la décharge des batteries**).

c- Test 3 : Système photovoltaïque contrôlé par la stratégie P&O avec système de stockage et diesel en secours

La figure ci-dessous montre le fonctionnement de l'algorithme de supervision et gestion d'énergie lorsque toutes les sources du système hybride sont complétées (photovoltaïque, batteries et diesel). À partir de la figure IV.11, nous remarquons une différence entre le système (photovoltaïque – batteries) et le système (photovoltaïque - batteries – diesel) en termes de continué à charger les batteries. Si nous comparons entre la figure IV.11 et IV.13 entre la période $t=t_2$ et $t=10h$ nous observons sur la figure IV.11 que le système photovoltaïque est incapable de charger les batteries, pour cette raison ces dernières sont en état de repos, mais sur la figure IV.13, nous remarquons que l'état SOC augmente, indiquant que les batteries sont chargées par le surplus du diesel.

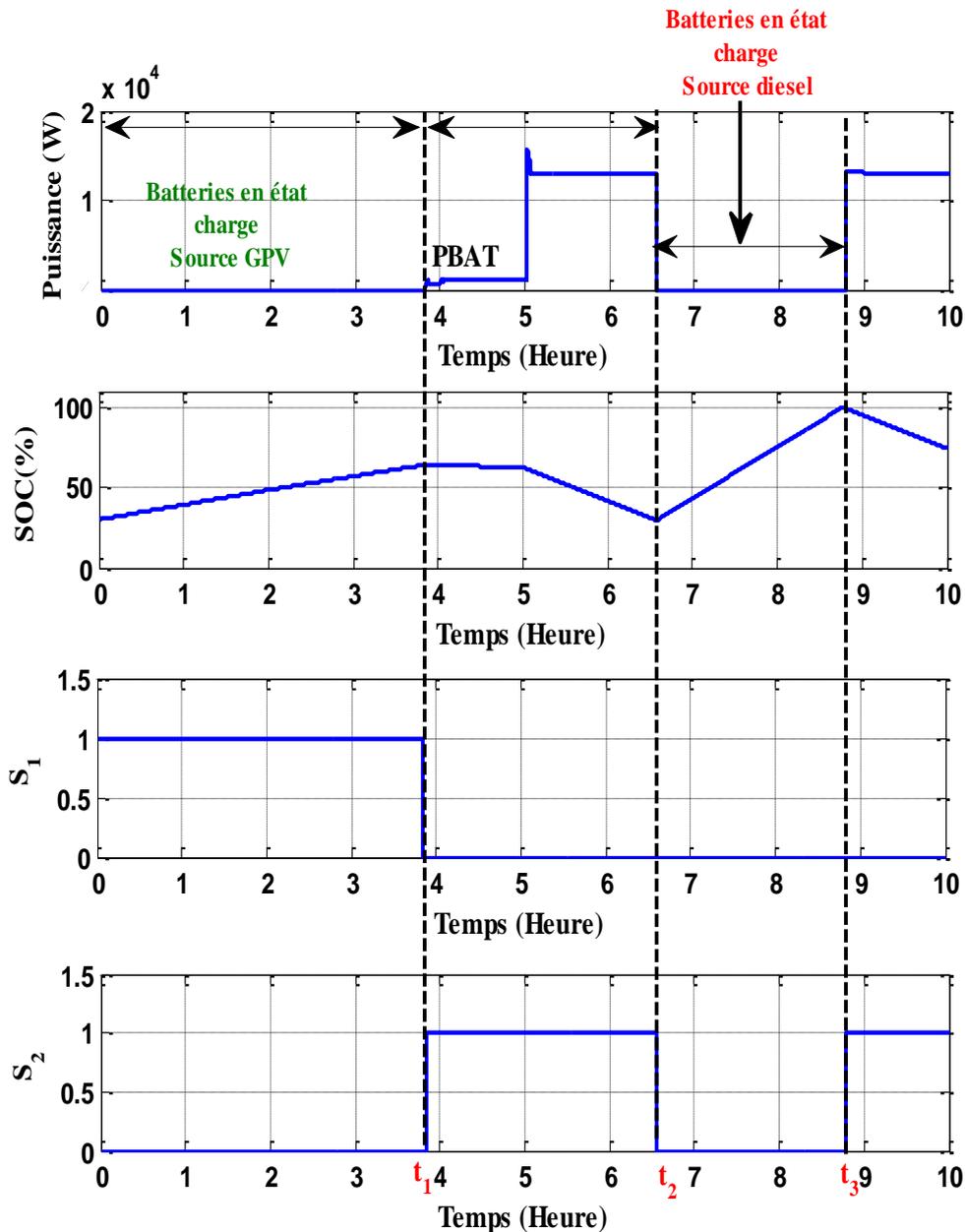


Figure IV.13 : Comportement des batteries avec algorithme de gestion dans le système photovoltaïque-diesel (25KW)

Après que les batteries atteignent le niveau SOC= 100%, nous notons sur la figure IV.13 entre la période $t = t_3$ et $t = 10h$ que l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie a donné l'ordre de fermer S_2 pour fournir l'énergie électrique par les batteries et dans la même période de temps nous observons à partir de la figure IV.14 que l'algorithme a donné l'ordre d'ouvrir S_4 pour arrêter le diesel.

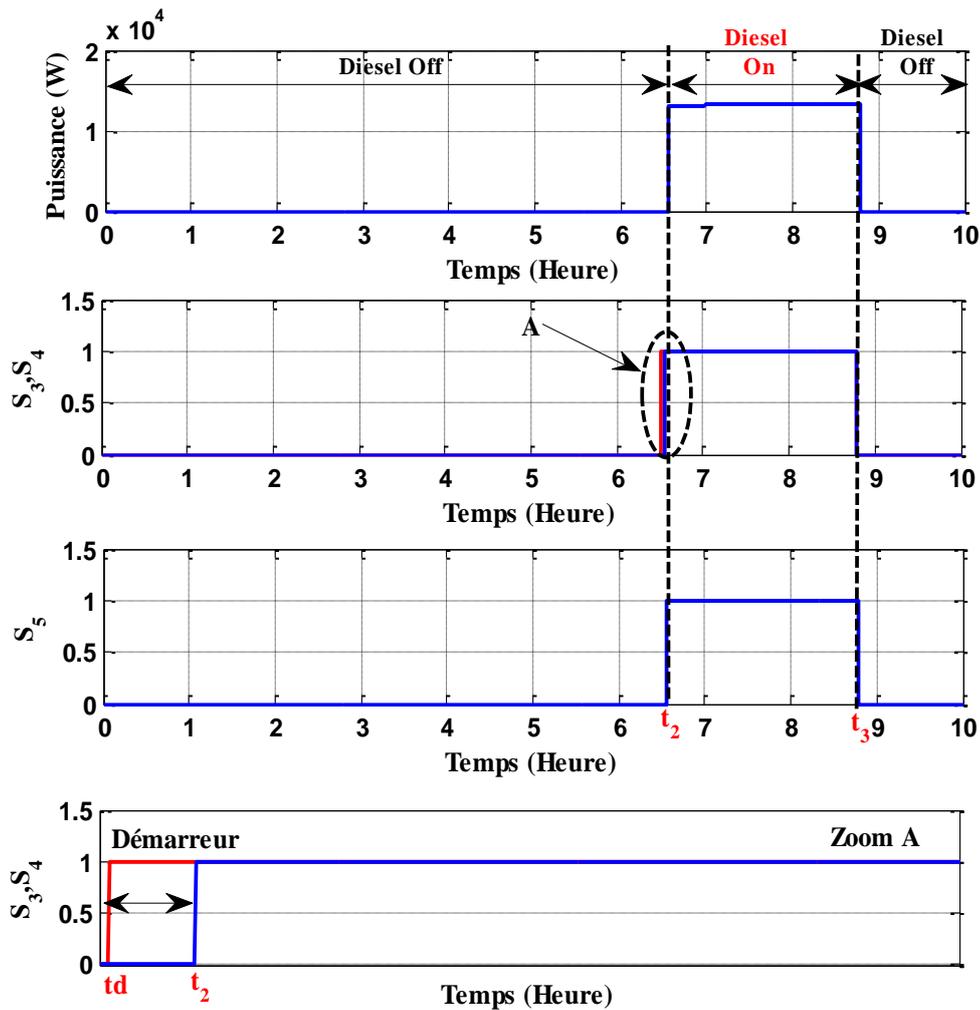


Figure IV.14 : L'état On/Off du diesel dans le système hybride (25KW)

La figure IV.15 montre que le système hybride par l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie est capable de fournir une alimentation sans interruption à la charge.

Notez que pendant la période entre $t = 0$ et $t = t_1$ le système photovoltaïque alimente la charge en énergie électrique mais après son déficit, nous remarquons que grâce aux batteries, la fourniture d'énergie propre continue jusqu'à $t = t_2$, mais une fois que cette dernière a atteint le niveau profond de décharge, le diesel a commencé à fournir l'électricité. A la figure IV.16, nous remarquons une perte d'énergie qui se produit à cause d'un changement rapide de l'irradiation solaire, ce qui provoque une augmentation soudaine de la décharge des batteries et donc accélérant ainsi le démarrage du diesel.

Le responsable de l'accélération de la décharge des batteries est la commande de P&O classique qui se trompe pour éviter le mode de recherche du point de puissance maximum MPP pendant le changement rapide du rayonnement solaire. Nous allons aborder ce problème dans la section suivante.

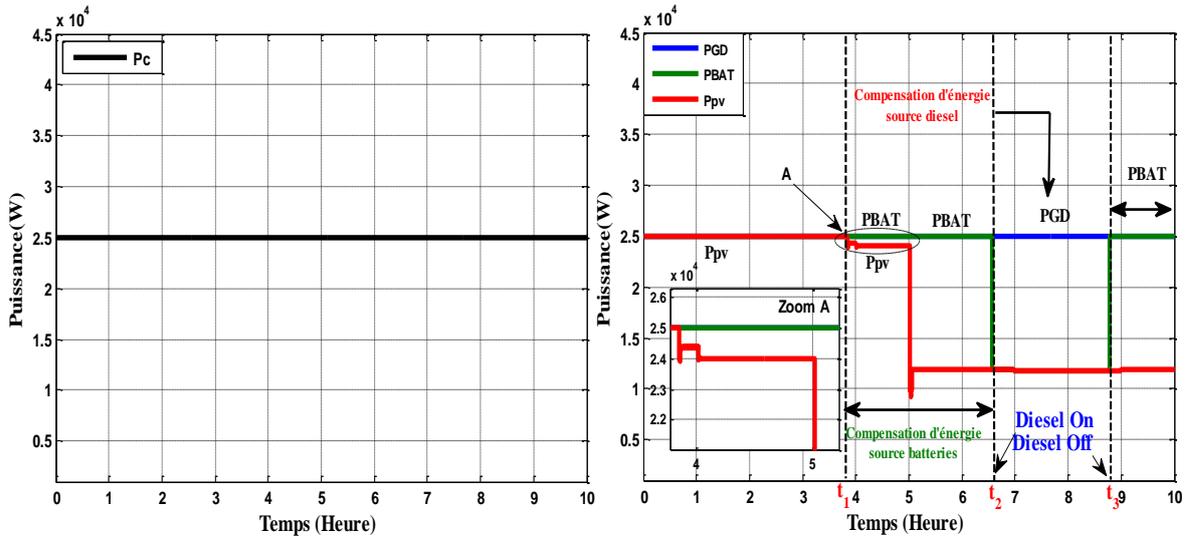


Figure IV.15 : Puissance électrique produite par le PV-batteries-diesel (charge 25KW)

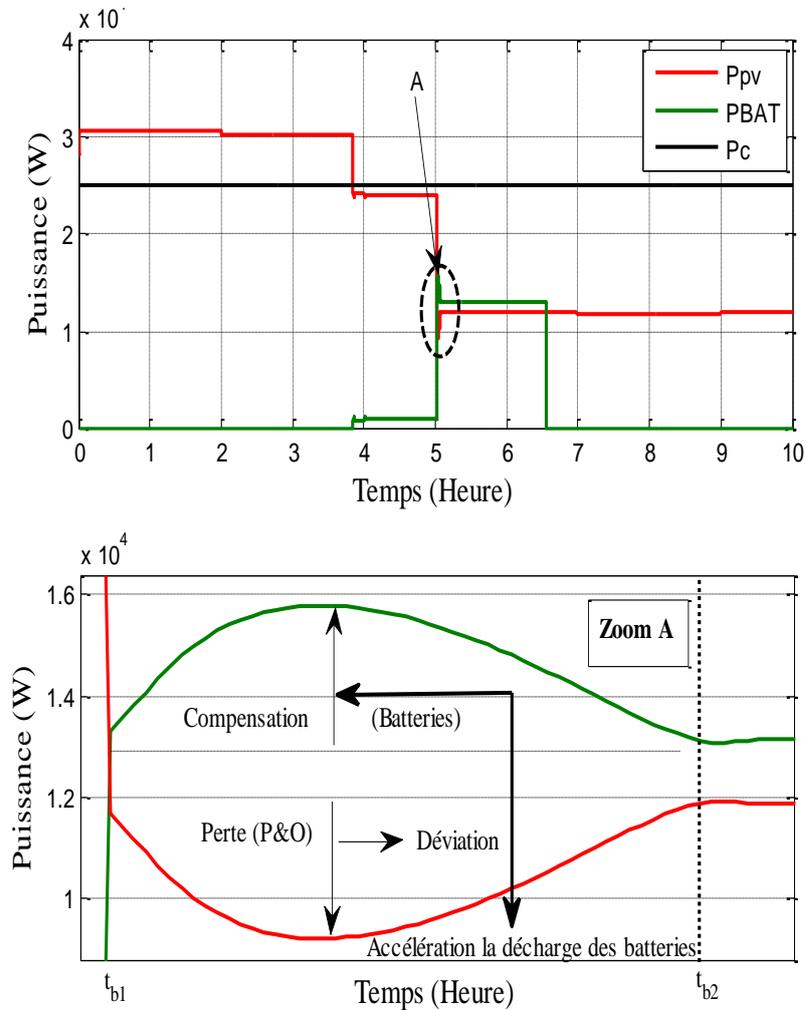


Figure IV.16 : Problème d'accélération de la décharge des batteries

IV.6. Élimination de déviation du mode recherche de la commande MPPT dans le système hybride photovoltaïque-diesel

Le système hybride photovoltaïque- diesel est un producteur de l'énergie électrique au profit d'un site à caractère social, technique ou économique, ce système permet de réduire les coûts d'investissement et diminuer l'effet de la pollution grâce à la gestion commutative entre le générateur photovoltaïque-batteries et le générateur diesel, mais ce système nécessite un adaptateur MPPT capable de minimiser les pertes de puissance.

Dans cette section, nous allons proposer la combinaison de la commande par logique floue avec la technique P&O-modifiée. Cette technique est proposée pour éliminer la déviation du mode recherche de MPP en cas d'un changement rapide de l'irradiation et aussi pour minimiser l'oscillation au tour de la puissance maximale.

IV.6.1 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 [CHN10]. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur $E(j)$ et le changement d'erreur $\Delta E(j)$ et la variable de sortie est la variation du rapport cyclique d . En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur $E(j)$ et le changement d'erreur $\Delta E(j)$ sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit [AIT07], [CHO15], [TAK11] :

$$E(j) = \frac{P_{pv}(j) - P_{pv}(j-1)}{V_{pv}(j) - V_{pv}(j-1)} \quad (IV.7)$$

$$\Delta E(j) = E(j) - E(j-1) \quad (IV.8)$$

Lorsque V_{pv} , P_{pv} sont respectivement la tension et la puissance PV à l'instant (j), la sortie du contrôleur (FLC) est défini comme suit:

$$d(j) = d(j-1) + \Delta d_F \quad (IV.9)$$

$E(j)$ indique si le point de fonctionnement à l'instant (j) est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale sur la caractéristique de tension-puissance où il est égal à zéro au point de puissance maximale (MPP), alors que le changement d'erreur ΔE exprime la direction de déplacement de ce point. Où $d(j)$ utilisé pour le suivi du point de puissance

maximale (MPP) en comparant avec la forme d'onde de la dent de scie pour générer un signal PWM pour le convertisseur DC-DC (boost).

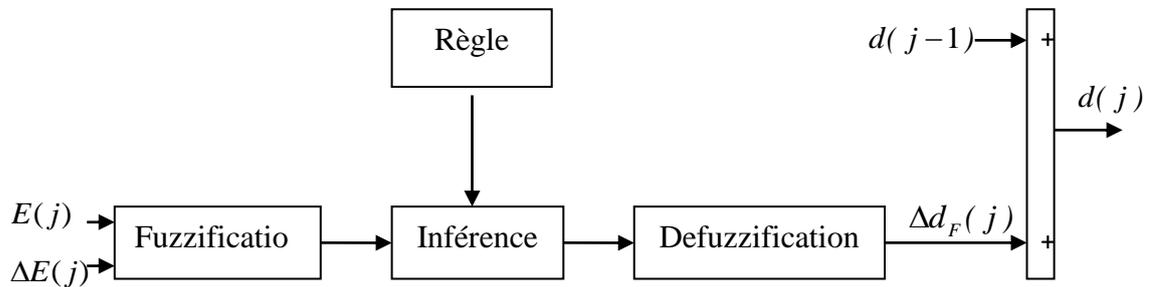


Figure IV.17 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques : NG (Négative Grand), NP (Négative Petit), Z (Zéro), PP (Positive Petit) et PG (Positive Grand) :

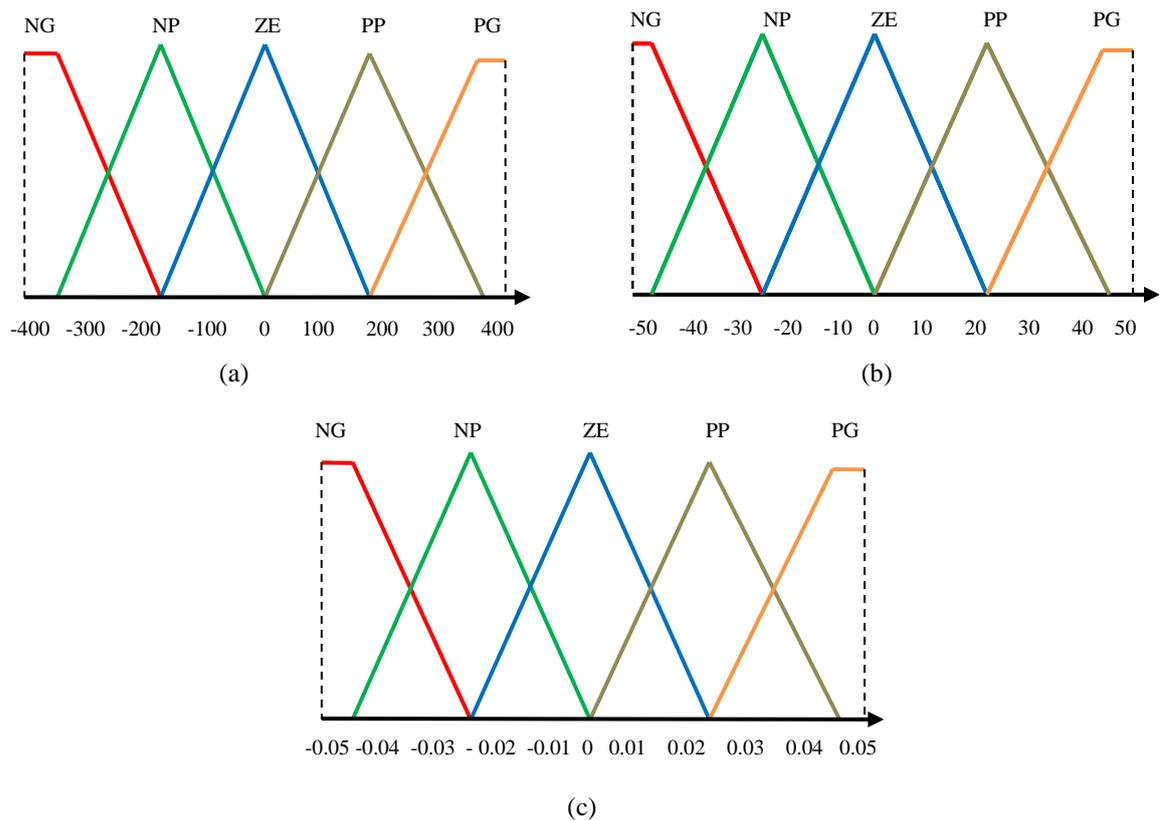


Figure IV.18 : Les sous-ensembles pour les entrées (a) $E(j)$, (b) $\Delta E(j)$ et la sortie (c) $d(j)$

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (Tableau IV.2). Finalement, en défuzzification, on convertit les sous ensembles flous de sortie en une valeur numérique.

ΔE E	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

Tableau IV.2 : Tableau de règles d'inférence

Dans cette section, nous allons proposer une combinaison de la commande de la logique floue (FLC) avec la stratégie de la commande P&O modifiée afin de réaliser les points suivants :

- 1- Éliminer la déviation du mode de recherche du MPP ;
- 2- Résoudre le problème d'accélération de la décharge des batteries ;
- 3- Prolonger l'état « Off » du diesel.

La réalisation de ces trois éléments rend notre système photovoltaïque-batteries-diesel fiable et respectueux de l'environnement.

La figure IV.19 et la figure IV.20 montrent respectivement l'organigramme et le modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme hybride proposé.

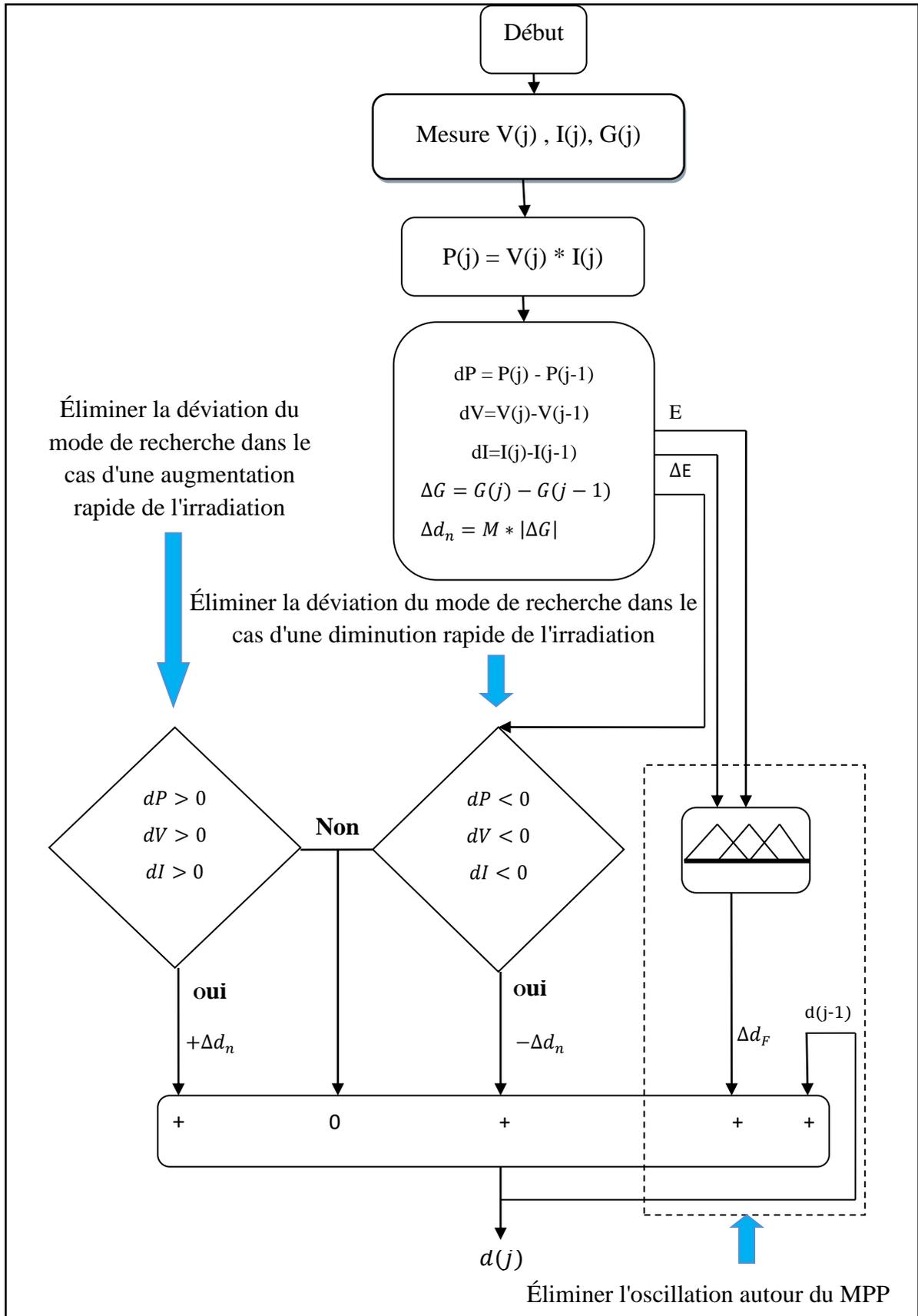


Figure IV.19 : Organigramme de l'algorithme FLC-P&O modifiée

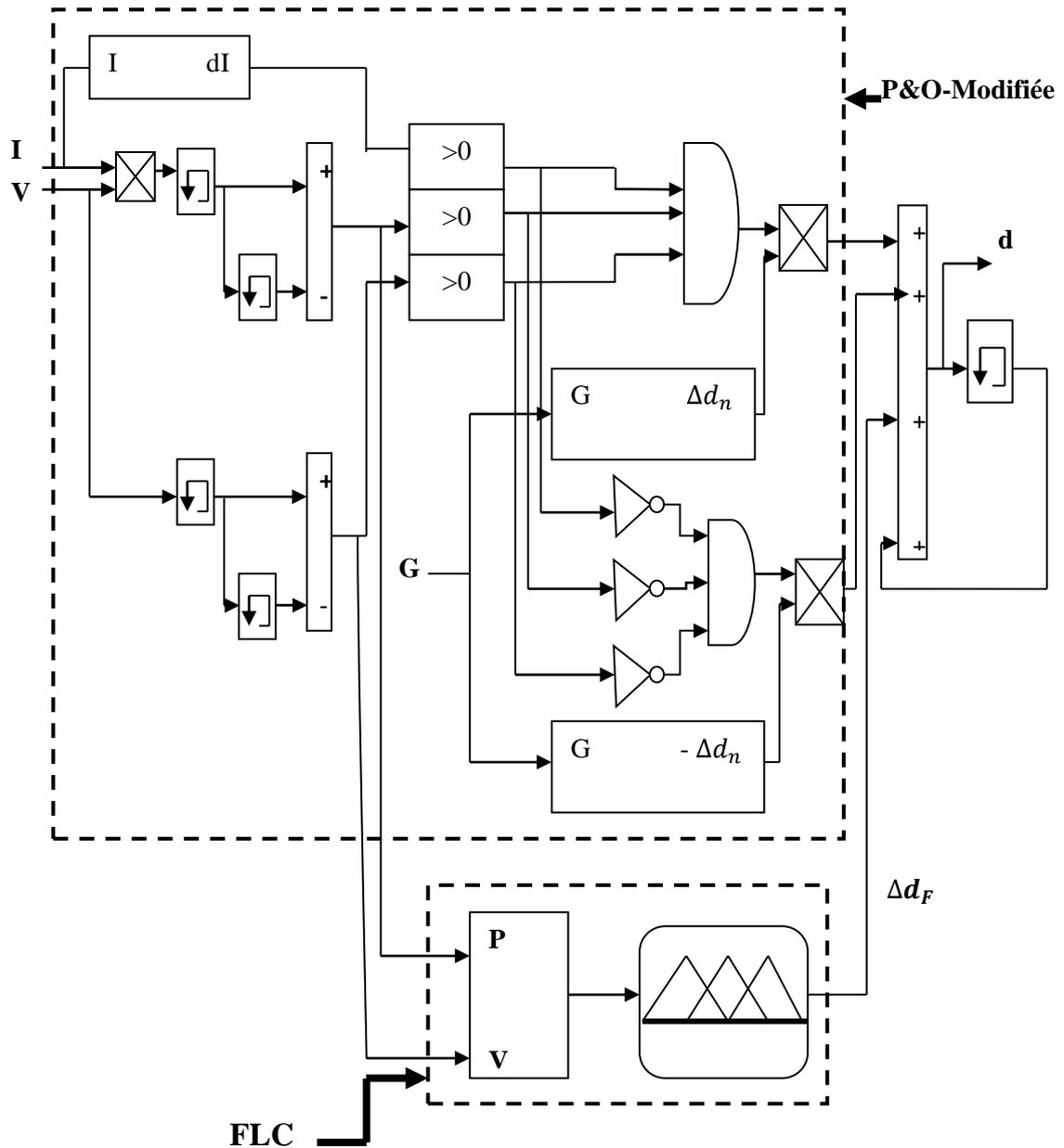


Figure IV.20 : Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme hybride proposé

IV.7. Simulation du system hybride PV-diesel par la commande FLC-P&O modifiée

Dans cette partie de la simulation, nous montrerons l'efficacité de la commande proposée de façon à minimiser, autant que possible, les problèmes que nous avons rencontrés précédemment.

La figure IV.21 illustre les résultats de simulations du système photovoltaïque avec la commande hybride proposé dans les conditions climatiques variables et charge fixe.

IV.7.1. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système photovoltaïque

La figure IV.21 montre l'efficacité de la commande proposée (FLC-P&O modifiée) à résoudre le problème de la perte d'énergie, ceci est clairement observé au zoom A et zoom B.

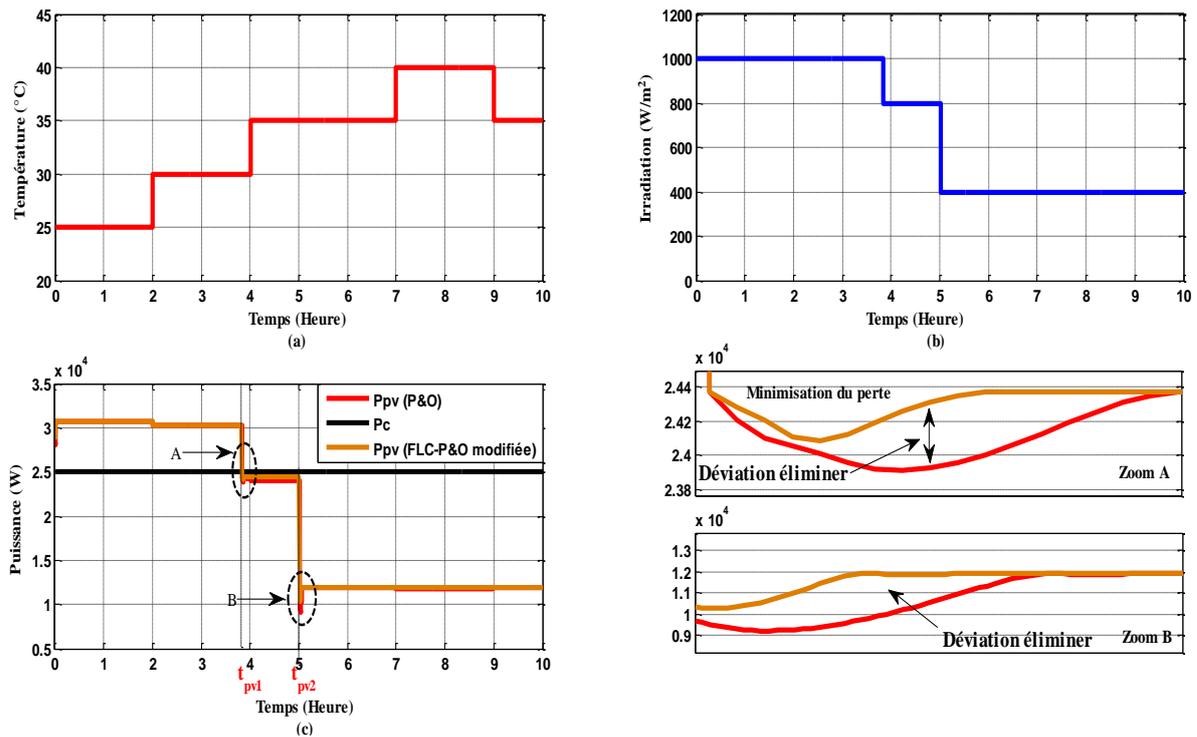


Figure IV.21 : Élimination la déviation du mode de recherche de MPP

IV.7.2. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système photovoltaïque-batteries

Après avoir ajouté les batteries au système soutenu par la commande FLC-P&O modifiée, nous remarquons après la figure IV.22(e) que les batteries ont diminué leur alimentation dans les périodes que nous avons mentionnées plus tôt, et ceci après que nous ayons traité le problème de déviation du mode de recherche du point de puissance maximale (MPP).

Les figures IV.22(f) et IV.22(g) montrent que l'état de charge des batteries dans le système photovoltaïque-batteries commandé par (FLC-P&O modifiée) est meilleur que celui de l'ancienne commande (P&O) et ceci est clairement montré à la figure IV.22(h).

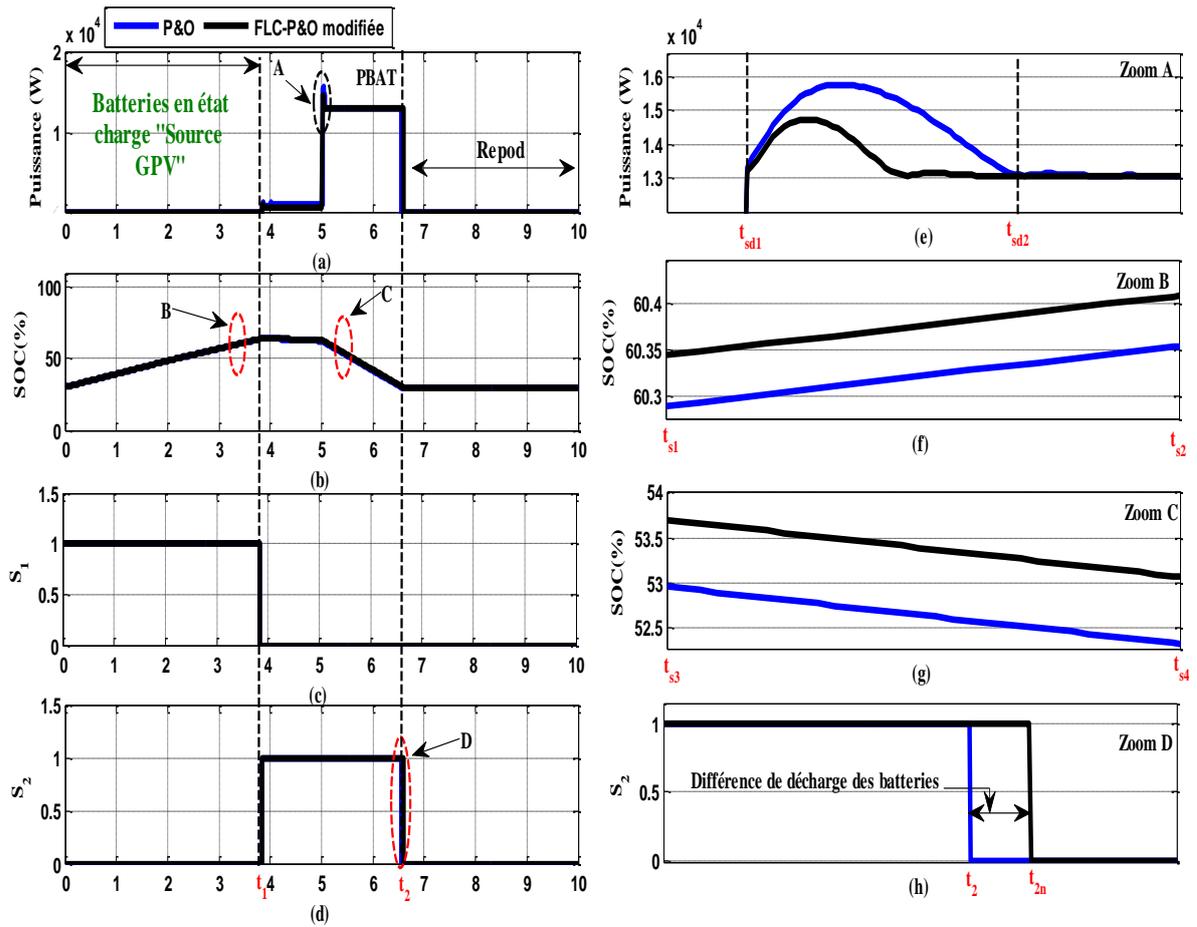


Figure IV.22 : Comportement des batteries avec ASGE dans le système photovoltaïque contrôlé par FLC-P&O modifiée

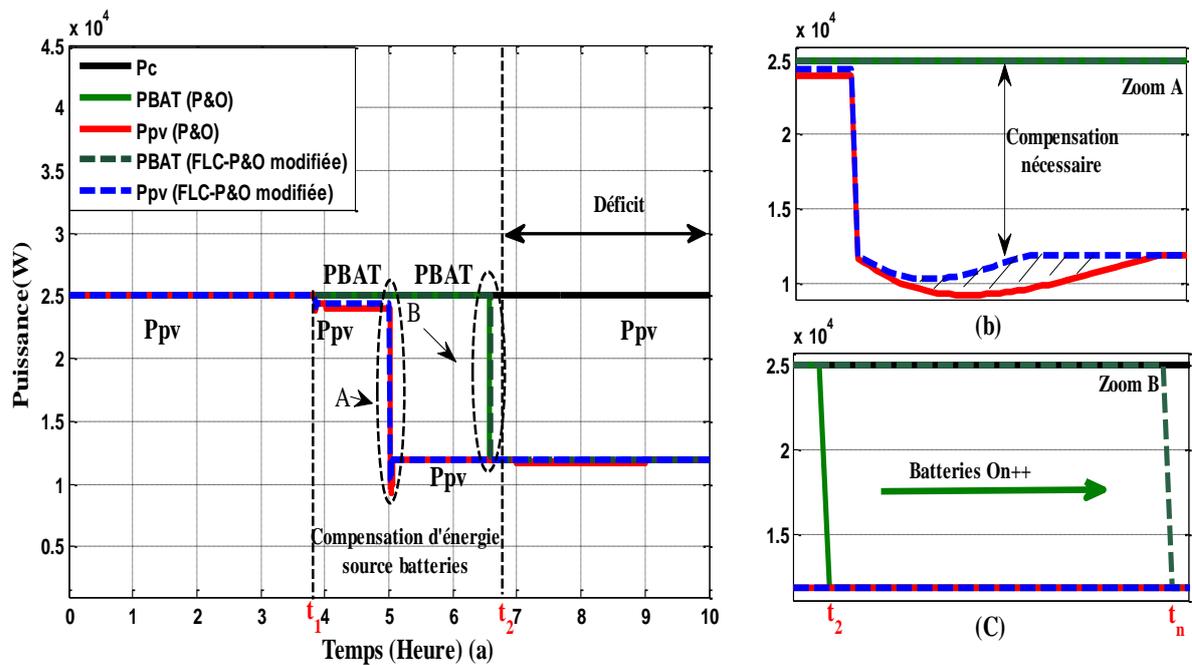


Figure IV.23 : Le système hybride avec PV contrôlé par la commande FLC-P&O modifiée

Nous avons vu auparavant que le système est incapable de répondre à l'énergie au moment t_2 mais une fois que nous avons soumis le système photovoltaïque au contrôle proposé, nous avons vu que l'alimentation en énergie a augmenté jusqu'au t_n , et ceci est illustré en figure IV.23(c).

IV.7.3. Influence de la commande FLC-P&O modifiée sur le système photovoltaïque-batteries-diesel

La figure IV.24 illustre l'efficacité de la commande proposé (FLC-P&O modifiée) dans le système comme un moyen d'éliminer le phénomène de perte d'énergie lorsqu'il y a un changement rapide du rayonnement solaire. L'élimination du phénomène de perte d'énergie (montré dans les zooms A et B dans les périodes $t \in [t_{sd1}, t_{sd2}]$ et $t \in [t_{sd3}, t_{sd4}]$) entraîne une augmentation de l'extension de décharge des batteries.

L'extension de décharge des batteries permet à l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie de retarder l'état marche du diesel durée ($t_{d2}-t_{d1}$) et ceci est illustré à la figure IV.24 (b) (Zoom D).

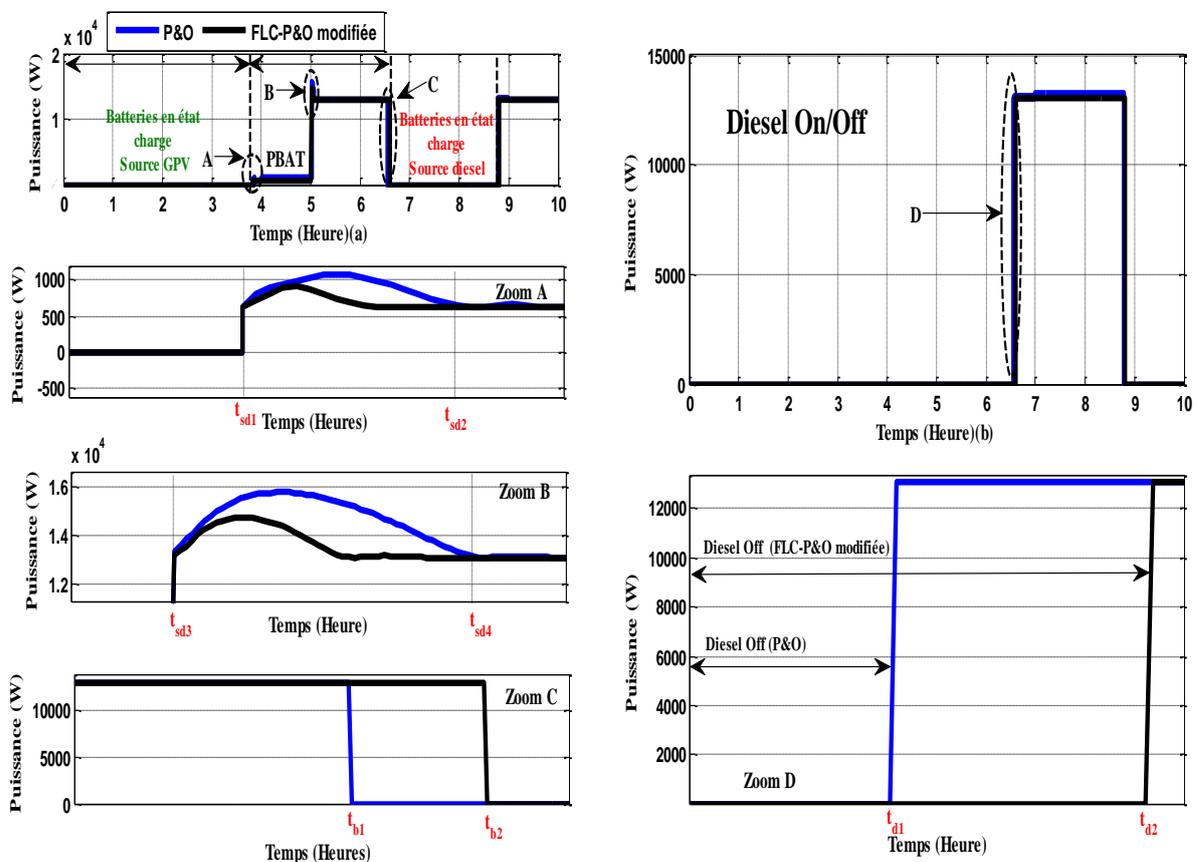


Figure IV.24 : Charge/décharge des batteries et l'état Off du diesel

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une simulation pour le pilotage d'une installation hybride photovoltaïque-diesel. L'installation comporte un générateur photovoltaïque, batteries et un générateur diesel. Au début nous avons proposé un algorithme de supervision et de gestion d'énergie pour couvrir les besoins énergétiques de l'installation en cas de manque ou d'absence de l'énergie photovoltaïque.

Puisque le but est d'utiliser au maximum l'énergie photovoltaïque disponible, nous avons soutenu le système avec une unité de stockage (batteries) pour allonger l'avantage de l'énergie propre, mais puisque le système photovoltaïque-batteries à certains moments de la journée, ne fournissait pas l'énergie nécessaire à la charge (déficit), il était nécessaire d'ajouter un générateur diesel au système, mais avec un temps de marche minimal.

Nous avons soumis le système à plusieurs tests en présence de la commande P&O. Dans tous ces tests, nous avons remarqué le problème de la déviation du mode de recherche du point maximum (MPP) en cas d'un changement rapide du rayonnement solaire, ce qui a causé un problème d'accélération de la décharge des batteries et donc une augmentation du temps de l'état marche du diesel.

Afin de contribuer à résoudre ces problèmes, on a proposé une commande FLC-P&O modifiée qui a donné des résultats satisfaisants, de prolonger l'alimentation du système PV-batteries et réduire l'état « On » du diesel.

Les courbes de simulation confirment aussi l'efficacité attendue de l'algorithme de supervision et gestion d'énergie: la sécurité des batteries, l'alimentation sans interruption de la charge et l'exploitation optimale du système photovoltaïque.

Conclusion générale

La demande croissante d'électricité dans le monde et le risque accru d'émissions de dioxyde de carbone dues à l'utilisation du pétrole a poussé les experts et les chercheurs à trouver des énergies alternatives qui répondent aux besoins des consommateurs tout en étant respectueux de l'environnement. Parmi les énergies alternatives qui sont très fiables à notre époque il y a les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages et parce que cette énergie est affectée par plusieurs facteurs tels que la température et le rayonnement solaire, plusieurs recherches ont été faites afin d'éviter les fluctuations de l'alimentation en énergie.

Dans cette thèse, nous avons donné des solutions pour soutenir le système photovoltaïque tout en étant incapables de fournir de l'électricité dans deux cas, d'abord en cas de changements climatiques et en particulier lorsque le rayonnement solaire change rapidement et en cas de l'augmentation de charge.

Afin d'améliorer le rendement du système photovoltaïque à extraire la valeur maximale de la puissance, il existe plusieurs méthodes présentées dans la littérature, nous avons présenté certaines d'entre elles dans le premier chapitre. Plusieurs recherches ont montré que la méthode la plus simple, la moins coûteuse et la plus efficace est la méthode « Perturbe & Observe », mais non satisfaits de cette méthode classique, nous lui avons ajoutée une amélioration qui a augmenté son efficacité quand le rayonnement solaire change rapidement.

Malgré les efforts illimités pour améliorer ce système à bien des égards, il reste incapable de fournir une énergie suffisante au consommateur, ce déficit a poussé certains à le relier à d'autres énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, mais à notre avis cela ne suffit pas car il y a aussi l'impact du vent qui affecte négativement notre confiance, dans ce cas, nous avons décidé de connecter le système photovoltaïque au diesel.

Dans cette thèse, nous avons présenté un système hybride combinant le système photovoltaïque avec le groupe diesel pour assurer l'alimentation en l'électricité sans interruption.

Les grandes lignes de notre travail ont été de trouver une solution pour minimiser l'état marche du diesel. Pour réduire l'état « On » du diesel, il était nécessaire d'ajouter un système de stockage où nous avons choisi des batteries.

Pour prolonger l'utilisation des batteries et fournir aux clients de l'énergie électrique et pour éviter le problème d'accélération de la décharge de cette dernière en raison du changement rapide du rayonnement solaire, nous avons proposé deux niveaux d'optimisation, le premier concernant le système photovoltaïque, nous avons proposé une commande de poursuite du point de puissance maximale en combinant la commande P&O modifiée proposée et la commande de la logique floue (FLC). Le grand avantage de cette combinaison est que notre contrôleur atteint rapidement le point de fonctionnement optimal et élimine le mode de recherche dans les conditions des variations soudaines d'irradiation, on peut dire que la stratégie de contrôle proposée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de la maîtrise des systèmes photovoltaïques-batteries-diesel. Dans le deuxième niveau d'optimisation, nous avons proposé un superviseur de la gestion de l'énergie, non seulement pour fournir de l'énergie électrique mais aussi pour prolonger la durée de vie des batteries en limitant son taux de charge/décharge.

A la fin de cette thèse, on peut conclure que la technique de la commande FLC-P&O modifiée et l'algorithme de supervision et gestion d'énergie proposés sont considérés comme une solution très efficace pour réduire l'état marche d'un diesel connecté dans un système hybride photovoltaïque-batteries.

Les travaux abordés dans cette thèse sont très encourageants et nous motivent de plus en plus à continuer dans ce même axe de recherche. En perspective, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- Mise en pratique de la stratégie de la commande proposée dans le système photovoltaïque.
- l'algorithme de supervision peut être amélioré en adoptant d'autres techniques non conventionnelles telles que les réseaux de neurones, la logique floue afin d'optimiser davantage la gestion énergétique du système.
- Implémentation pratique de l'algorithme de contrôle, supervision et gestion d'énergie.

Bibliographie

- [**ABB12**] D. Abbes, “Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2012.
- [**ABB13**] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid, “Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque”, Conference International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering, Sousse, Tunisie – 2013.
- [**AIR05**] J. Joe-Air, H. Tsong-Liang, H. Ying-Tung, Chia-Hong Chen, “Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems”, Tamkang J. Sci. Eng. Vol. 8, no.2, 2005, pp: 147–153.
- [**AIT07**] M.S. Aït Cheikh, C. Larbes†, G.F Tchoketch Kebir and A. Zerguerras, “Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N0.3, pp. 387-395, 2007.
- [**ARO13**] A. B. Arostegi, “New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency”, Thèse Doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2013.
- [**ATR05**] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, “Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments”, Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005, vol. 3, pp. 1773–1777.
- [**BED14**] Z. Beddiaf “Etude de l'activité électronique des joints de grains dans le silicium polycristallin destiné à des applications photovoltaïques”. Thèse de doctorat, Université badji mokhtar, Annaba, 2014.
- [**BEL11**] R. Belfkira, L. Zhang, G. Barakat, “Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit, Solar Energy, Vol. 85, pp. 100-110, 2011.
- [**BEL15**] A. Belkaid, “Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome”, thèse de doctorat, 2015, Université ferhat abbas – setif.
- [**BEL15c**] **A. Belhadj djilali**, B. Hemici, A. Yahdou, “Study of converter DC/DC and DC/AC in a production line photovoltaic-Network”, 2^{ème} Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, l'Electronique, l'Automatique et la Maintenance, ENP d'Oran, 24-25 Novembre 2015.
- [**BEL17a**] **A. Belhadj djilali**, B. Hemici, A. Yahdou, “Eliminating search mode deviation of maximum power point tracking in photovoltaic system control by using modified perturb and observe technique”, The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 13, No. 2, pp. 758-766, Avril 2017.
- [**BEL17b**] **A. Belhadj djilali**, B. Hemici, A. Yahdou, “Modified perturb and observe MPPT control for avoid deviation in photovoltaic systems”, Journal of Electrical Engineering, VOL.17, No.1, pp.1-10, 2017.

- [BEN17] N. Benalouache, “L’énergie solaire pour la production d’électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d’échelles”, Thèse Doctorat de l’université de Sfax 2017. Français.
- [BHA13] A. P. Bhatnagar, B. R. K. Nema, “Conventional and global maximum power point tracking techniques in photovoltaic applications: A review”, *J. Renew. Sustainable Energy* 5, 032701, pp. 1-23, 2013.
- [BOE68] A. F. Boehinger, “Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1968, pp. 102-111.
- [BOU14] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, E.M. Berkouk, S. Diaf , H. Belmili “Conception et réalisation d’un logiciel de dimensionnement d’un système d’énergie hybride éolien-photovoltaïque ”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol.17, N0.3, pp.359-376, 2014.
- [BOY06] A.Boyette “contrôle – commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ”, Thèse de doctorat de l’université Henry Poincaré, Nancy I,decembre 2006.
- [CHA96] L. Chancelier, E. Laurent, L’électricité Photovoltaïque, l’impression Dumas, paris France, 1996
- [CHN10] Y.H. Chang , C.Y.Chang, “A Maximum Power Point Tracking of PV System by Scaling Fuzzy Control”, *Proceeding of the international multi conference of engineers and computer scientists 2010 vol II*, March 17-19, Hong Kong.
- [CHO15] S.Choudhury, P.K.Rout, “ Adaptive Fuzzy Logic Based MPPT Control for PV System under Partial Shading Condition”, *International journal of renewable energy research*, Vol. 5, N0.4, pp. 1253-1263, 2015.
- [COE10] R.F. Coelho, F.M. Concer, D. Martins, “A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems” *IEEE ICSET 2010*, Kandy, Sri Lanka, 6–9 Dec 2010, pp. 1–6.
- [CRO13] L. Croci, “Gestion de l’énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2013.
- [DAL09] M. DALI, “Commande et Gestion Energétique des Systèmes Hybrides Photovoltaïque - Eolien ”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisie, 2009.
- [DAN14] X. L. Dang, “Contribution à l’étude des systèmes PV/Stockage distribués : impact de leur intégration à un réseau fragile”, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, France, 2014.
- [EGH10] A.H. Eghbali, B. Asaei, and P. Nader, “Fuel efficient control strategy, based on battery-ultracapacitor energy storage system, in parallel hybrid electric vehicles”, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2010 (Lille,France)*, Sept. 1-3 2010, pp. 1–5.
- [ELT13] M. A. Eltawil, Z. Zhao, “MPPT techniques for photovoltaic applications”, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 25, 2013, pp. 793-813.
- [ENG15] M. engin baçoğlu, B. çakir, “An improved incremental conductance based MPPT approach for PV modules”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol. 23, no.6, 2015, pp. 1687-1697.

- [ENS97] J.B.R. Enslin, M.S. Wolf, D.B. Snyman, W. Swiegers, “Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44 (6), Dec. 1997, pp.769 -773.
- [ESR07] T. Eswam, P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” IEEE Trans. Energy Convers. 22(2), 2007, pp. 439–449.
- [ESR07] T. Eswam, P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, no.2, 2007, pp. 439-449.
- [FAR08] R. Faranda, S. Leva, “MPPT techniques for PV systems: Energetic and cost comparison”, IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1–6.
- [FEM05] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, no.4, 2005, pp: 963–973.
- [GER02] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur”, Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan (France), 09 décembre 2002.
- [HAS10] Y. Hasni, M. Chaabene “Réseau électrique hybride autonome : Supervision et gestion des sources”, International Renewable Energy Congress, November 5-7, 2010, Tunisia.
- [HOH03] D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms”, Prog. Photovoltaics: Res. Appl., vol. 11, 2003, pp. 47-62.
- [HOU10] Z. Housheng, Z. Yanlei, “Research on a Novel Digital Photovoltaic Array Simulator”, IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), vol. 2, 2010, pp.1077-1080.
- [HUA03] C. Hua, J. Lin, “An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays”, Renewable Energy, Vol.28, no.7, 2003, pp.1129–1142.
- [IDD14] A. Idda , S. Bentouba , “Hybridation d’une Centrale Diesel en Energie Photovoltaïque: Effet de l'ajout d’un système de stockage”, La Conférence Nationale: Energie Hydrocarbone et Environnement, 3-4 Décembre 2014.
- [ISH12] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, S. Mekhilef, “An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation” IEEE Trans.Power Electron, Vol.27, no.8, 2012, pp: 3627-3638.
- [JIA12] Y. Jiang, A. Hassan, E. Abdelkarem, “Load Current Based Analog MPPT Controller For PV Solar Systems”, 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, pp.911-914.
- [KAF15] I.E. Kafazi, R. Bannari, A. Abouabdellah, “La modélisation et l’optimisation des systèmes de production complexes ; application aux réseaux énergétiques: Etat de l’art et Comparaison de modèles”, Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Décembre 2015, Tanger, Maroc.
- [KAL10] M. Kalantar and S.M. Mousavi G, “Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage”, Applied Energy 87 (2010), no. 10, 3051–3064.

- [KAS07] K. Kassmil, M. Hamdaoui, F. Olivié, “Conception et modélisation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique”, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10, no.4, 2007, pp : 451 – 462.
- [KIL15] M. Killi, S. Samanta, “Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems”, *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 62, no.9, 2015, pp. 5549 - 5559.
- [KOL13] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, “Adaptive Perturb & Observe MPPT Algorithm for Photovoltaic System”, 2013 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013, pp. 42-47.
- [LAB06] A. Labouret, M. Viloz, “Energie solaire photovoltaïque”, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [LAR09] C. Larbes, S. M.Ait Cheikh, T. Obeidi, A. Zerguerras, “Genetic Algorithms Optimized Fuzzy Logic Control for The Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System”, *Renewable Energy*, Vol.34 , no.10, 2009 , pp.2093-2100.
- [LAY14] T. M. Layadi, G. Champenois, “Etude du vieillissement d’un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources”, *Symposium de Génie électrique*, 8-10 juillet 2014, France.
- [LU95] C. F. Lu, C. C. Liu, and C. J. Wu, “dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability”, In *IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, Vol 142(4), page 429-435, IEE, Stevenage, Herts., U.K, July 1995.
- [MAP10] F.L. Mapelli, “Energy control for plug-in hev with ultracapacitors lithiumion batteries storage system for FIA alternative energy cup race”, *VPPC 2010 (Lille, France)*, Sept. 1-3, 2010.
- [MUN12] N. Muntean, M. Gavris, and O. Cornea, “Dual input, small power, PV and wind energy conversion system ”, *OPTIM 2012 (Brasov, Romania)*, May 24- 26, 2012, pp. 906–911.
- [NAS12] A. Nasr Allah, M. Saied, M. Mustafa, T. Abdel-Moneim, “A Survey of Maximum PPT techniques of PV Systems”, *Browse Conference Publications*, *Energytech, IEEE* , 2012, pp: 1-17.
- [NOG02] T. Noguchi, S. Togachi, R. Nakamoto, “Short-current pulse-based maximum-powerpoint tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system”, *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 49, Feb. 2002, pp. 217-223.
- [PAS06] A. C. Pastor, “Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques”, *Thèse de Doctorat de l’INSA de Toulouse (France)*, 29 septembre 2006.
- [PIP04] M. Pipattanasomporn “A study of remote area internet access with embedded power generation” *Etd -12272004-141-318*, Virginia polytechnic institute, 2004.
- [RAS04] M. H. Rashid, “Power Electronics Circuits Devices and Applications”, New Jersey: Pearson Education, Inc, 3rd edition, ISBN 0-13-122815-3, 2004, pp.190-195.
- [SAL06] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no.11, 2006, pp. 1555-1578.

- [**SAL92**] Z. M. Salameh, M. A. Casacca, and A. W. Lynch, “A mathematical model for lead-acid battery”, *IEEE Transactions on energy conversion*, 7(1):93-98, March 1992.
- [**SEO11**] G. Seok-II, A. Seon-Ju, C. Joon-Ho, J. Won-Wook, Y. Sang-Yun, S. Il-Keun, “Simulation and Analysis of Existing MPPT Control Methods in a PV Generation System”, *Journal of International Council on Electrical Engineering* vol.1, no.4, Oct 2011 ,pp.446-451.
- [**SER13**] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, R. Teodorescu, “On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no.3, 2013, pp: 1070–1078.
- [**SUB13**] B. Subudhi, R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4, issue 1, 2013, pp. 89-98.
- [**TAF08**] T. Tafticht, K. Agbossou , M.L. Doumbia, A. Cheriti, “ An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems ”, *Renewable Energy* 33 (2008) 1508–1516.
- [**TAK11**] P.Takun, S. Kaitwanidvilai, C. Jettanasen, “Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems”, *Proceeding of the international multi conference of engineers and computer scientists 2011 vol II*, March 16-18, Hong Kong.
- [**VIG10**] S.Vighetti “Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion”. Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [**XIA04**] W. Xiao, W. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems”, *IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC 04. 2004*, vol. 3, pp. 1957–1963.
- [**XU12**] W. Xu, C. Zeng, J. Lv, J. He “One Novel Variable Step-Size MPPT Algorithm for Photovoltaic Power generation” *Conference on IEEE Industrial Electronic Society*, vol.10, 2012, pp. 5750-5755.
- [**YOO08**] H. Yoo, S.K. Sul, Y. Park, and J. Jeong, “System integration and power flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries”, *IEEE Transactions on Industry Applications* 44 (2008), no. 1,108–114.
- [**YOU11**] J. Young-Hyok, J. Doo-Yong, K. Jun-Gu, K. Jae-Hyung, L. Tae-Won, W. Chung-Yuen, “A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions,” *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 26, 2011, pp: 1001–1009.

Annexes

Annexe A : Paramètres du système photovoltaïque

A.1. Paramètres du panneau photovoltaïque

Paramètre	Symbole	Valeur
Courant de saturation inverse de la diode	I_0	$8.225 \cdot 10^{-12} \text{A}$
Résistance série	R_s	0.015Ω
Résistance shunt	R_p	30Ω
Constante de Boltzmann	K	$1.38 \cdot 10^{-29} \text{J/K}$
Charge de l'électron	q	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

Tableau A.1: Paramètres du panneau photovoltaïque

A.2. Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans les conditions climatiques standards

	Symbole	Valeur
Courant court –circuit	I_{cc}	3.25A
Courant optimale	I_{opt}	3.07A
Tension circuit ouvert	V_{oc}	24.6V
Tension optimale	V_{opt}	20.29V
Puissance maximale	P_{max}	62.2W

Tableau A.2: Caractéristiques du panneau photovoltaïque

A.3. Paramètres du hacheur BOOST

Paramètre	Symbole	Valeur
Inductance	L	$350 \mu\text{H}$
Capacite1	C_1	$560 \mu\text{F}$
Capacite2	C_2	$560 \mu\text{F}$

Tableau A.3: Paramètres du hacheur BOOST

Annexe B : Modèle mathématique des batteries au plomb

B.1. Les batteries

L'énergie solaire pose de façon dramatique, le problème de stockage d'énergie, puisque la fourniture d'énergie est discontinue et aléatoire, alors que les besoins permanents et variables.

Dans le cas de l'énergie solaire, il n'est plus question de sur dimensionner les centrales pour satisfaire les besoins maximums puisque la source d'énergie disparaît chaque nuit ou a chaque passage nuageux. Les centrales solaires fournissent toute l'énergie solaire, mais la plus grande partie de cette énergie doit être stockée pour tenir compte lors d'une consommation nocturne.

On peut dire donc que l'énergie solaire ne peut réellement exister de façon significative, que lorsque le problème de son stockage sera résolu de façon économique.

Le stockage de l'énergie produite se fera dans des batteries. Il existe de nombreux types de batteries, chacune d'entre elles ayant été conçue pour un usage particulier. Elles sont définies par un ensemble de caractéristiques : tension nominale, capacité de stockage, aptitude au cyclage, tenue en décharge profonde, taux d'autodécharge, variation avec la température, maintenance, prix, etc. Pour l'usage spécifique du photovoltaïque, une batterie doit remplir les conditions suivantes [CHA96]:

- un nombre de cycles de charge et de décharge élevé sans altération, une faible autodécharge, un rendement électrique élevé et une maintenance légère.

B.2. Les différents types de batterie

Il est globalement possible de séparer les batteries en 2 types :

- Les batteries au plomb (pb) : étanches, à plaques plane minces, à plaques plane épaisses, à plaques tubulaire ;
- les batteries au cadmium-nickel (Cd-Ni).

Les batteries étanches au cadmium-nickel supportent sans problème des décharges profondes (100 %), contrairement aux batteries au plomb qui ne doivent jamais être déchargées à plus de 50-80 % selon leur type. On recommande même pour les batteries au cadmium-nickel, une décharge complète périodique à des fins de maintenance. Leur prix est par contre plus élevé que pour les batteries au plomb. Pour les systèmes

photovoltaïques, on préconise d'utiliser des batteries au plomb à plaque tubulaires.

B.3. Modèle mathématique des batteries au plomb

Dans la littérature [LU95], des auteurs ont utilisé le modèle représenté sur la figure I. Le modèle décrit le comportement primaire d'une batterie correctement, mais n'explique pas les propriétés lentement changeantes d'une batterie telles que l'augmentation et la diminution de la tension de fonctionnement provoquée par le processus de la charge et de la décharge.

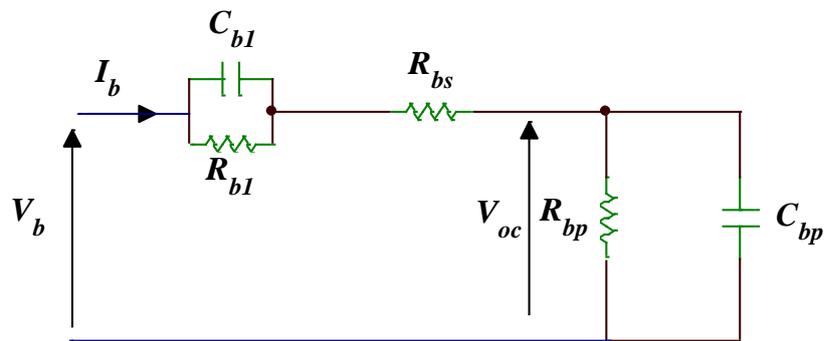


Figure B.1 : Modèle équivalent de la batterie

Ce modèle inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales d'une batterie plomb-acide:

La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C_{bp} et sa valeur est donnée par l'expression générale de l'énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_C^2 \quad (\text{B.1})$$

Avec C : la capacité et V_c la tension du condensateur.

A la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge. C'est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge égal à l'énergie $E_{c_{\min}}$. La capacité entièrement chargée de la batterie est représentée par un niveau maximum de charge $E_{c_{\max}}$. Ceci est indiqué par l'équation suivante [LU95]:

$$\begin{aligned}
E_b &= E_{c_{\max}} - E_{c_{\min}} = \frac{1}{2} C V_{\max}^2 - \frac{1}{2} C V_{\min}^2 \\
E_b &= \frac{1}{2} C_{bp} (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)
\end{aligned}
\tag{B.2}$$

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie directement en kilowatt par heure (kWh). Les tensions V_{\max} et V_{\min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après (B.2) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} \tag{B.3}$$

C_{bp} : est la capacité de la charge de la batterie.

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{bs} et R_{b1} en série. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs} tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte. Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie dès qu'une charge sera reliée. De même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage. En utilisant la notation indiquée sur la figure B.1 on peut exprimer la tension de batterie V_b en fonction de la tension de batterie en circuit ouvert et les autres composants R_{b1} , R_{bs} et C_{b1} avec la constante de temps :

$$\begin{cases} \tau = R_{b1} C_{b1} \\ V_b = V_{oc} + R_{b1} \left[1 - e^{-t/\tau} \right] i_b + R_{bs} i_b \end{cases}
\tag{B.4}$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est la décharge spontanée, représentée par la résistance R_{bp} parallèle avec le condensateur principal C_{bp} . Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de batterie aux basses tensions [SAL92].

Le circuit sur la figure B.1 décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée:

Ce circuit exprime l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide par :

$$Z(s) = \frac{(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)}{(b_2 s + b_1 s + b_0)} \quad (\text{B.5})$$

Les coefficients a_i et b_j sont employés pour représenter les différents composants :

$$\begin{aligned} a_2 &= R_{bs} R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp}; \\ a_1 &= R_{bs} R_{b1} C_{b1} + R_{bs} R_{bp} C_{bp} + R_{b1} R_{bp} C_{bp} + R_{bp} R_{b1} C_{b1}; \\ a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp}; \\ b_2 &= R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp}; \\ b_1 &= R_{b1} C_{b1} + R_{bp} C_{bp}; \\ b_0 &= 1. \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Annexe C : Schémas bloc de la commande P&O

C.1. Schémas bloc de MPPT P&O (PPF) classique

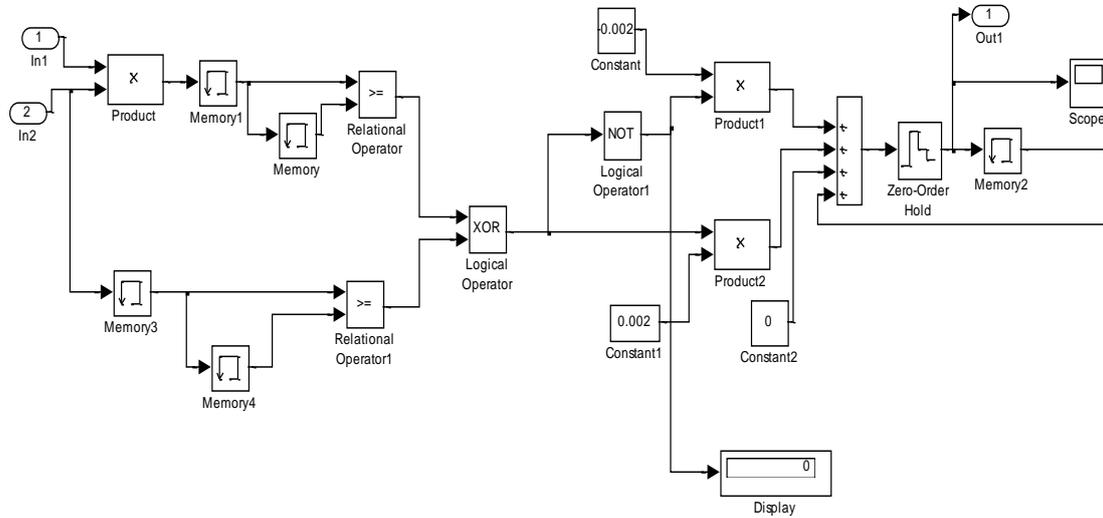


Figure C.1 : Schémas bloc de la méthode P&O(PPF) classique

C.2. Schémas bloc de MPPT P&O (PPF) modifiée

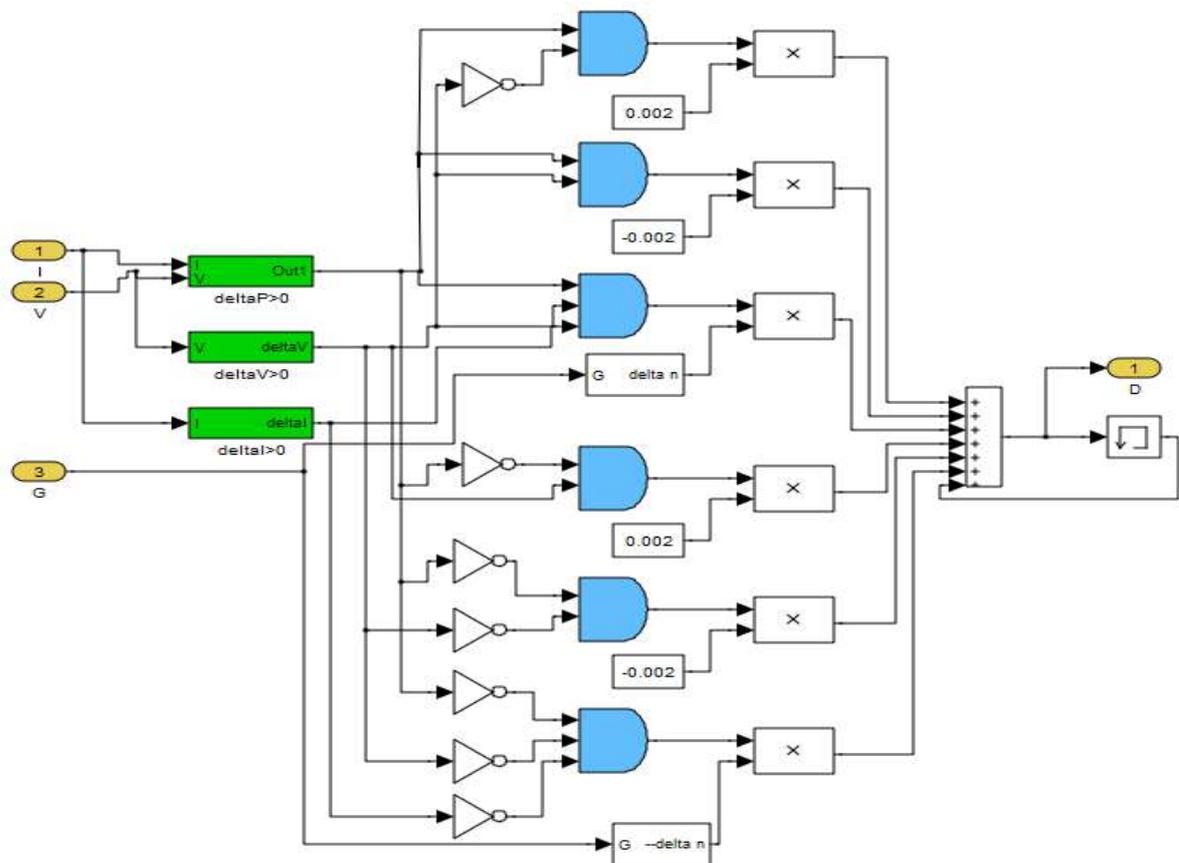


Figure C.2 : Schémas bloc de la méthode P&O(PPF) modifiée [BEL17b]

C.3. Schémas bloc de MPPT P&O (PPV) modifiée

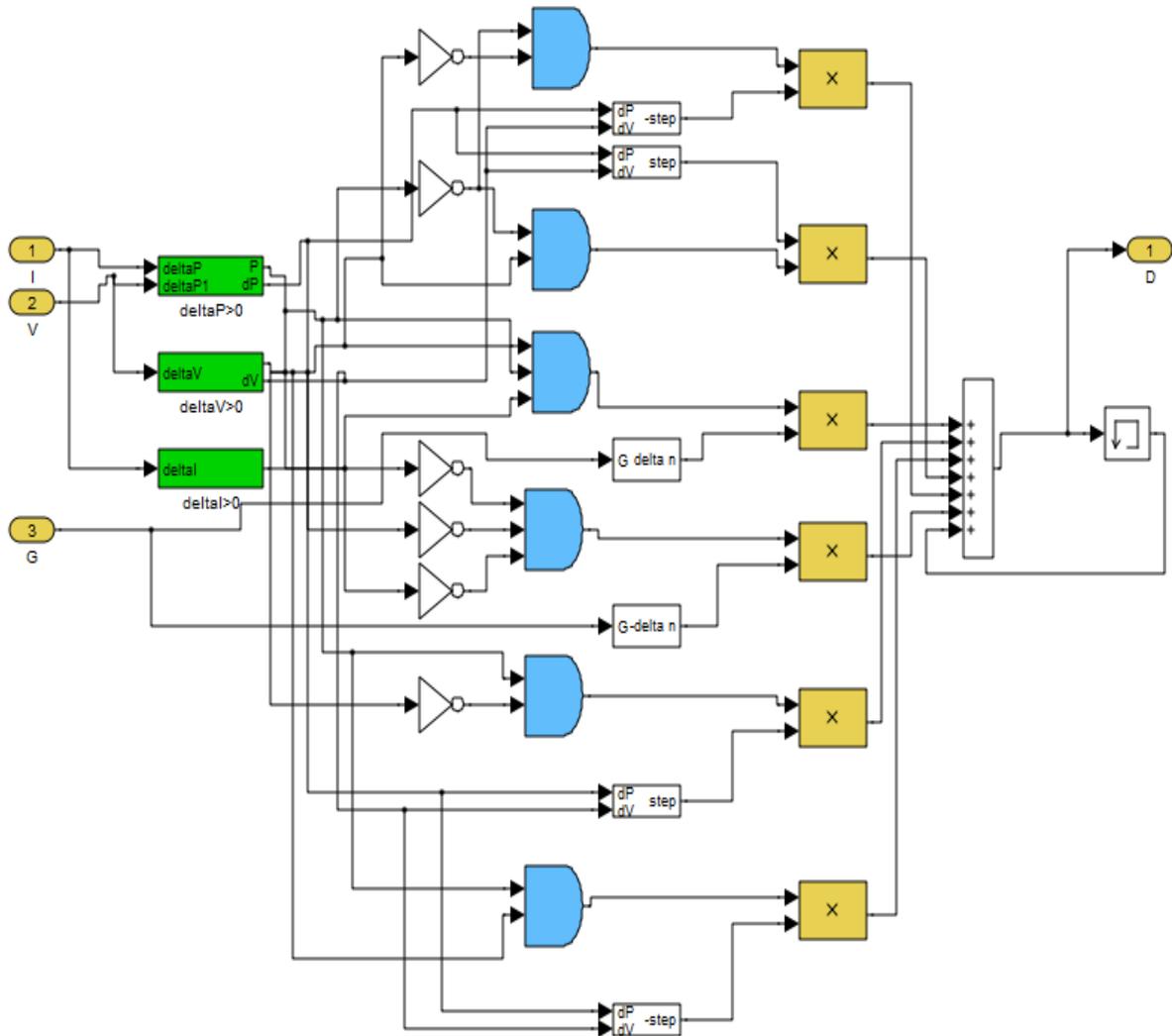


Figure C.3 : Schémas bloc de la méthode P&O(PPV) modifiée [BEL17a]

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة دمج الطاقة الفوتوضونية مع الديزل، الذي يعتبر مفتاح الأمان لزيادة موثوقية النظام الهجين لتزويد المستهلك بالطاقة دون انقطاع، ولكن استخدامه يزيد من تلوث الهواء، هذا المشكل دفعنا إلى استعمال البطاريات لتخزين الفائض من الطاقة الناتجة عن النظام الفوتوضوني خلال النهار ومن ثم استخدامها قدر الممكن بدلا من الديزل. التغير السريع في إشعاع الشمس يسبب خطأ في النقاط النقطة الأعظمية للاستطاعة وبالتالي خسارة في الطاقة التي كانت من المفروض أن تستخدم كطاقة مخزنة في البطاريات أو لتزويد المستهلك و بالتالي إطالة عدم استعمال الديزل. في هذه الأطروحة بدأنا بحثنا بدراسة عامة حول النظام الهجين، في القسم الثاني قدمنا شرح مفصل على النظام الفوتوضوني و في الفصل الثالث طبقنا إستراتيجية جديدة على التحكم P&O التقليدية لكي تأخذ بعين الاعتبار كل من (ΔI) ، (ΔV) و (ΔP) لاستشعار التغيرات المناخية ثم أضفنا لها (Δdn) المحسن لإضفاء الكفاءة على النظام الفوتوضوني في استخراج النقطة الأعظمية للاستطاعة عند التغير المفاجئ في إشعاع الشمس و في الفصل الأخير اقترحنا خوارزمية المراقبة وتسيير الطاقة و تحكم هجين يجمع بين طريقة التحكم P&O المحسنة و طريقة المنطق الضبابي (FLC). أسفرت هذه التحسينات عن نتائج مرضية سمحت لنا بتحسين كفاءة النظام من حيث الموثوقية في حالة التغيرات المفاجئة لإشعاع الشمس وعند زيادة الحمولة، كما نجحنا في التقليل من حالة "عمل" الديزل.

الكلمات المفتاحية: النظام الفوتوضوني، التحكم P&O، تحكم المنطق الضبابي (FLC)، الديزل، البطاريات

Abstract:

This thesis deals with the integration of photovoltaic energy with diesel, which is considered the key security to increase the reliability of the hybrid system for the supply of energy quality and without interruption, but its use increases pollution of the air, this problem has led to the use of batteries to store surplus energy generated by the photovoltaic system during the day and then use them instead of diesel. The rapid change in solar irradiation causes the error of extracting the MPP and thus a loss of energy occurs, which was supposed to be used as energy stored in the batteries or to provide electrical energy thus prolonging the diesel "off". In this thesis, we started our research by a state of the art on hybrid systems, in a second part we gave a detailed explanation of the photovoltaic system and in the third chapter, we applied a new strategy on P&O conventional to take into account (ΔI) , (ΔV) and (ΔP) to detect the climatic variation and then we added a new step size (Δdn) in order to optimize the photovoltaic system to extract the maximum power point MPP in the sudden change of solar radiation. In the last chapter, we proposed two solutions to improve the hybrid system, the first solution is to optimize the performance of the MPPT to extract the MPP of PV by combining the modified P&O with the fuzzy logic control (FLC), and the other solution is to optimize the energy management of the photovoltaic-diesel-battery system by an algorithm of supervision and energy management. These solutions gave satisfactory results that allowed us to improve the system efficiency in terms of reliability in case of climatic variations, load increase and we managed to reduce the state "On" of diesel.

Keywords: Photovoltaic system, P&O, FLC, Diesel, Battery

Résumé :

Cette thèse traite l'intégration de l'énergie photovoltaïque aux systèmes diesel, ce qui est considéré la clé de sécurité pour augmenter la fiabilité du système hybride pour la fourniture de la qualité énergétique et sans interruption, mais son utilisation augmente la pollution d'air, ce problème a conduit à l'utilisation des batteries pour stocker l'énergie excédentaire générée par le système photovoltaïque au cours de la journée et ensuite les utiliser à la place du diesel. Le changement rapide de l'irradiation solaire cause l'erreur d'extraire le MPP et donc une perte d'énergie se produit, ce qui était censé être utilisée comme énergie stockée dans les batteries ou pour fournir de l'énergie électrique pour prolonger l'état « off » du diesel. Dans cette thèse, nous avons commencé nos recherches par un état de l'art sur les systèmes hybrides, dans une deuxième partie nous avons donné une explication détaillée du système photovoltaïque et dans le troisième chapitre, nous avons appliqué une nouvelle stratégie sur la commande P&O conventionnelle pour prendre-t-elle en compte (ΔI) , (ΔV) et (ΔP) afin que détecter le changement climatique et ensuite nous avons ajouté un nouveau pas de perturbation (Δdn) afin d'optimiser le système photovoltaïque à extraire le point de puissance maximale MPP dans le changement soudain du rayonnement solaire. Dans le dernier chapitre, nous avons proposé deux solutions pour améliorer le système hybride, la première solution est pour d'optimiser la performance de la commande MPPT à extraire le MPP du PV en combinant la commande P&O modifiée avec la commande de la logique floue (FLC), et l'autre solution est pour d'optimiser la gestion d'énergie du système photovoltaïque-batteries-diesel par un algorithme de supervision et gestion d'énergie. Ces solutions ont donné des résultats satisfaisants qui nous ont permis d'améliorer l'efficacité du système en termes de fiabilité en cas des variations climatiques et en cas d'augmentation de la charge, et nous avons réussi à réduire l'état "On" du diesel.

Mots clés : Système photovoltaïque, P&O, FLC, Diesel, Batterie