

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



*Département d'Automatique
Spécialité Automatique*

Projet de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique*

THÈME

**Commande et optimisation d'une chaîne
photovoltaïque à base de convertisseur
multicellulaire : approche hybride**

Etudié par :

**AMEUR Omar
DABLADJI Mohammed El-Habib**

Proposé et dirigé par :

**M^r. M. BOUCHERIT
M^r. M. TADJINE**

Juin 2011

Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie

ملخص :

اهتمنا في هذا العمل بالتحكم و زيادة مردود مولدات كهروضوئية موصلة بمحولات طاقة متعددة الخلايا. أثناء عملنا قمنا بإيجاد استراتيجية تحكم تعتمد على آلية التحكم التراجعي و أخرى تعتمد على الآليات الهجينة الهدف من هذه الاستراتيجية هو ضمان تتبع نقطة الاستطاعة القصوى وتعديل توتر المكثفات لمحولات الطاقة المتعددة الخلايا أظهرت المحاكاة نتائج ممتازة.

كلمات المفتاح: كهروضوئية، تتبع نقطة الاستطاعة القصوى، محولات الطاقة متعددة الخلايا، آلية التحكم التراجعي، الآليات الهجينة.

Résumé :

Dans ce travail, notre intérêt s'est porté sur l'optimisation et la commande d'une chaîne photovoltaïque associant un convertisseur multicellulaire.

Au cours de notre travail, on s'est focalisé sur la synthèse d'une commande basée sur la méthodologie de Backstepping et une autre basée sur les automates hybrides. L'objectif étant d'assurer la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) tout en assurant l'équilibrage des tensions flottantes du convertisseur multicellulaires. Des résultats de simulation montrent que les méthodes utilisées donnent de bonnes performances.

Les mots clés : photovoltaïque, MPPT, convertisseur multicellulaire, commande Backstepping, automate hybride.

Abstract:

In this work, we were interesting by the optimization and the control of a photovoltaic chain associated to a multicellular converter.

During our work, we have focused to synthesize a control law based on Backstepping methodology and another control law based on hybrid automaton. The objective is to ensure the Maximum Power Point Tracking (MPPT) and the balancing of the floating voltage of the multicellular converter. Simulation results show that these methods offer good performances.

Key words: photovoltaic, MPPT, multicellular converter, Backstepping control law, hybrid automaton.

Remerciement

*Nous remercions avant tout **Allah**, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de notre chemin, tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement nos deux encadreurs **Mr BOUCHERIT** et **Mr TADJINE** pour leur aide, leur disponibilité et inestimable humilité, sans oublier **Mr BENMENSOUR** pour son intérêt, sa disponibilité et sa bienveillance.*

Nous remercions également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.

Nous remercions nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux du département d'automatique.

Nous tenons à exprimer notre très grande gratitude, et notre profonde affection à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien, durant toutes ces années d'études.

Nous remercions également tous nos amis et camarades, pour leurs encouragements et leur précieux soutien.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chers à mon cœur, ceux que j'aime par-dessus tout, à ceux que je dois tout et même plus, qui par leurs sacrifices, leur amour, leur patience, leur soutien et leurs encouragements m'ont permis de persévérer et de donner le meilleur de moi-même afin de réussir et c'est le cas aujourd'hui; à mon père **Abdelkader**, ma mère **Khelifa M'hamedi Fatma**, ma belle-mère **Mohammed Sba'a Zohra** et ma grand-mère **Belhanafi Mahjouba**. J'espère un jour vous rendre un petit peu de ce que vous m'avait offert, et que vous soyez satisfait de moi.*

Je dédie ce travail également

*A mes deux frères **Aissa** et l'adorable **M'hamed Wassim**, à mes trois adorables et chères sœurs **Kamilia**, **Rommaïssa** et **Wissam**, je vous aime énormément et je vous souhaite bonne chance dans vos études.*

*A mon cousin **Mourad** et sa femme **Imane** pour tous leur soutien et leurs encouragements.*

*A mes tantes **Fatima**, **Zohra** et **Malika** pour tous ce qu'ils ont fait pour moi durant mon enfance*

*A tous mes oncles et plus particulièrement, **M'hamed** et **Djilali** pour leur aide tout au long de mes années d'études*

*A mes très chers amis de Bouraoui : **Rafik**, **Houcine**, **Samir**, **Omar**, **Sayf**, **Saïd**, **Djilali** et **Khalido** ; mon ami d'enfance : **Mourad** sans oublier **Rabie**, **Kamel** et **Soufiane***

*A la mémoire de mon ami **Ismail Harriri** avec qui on a passé des moments inoubliables d'enfances*

Dabladji Mohammed El-Habib

Dédicaces

Avant tout, je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui ont été de tout temps, les plus proches, qui n'ont jamais ménagé leurs efforts, leurs encouragements et leur soutien avec abnégation et patience, ceux qui ont prodigué leurs vifs conseils, encouragements et témoigné de leur amitié.

À la mémoire de mes chers grands-parents.

A ma chère grand-mère « EL HADJA Rebiha » pour son encouragement tout au long de mon parcours.

A mon frère « Adnane » et mes deux sœurs « Ismahane » et « Ilhame » que j'aime très fort, et à qui je souhaite tout le bonheur et la réussite du monde.

A toute la famille AMEUR, HAMDI et CHIBANI

A mon enseignant du primaire « SANDID Abd Ellah » et tous mes enseignants pour leurs encouragements tout au long de mes études.

A mon binôme Habib pour ces deux années de travail pleines de souvenirs.

Je tiens aussi à dédier ce travail à tous mes amis : Said, Rachid, Imad, Djawad, Toufik, Rafik, Tayab, Amine, Chams, Djamel, Khaled, abdellah, Houssine, Zaki... à tous ceux qui me sont chers, que j'aime et qui m'aiment ainsi qu'à mes camarades de promotion.

AMEUR Omar

Notations et abréviations

Abréviations

ANPC	convertisseur à neutre clampé active
BO	Boucle ouverte
GPV	Générateur Photovoltaïque
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NPC	convertisseur à neutre clampé
PPM	Point de puissance maximale
PV	photovoltaïque
P&O	Perturb and Observe

Notations

C	vitesse de la lumière
C	Capacité du condensateur
C_{aux}	Capacité du circuit auxiliaire
C_k	Capacité du condensateur k
E	La tension de l'alimentation du convertisseur
E_g	bande interdite du semi-conducteur

f_a	Fréquence apparente à la sortie du convertisseur
f_{dec}	Fréquence de découpage
I_{ch}	Courant dans la charge
i_{ck}	Courant dans le condensateur k
I_{mp}	Le courant de puissance maximale
I_{ph}	Courant produit par la photopile (cellule)
I_{pv}	courant photovoltaïque
I_{ref}	Courant de référence
I_{sc}	Courant de court-circuit
I_{scr}	Courant de court-circuit à la température de référence T_r
I_0	Courant de saturation de la jonction.
k	Constante de Boltzmann
L	L'inductance de charge
L	Eclairement
L_{aux}	L'inductance du circuit auxiliaire
n	Facteur d'idéalité
N	Nombre de niveaux
N_p	nombre de cellules en parallèle
N_s	nombre de cellules en série
P	Nombre de cellule
P_i	La puissance solaire incidente
P_m	Puissance maximale de la cellule
P_{pv}	puissance photovoltaïque

q	Charge de l'électron
q_k	Le mode k (état discret)
R	La résistance de charge
R_{op}	La charge optimale
R_s	Resistance série de la jonction
S_k	Signal de commande de l'interrupteur de puissance numéro k
T	Température de la cellule
T_{dec}	Période de découpage
T_{on}	Durée à l'état passant d'un interrupteur
T_r	Signal de modulation
u_k	signal de commande de l'interrupteur k en valeur moyenne
V_{ck}	La tension aux bornes du condensateur flottant k
V_{ckref}	Tension de référence du condensateur k
V_i	tension fournie par une seule cellule
V_{mp}	La tension de puissance maximale
V_{oc}	Tension de circuit ouvert à la température T
V_{ocr}	Tension de circuit ouvert à la température T_r
V_{pv}	Tension à la sortie du panneau PV
V_s	La tension de sortie du convertisseur statique
α	Rapport cyclique
λ	Longueur d'onde
δ	Déphasage entre les signaux de commandes

Table des matières

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

Chapitre 1 : L'énergie solaire photovoltaïque

1.1. Introduction.....	4
1.2. La conversion photovoltaïque dans le monde.....	5
1.2.1. La tendance d'énergie mondiale.....	6
1.2.2. Les prévision mondiale en photovoltaïque.....	6
1.2.3. Quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	7
1.3. Généralités sur les cellules photovoltaïques	9
1.3.1. Rappel sur les semi-conducteurs	9
1.3.2. L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	10
1.3.3. La cellule photovoltaïque.....	10
1.3.4. Le Module Photovoltaïque	16
1.4. Le Générateur Photovoltaïque.....	18
1.4.1. Protection des générateurs photovoltaïques	19
1.4.2. Modélisation du panneau photovoltaïque	20
1.4.3. Le modèle Simulink et simulation du GPV.....	22
1.5. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking)	24
1.5.1. Méthodes à contre réaction de puissance	25
1.5.2. Méthodes à contre réaction de tension	28
1.5.3. Méthodes à contre réaction du courant	29
1.5.4. Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT.....	29
1.6. Conclusion.....	30

Chapitre 2 : Les convertisseurs multicellulaires

2.1. Introduction	31
2.2. Structure de conversion multiniveaux	31
2.2.1. Présentation des principales structures multiniveaux	32
2.2.2. Avantages et inconvénients de la structure multicellulaire.....	34
2.3. Modélisation mathématique des convertisseurs multicellulaires	35
2.3.1. Modèle instantané	36

Table des matières

2.3.2. Modèle moyen	38
2.3.3. Modèle harmonique	39
2.4. Commande des convertisseurs multicellulaires	39
2.4.1. Modulation MLI boucle ouverte.....	39
2.4.2. Objectifs des lois de commande	39
2.4.3. Classification des stratégies de commande	40
2.5. Utilisation des convertisseurs multicellulaire dans une chaine d'énergie photovoltaïque	41
2.5.1. Modélisation de la chaine photovoltaïque.....	42
2.6. Conclusion.....	42
Chapitre 3 : Optimisation de la chaine photovoltaïque par la méthode de Backstepping	
3.1. Introduction.....	44
3.2. Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT	44
3.3. Comportement du système photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost	45
3.4. Fonctionnement de la chaine photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO.....	47
3.5. Rappels sur les fonctions de Lyapunov et la méthodologie de Backstepping	49
3.5.1. Notions de base.....	49
3.5.2. Stabilité locale et stabilité globale en utilisant les fonctions de Lyapunov.....	50
3.5.3. Méthodologie de Backstepping	51
3.6. Etude pour une chaine photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à deux cellules	52
3.6.1. Modélisation de la chaine photovoltaïque.....	53
3.6.2. Synthèse de la loi de commande	54
3.7. Résultats et simulation	56
3.7.1. Fonctionnement de la chaine photovoltaïque sous des conditions constantes en utilisant la méthodologie Backstepping.....	56
3.7.2. Comportement de la chaine photovoltaïque face à des changements de l'éclairement.....	59
3.7.3. Comportement de la chaine photovoltaïque face à des changements de la température....	60
3.7.4. Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation du panneau photovoltaïque	62
3.7.5. Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation du convertisseur multicellulaire	64
3.7.6. Comparaison des résultats avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO	65
3.8. Conclusion.....	65

Table des matières

Chapitre 4 : Modélisation et commande de la chaîne photovoltaïque par l'approche hybride	
4.1. Introduction.....	67
4.2. Rappel sur les systèmes dynamiques hybrides	67
4.2.1. Définition des systèmes hybrides	67
4.2.2. Définition des automates hybrides.....	68
4.2.3. Exécution d'un système hybride.....	69
4.2.4. Classes des systèmes dynamiques Hybrides	70
4.2.5. Définition des Systèmes dynamiques à commutations	71
4.3. Modélisation hybride d'une chaîne photovoltaïque	72
4.3.1. La chaîne photovoltaïque (module photovoltaïque associé un convertisseur	72
4.3.2. Automate hybride De la chaîne photovoltaïque	73
4.3.3. Schéma d'Automate hybride De la chaîne photovoltaïque	79
4.3.4. Modélisation hybride avec State flow.....	80
4.4. Résultats de simulation	82
4.4.1. Fonctionnement de la chaîne photovoltaïque sous des conditions constantes en utilisant la commande hybride	82
4.4.2. Comportement de la chaîne photovoltaïque face à un changement de l'éclairement en utilisant la commande hybride	85
4.4.3. Comportement de la chaîne photovoltaïque face à un changement de la température en utilisant la commande hybride.....	87
4.4.4. Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation de la chaîne photovoltaïque	89
4.4.5. Résultats de simulation avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules	91
4.4.6. Comparaison des résultats avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO	93
4.5. Conclusion.....	94
Conclusion générale	95
Bibliographie	98
ANNEXE A	100
ANNEXE B	103
ANNEXE C	104

Liste des figures

Figure 1.1 : Les réserves d'énergie mondiale par rapport à la demande annuelle	5
Figure 1.2 : La tendance mondiale en énergie	6
Figure 1.3 : Les prévisions mondiales de la demande en énergie photovoltaïque pour l'an 2020.....	7
Figure 1.4 : Intensité du rayonnement du soleil en un jour.	9
Figure 1.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN)	11
Figure 1.6 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	12
Figure 1.7 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.....	12
Figure 1.8 : Caractéristique tension-puissance d'une cellule solaire	13
Figure 1.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique de la cellule	13
Figure 1.10 : Influence de la température sur la caractéristique de la cellule.....	14
Figure 1.11 : Jonction PN éclairé	15
Figure 1.12 : Principe d'une cellule photovoltaïque	15
Figure 1.13 : Courbe d'une photopile débitant sur une charge R et une charge optimale R_{op}	16
Figure 1.14 : Module photovoltaïque	17
Figure 1.15 : Groupement de cellules en série	17
Figure 1.16 : Groupement de cellules en parallèle	18
Figure 1.17 : Composantes d'un générateur photovoltaïque	19
Figure 1.18 : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections	20
Figure 1.19 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	20
Figure 1.20 : Le modèle Simulink du générateur photovoltaïque.....	22
Figure 1.21 : Caractéristiques I-V du générateur photovoltaïque.....	22
Figure 1.22 : Caractéristiques P-V du générateur photovoltaïque.....	23
Figure 1.23 : Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique courant- tension d'un PV	23
Figure 1.24 : Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance- tension d'un PV	24
Figure 1.25 : Vue Générale d'un système photovoltaïque doté d'un MPPT	24

Liste des figures

Figure 1.26 : Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) et I_{pv} (V_{pv})	25
Figure 1.27 : L'organigramme de la commande MPPT en utilisant l'algorithme Perturb & Observe	26
Figure 1.28 : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermé du convertisseur	27
Figure 1.29 : L'organigramme de la commande MPPT en utilisant l'algorithme d'inductance incrémentale	28
Figure 2.1 : Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade	32
Figure 2.2 : Onduleur NPC trois niveaux	33
Figure 2.3 : Bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux	34
Figure 2.4 : Structure multicellulaire série associée à une charge R-L	36
Figure 2.5 : Principe de la commande directe.....	40
Figure 2.6 : Principe de la commande indirecte.....	40
Figure 2.7 : Schéma général de la chaîne photovoltaïque associé à un convertisseur multicellulaire à deux cellules.....	41
Figure 3.1 : Comportement du système sans contrôleur MPPT	45
Figure 3.2 : Système photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost	46
Figure 3.3 : Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et des variations de l'ensoleillement	46
Figure 3.4 : Réponse du système photovoltaïque à un éclairement de 1000 W/m^2 et des variations de la température	47
Figure 3.5 : chaîne photovoltaïque constituée d'un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO.....	48
Figure 3.6 : Puissance délivrée par le générateur PV comparée avec la puissance maximale	48
Figure 3.7 : La tension flottante comparée avec la tension d'entrée.....	49
Figure 3.8 : La classe des systèmes en cascade sur lesquels on peut appliquer le Backstepping	51
Figure 3.9 : Représentation de la chaîne photovoltaïque associée à un convertisseur multicellulaire à deux cellules.....	53
Figure 3.10 : Principe de commande par la méthode de Backstepping de la chaîne photovoltaïque.....	54

Liste des figures

Figure 3.11 : Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 w/m ² (puissance/tension/courant).....	57
Figure 3.12 : Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque	58
Figure 3.13 : Etat des interrupteur S1 et S2.....	58
Figure 3.14 : Profil de l'éclairement	59
Figure 3.15 : Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et des variations de l'ensoleillement (puissance/tension/courant).....	60
Figure 3.16 : Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque	60
Figure 3.17 : Profil de la température.....	61
Figure 3.18 : Réponse du système photovoltaïque à un éclairement de 1000 W/m ² et des variations de la température (puissance/tension/courant).....	62
Figure 3.19 : Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque	62
Figure 3.20 : Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale.....	63
Figure 3.21 : La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV	63
Figure 3.22 : Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale.....	64
Figure 3.23 : La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV	64
Figure 4.1 : Exemple d'une exécution d'un système hybride.....	70
Figure 4.2 : les quatre modes de la chaine photovoltaïque.....	73
Figure 4.3 : la chaine PV dans le mode q ₁	74
Figure 4.4 : la chaine PV dans le mode q ₂	75
Figure 4.5 : la chaine PV dans le mode q ₃	75
Figure 4.6 : la chaine PV dans le mode q ₄	76
Figure 4.7 : Domaine du mode q ₁	78
Figure 4.8 : Domaine du mode q ₂	78
Figure 4.9 : Domaine du mode q ₃	78

Liste des figures

Figure 4.10 : Domaine du mode q_4	78
Figure 4.11 : Schéma d'Automate hybride De la chaine photovoltaïque.....	80
Figure 4.12 : modèle Simulink de la commande hybride appliquée à la chaine photovoltaïque	81
Figure 4.13 Schéma state flow pour la commande de la chaine photovoltaïque	82
Figure 4.14 : Réponse du système photovoltaïque sous une température de 25°C et un éclairage de 1000 W/m ² en utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant)	83
Figure 4.15 Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque »	84
Figure 4.16 : Evolution des transitions entre les modes.....	84
Figure 4.17 : variation de l'ensoleillement	85
Figure 4.18 : Réponse du système photovoltaïque à des variations de l'ensoleillement et sous une température de 25°C utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant).....	86
Figure 4.19 : Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque ».....	87
Figure 4.20 : variation de la température.....	87
Figure 4.21 : Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température et sous un éclairage de 1000 W/m ² utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant)	88
Figure 4.22 : Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque ».....	89
Figure 4.23 : Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale.....	90
Figure 4.24 : La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV	90
Figure 4.25 : Chaine photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules	91
Figure 4.26 : Tension photovoltaïque et les tensions flottantes.....	92
Figure 4.27 : Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque	93
Figure 4.26 : Evolution des transitions entre les modes.....	93

INTRODUCTION
GENARALE

Avec les progrès scientifiques et techniques de ces dernières années qui ont permis d'envisager une utilisation très large de l'énergie solaire, un changement profond dans l'économie de la production d'énergie par des processus conventionnels ainsi qu'une prise de conscience accrue de leurs effets négatifs sur l'environnement se sont manifestés.

La demande en électricité est la meilleure illustration des besoins du consommateur. En raison de ses innombrables applications à la fois industrielles et domestiques, il serait difficile d'envisager de vivre aujourd'hui sans électricité. Cependant, la mise au point de l'électricité solaire offre la perspective d'un approvisionnement illimité en énergie non polluante. [1]

Les générateurs photovoltaïques, qui ont connu une période d'intense développement ces dernières décennies, suscitent un renouveau d'intérêt tout particulier dans le domaine des usages terrestres. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet, la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Le développement fulgurant ces dernières années des applications de l'électronique de puissance dû essentiellement aux progrès réalisés dans la fabrication des semi-conducteurs de puissance, a posé de nouveaux problèmes tant pratiques que théoriques.

Du point de vue pratique :

- la nécessité de disposer de puissances élevées a imposé de nouvelles structures capables d'assurer la répartition des contraintes en tension sur les différents interrupteurs et d'améliorer les rendements en puissance.
- L'accroissement en puissance est obtenu par une augmentation du courant et/ou de la tension commutée. Bien que l'augmentation de la tension soit souvent privilégiée (sur les installations moyenne tension et haute tension), afin d'améliorer le rendement de l'installation, elle reste cependant difficile à maîtriser à l'échelle des semi-conducteurs et conduit à une dégradation de leurs performances dynamique et statique [2].

L'apparition des structures de conversion multiniveaux depuis le début des années 1980 apporta des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance. Ces structures

assurent la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs moyenne ou basse tension tout en améliorant les formes d'onde (spectres harmoniques) des grandeurs de sortie. Développé au sein du laboratoire LAPLACE (ex : LEEI) (Toulouse, France) il y a quelques années, le convertisseur multicellulaire s'intègre dans la famille des structures de conversion d'énergie multiniveaux [2].

Le développement fulgurant des énergies renouvelables surtout en photovoltaïque et la croissance des besoins en haute tension et moyenne tension durant ces derniers décennies ont incité les chercheurs à trouver des étages d'adaptation performants assurant d'un côté l'exploitation de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque et d'un autre côté, satisfaire les exigences de l'industrie en matière de qualité et de forte puissance. En tenant compte des avantages qu'offre le convertisseur multicellulaire, il est de notre point de vue le plus adapté à ces applications.

L'analyse et la commande des convertisseurs multicellulaires nécessitent le développement d'un modèle mathématique. Malgré le soin que l'on apporte à la modélisation, le modèle mathématique développé ne reflète en général pas le comportement exact du processus réel. Ces différences peuvent par exemple être dues à des dynamiques non modélisées, à des variations des paramètres du système ou à l'approximation trop directe de comportements complexes du processus. De plus, la commande est souvent faite sur la base d'un modèle simplifié.

La chaîne photovoltaïque résulte de l'association d'un générateur photovoltaïque et un convertisseur multicellulaire présente par nature un comportement hybride. L'aspect hybride est dû à la présence de variables discrètes présentées par l'état des interrupteurs et continues par les tensions et les courants dans les composants passifs tels que les résistances, inductances et les condensateurs. Il est alors tout à fait naturel de modéliser cette chaîne photovoltaïque sous forme d'un système hybride.

Le travail présenté ici se focalise sur la commande et l'optimisation d'une chaîne photovoltaïque à travers des commandes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des cellules et générateurs photovoltaïques, leur modélisation et quelques rappels théoriques des méthodes de poursuite du point de puissance maximale

Le deuxième chapitre rappelle brièvement quelques structures de convertisseurs multiniveaux existants, l'évolution technologique de ces derniers convertisseurs, leur principe de fonctionnement, et les différents modèles de convertisseur multicellulaire ainsi que les stratégies classiques de commande développées.

Au cours du troisième chapitre, on a proposé les résultats de simulation d'une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost puis avec un convertisseur multicellulaire commandé en modulation de largeur d'impulsions en boucle ouverte (MLI-BO). Ensuite, une loi de commande basée sur les fonctions de Lyapunov et la méthodologie de Backstepping a été réalisée pour assurer les objectifs de commande. Les résultats de simulation de cette commande comparés avec ceux du Buck-Boost ont été faits à la fin de ce chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation et l'analyse du comportement de la chaîne photovoltaïque d'un point de vue hybride. Nous avons mis en évidence le fonctionnement de cette structure en utilisant le modèle des différents modes et en établissant un automate hybride pour représenter la chaîne photovoltaïque et assurer son fonctionnement optimale.

CHAPITRE 1

L'énergie solaire photovoltaïque

1.1 Introduction

Pratiquement, toutes les énergies utilisées par l'être humain sont originaires du soleil. L'énergie solaire est absorbée et stockée par les plantes. On utilise cette énergie lorsqu'on brûle le bois ou on mange de la nourriture. Les coups de vent sont dus aux différences de la température de masse de l'air. L'énergie solaire a fourni la puissance de réchauffer l'air. Le soleil propulse aussi les cycles de la chute de pluie qui remplissent des rivières desquelles nous extrayons l'hydroélectricité. Même le pétrole, le charbon et le gaz ont été produits dans les temps préhistoriques par les organismes, en convertissant la lumière du soleil en énergie chimique. Mais nous pouvons aussi recueillir l'énergie du soleil directement pour des fins de chauffage et de production de l'électricité.

Dans ce chapitre, on présente les informations essentielles sur l'énergie solaire, particulièrement son échelle, utilisation actuelle et future [3].

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque [1]

L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présente un point de puissance maximal.

Nous allons présenter un bref rappel sur les semi-conducteurs, on présentera la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence des paramètres météorologiques sur la caractéristique de la cellule, nous allons également nous intéresser au fonctionnement de la cellule, l'association des cellules en série et en parallèle pour former le générateur photovoltaïque et on termine par une étude des différents algorithmes MPPT utilisés pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque.

1.2 La conversion photovoltaïque dans le monde

Les réserves des ressources naturelles d'énergies mondiales telles que l'Uranium, le gaz, le pétrole et le charbon par rapport à la demande annuelle sont limités comme l'indique la figure 1.1

Pour répondre au besoin mondial d'énergie, de nouveaux procédés de recherche sur l'énergie alternative sont accentués. L'une des énergies alternatives qui répond à cette demande, pour le moment, est l'énergie solaire. L'énergie solaire est disponible partout sur la planète, à des degrés divers et entièrement renouvelable. Son apport est variable avec les jours et les saisons, mais elle est relativement prévisible.

L'énergie que reçoit la terre est énorme et durable à tel point que l'énergie totale consommée annuellement par le monde entier, est fournie dans un temps aussi court qu'une demi-heure.

Pour une journée ensoleillée, les radiations solaires sur terre atteignent 3000 Watts par mètre carré selon l'emplacement. Sur la figure 1.1, en constatant l'énergie annuelle qu'on reçoit du soleil, il est très clair de dire qu'on doit utiliser cette énorme énergie [3].

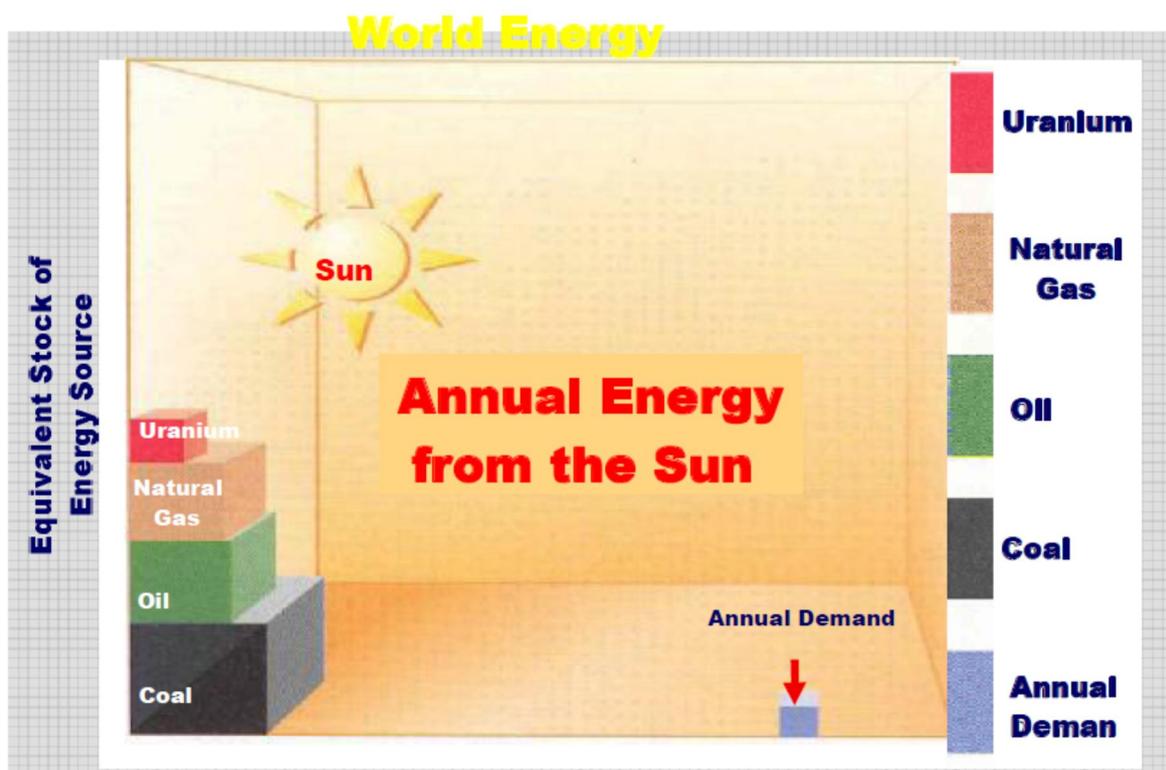


Fig. 1.1. Les réserves d'énergie mondiale par rapport à la demande annuelle

1.2.1 La tendance d'énergie mondiale

Le monde est fortement convaincu par le fait que l'unique énergie alternative à l'énergie naturelle conventionnelle est l'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire.

Par conséquent, la plupart des pays du monde ont introduit l'énergie solaire dans leur politique énergétique. La figure 1.2 montre la tendance mondiale en matière d'énergie, on peut constater sur la figure que pour l'an 2050, environ 50% de la production d'énergie, est de type renouvelable et 25% de cette énergie renouvelable sera de l'énergie solaire.

Pour l'année 2100, environ 90% de la production d'énergie, sera renouvelable, 70 % de ce pourcentage est de type solaire. On se basant sur les deux pourcentages mentionnés précédemment, on peut dire que le marché de production d'énergie s'oriente dans la direction de l'énergie photovoltaïque.

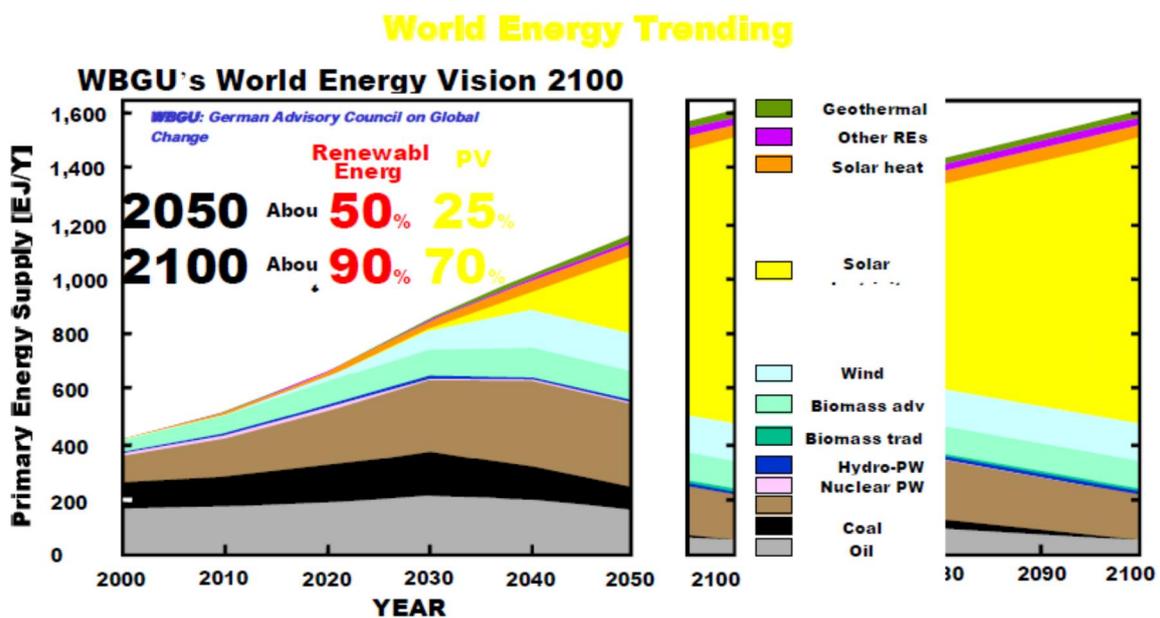


Fig. 1.2. La tendance mondiale en énergie

1.2.2 Les prévision mondiale en photovoltaïque

La demande mondiale en énergie est en croissance rapide. Les ressources naturelles d'énergie sont en décroissance en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire. La figure 1.3 illustre les prévisions du besoin de la demande mondiale d'énergie solaire jusqu'à l'année 2020.

On peut constater sur la figure que l'Asie mène le monde avec 15,7 GW suivie par l'Europe avec 12,7GW et les Etats-Unis avec 8,3 GW. La demande totale en énergie photovoltaïque pour l'année 2020 est estimée à 49GW comme mentionné sur le fond de la figure. En plus des pays mentionnés ci-dessus, cette estimation prend en considération le Japon et le reste du monde [3].

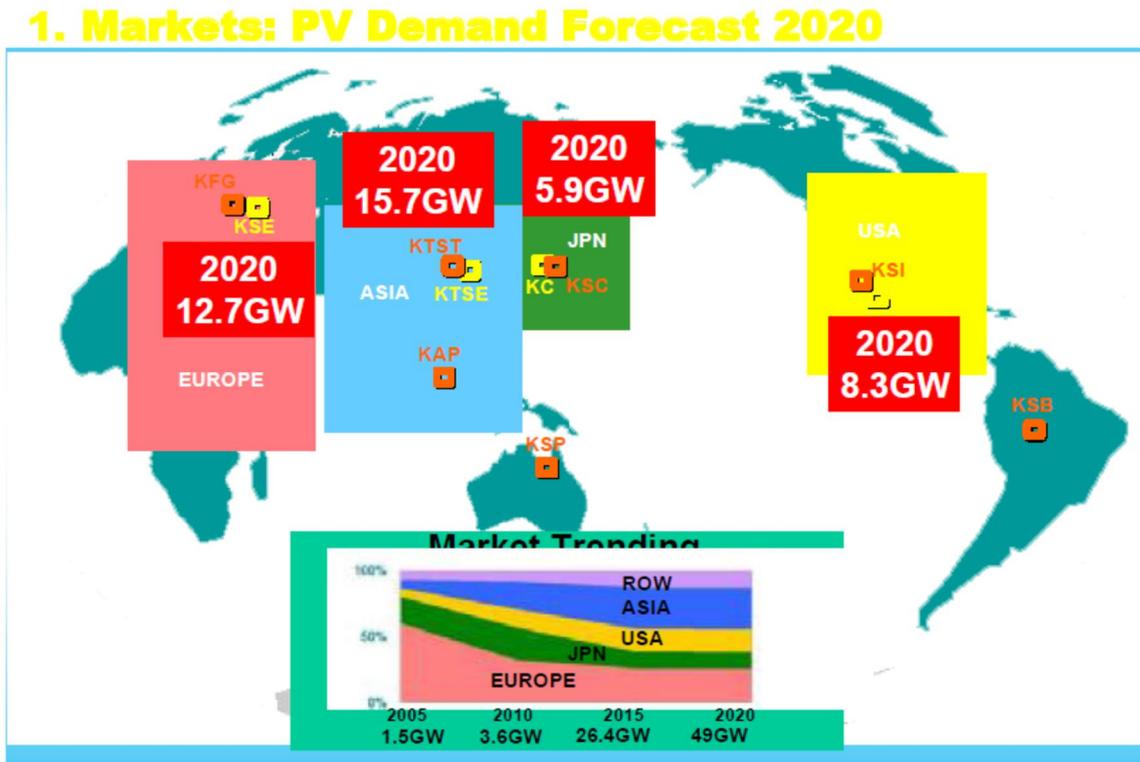


Fig. 1.3. Les prévisions mondiales de la demande en énergie photovoltaïque pour l'an 2020

1.2.3 Quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

a) Les avantages

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:
 - ❖ ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.

- ❖ ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- ❖ ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- ❖ ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ❖ ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant [3].

b) Les inconvénients

- prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt, depuis les années 70 [4].
- rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiation du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte. La figure 1.4 [5] est un exemple de l'irradiation du mauvais temps. L'irradiation commence autour de 6 heures et augmente à la valeur maximale (se rapproche de 900 W/m²) à 12 AM après que 11 AM, l'irradiation flotte parce que le ciel est plus tardif, nuageux et pluvieux. Ensuite l'intensité d'ensoleillement diminue graduellement. Autour 18 h l'ensoleillement est nulle. Le rayonnement du soleil est une source principale pour le système photovoltaïque, ainsi l'exécution du système photovoltaïque dépend de l'intensité d'ensoleillement.
- Rendement: le rendement de la cellule solaire est relativement bas, 15 % [5] pour le silicium monocristallin et 12 % pour le silicium poly-cristal. En conséquence, pour obtenir la grande capacité du générateur solaire, le grand secteur de la cellule solaire et les endroits sont nécessaires. De nouveaux matériels et processus sont recherchés pour remplacer le silicium qui est le matériel principal pour la cellule en silicium mais reste toujours à prix élevé et rendement bas.

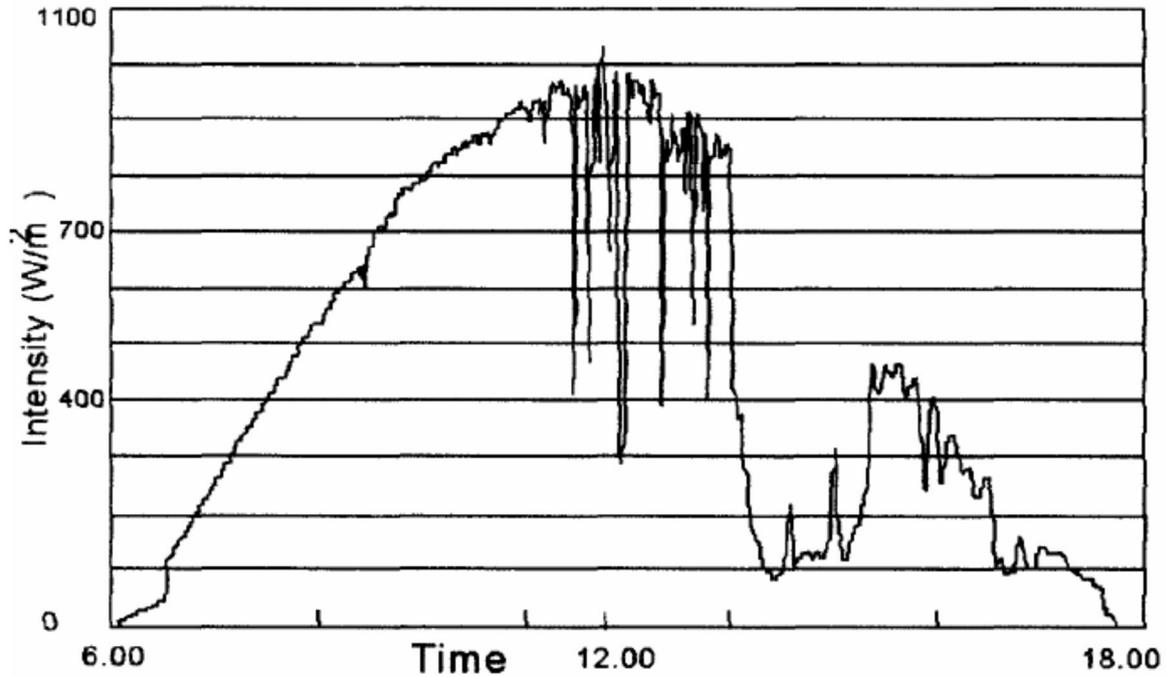


Fig. 1.4. Intensité du rayonnement du soleil en un jour

1.3 Généralités sur les cellules photovoltaïques

1.3.1 Rappel sur les semi-conducteurs

Le semi-conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique.

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron [6].

1.3.2 L'effet photovoltaïque et la jonction PN

Fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de pair d'électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux cotés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule [7][8].

1.3.3 La cellule photovoltaïque

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [6].

La plus répandue est à base de silicium monocristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'effort de recherche considérable visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base du sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium [1].

a) Structure d'une cellule photovoltaïque

La structure de base d'une cellule PV est une jonction PN constituée de la manière suivante : un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone mince dopé N (quelques millièmes de mm). Entre les deux zones se développe une jonction. La zone N est recouverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre [9]

Il est à noter que les cellules Photovoltaïques peuvent être réalisées à partir des diodes Schottky (métal déposé sur un semi-conducteur de type P ou N). Réciproquement, le

fonctionnement d'une jonction P⁺N (dont le semi-conducteur de type P est fortement dopé) est analogue à celui d'une diode Schottky [9].

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. Le dessus et le dessous de la grille de la cellule doivent alors être recouverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée [9].

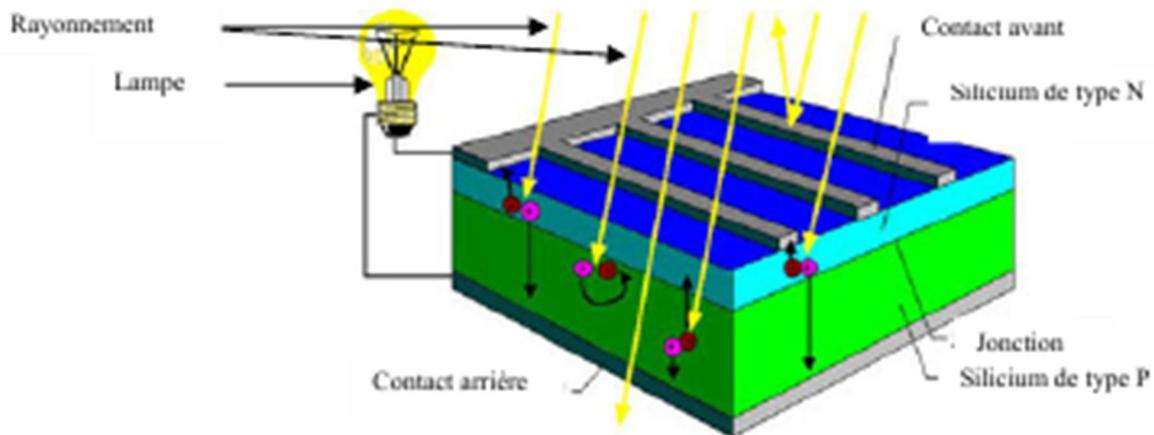


Fig. 1.5. Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN)

b) Caractéristique d'une cellule photovoltaïque $I=f(v)$

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour un modèle à une diode est donnée par l'équation suivante:

$$I(v) = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(v+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Ou :

I_0 : Courant de saturation de la jonction.

T : Température de la jonction °K.

I_{sc} : Courant de court circuit ou photocourant. Il est proportionnel à l'éclairement.

R_s : Résistance série de la jonction.

n : Facteur d'idéalité.

k : Constante de Boltzmann.

q : Charge de l'électron.

La cellule est donc équivalente à un générateur de courant de valeur I_{sc} induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction PN du semi-conducteur figure

1.6 [7]. Les caractéristiques « courant-tension » et « puissance- tension » de la cellule sont illustrées dans la figure 1.7 et figure 1.8 respectivement.

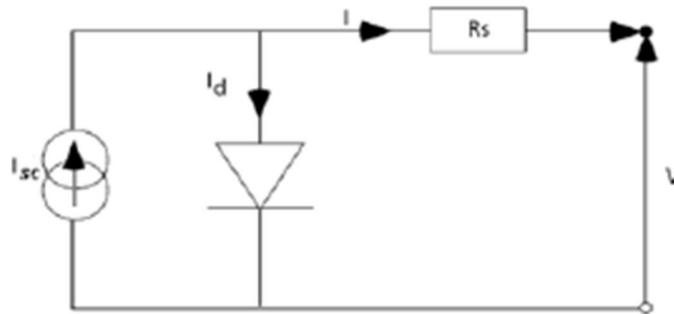


Fig. 1.6. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est égal à :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (1.2)$$

Où P_i est la puissance solaire incidente, P_m puissance maximale de la cellule.

La caractéristique courant-tension passe par trois points importants :

Le point V_{oc} : tension de circuit ouvert.

Le point I_{sc} : courant de court-circuit.

Le point MPP : (maximum power point) point de puissance maximale PPM.

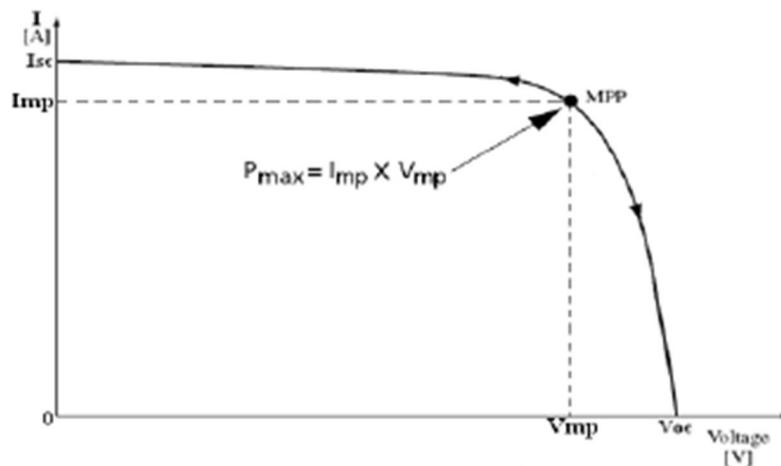


Fig. 1.7. Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

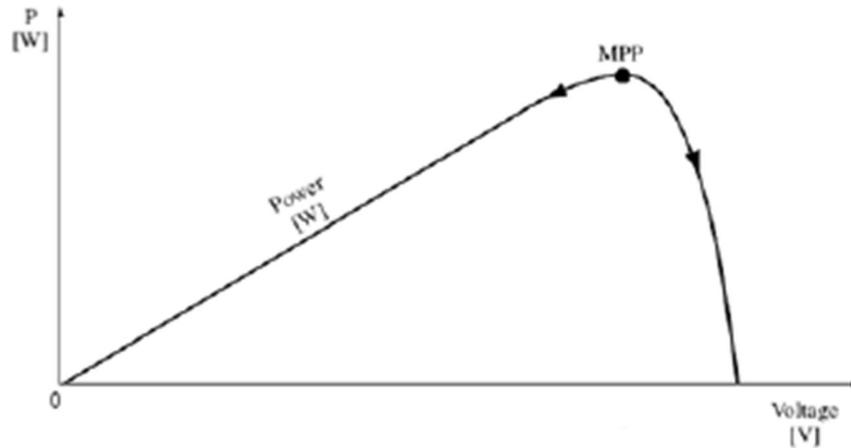


Fig. 1.8. Caractéristique tension-puissance d'une cellule solaire

c) L'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques de la cellule

Le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire. Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P-N du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc :

- la puissance optimale de la cellule P_m est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension. (figure.1.9).

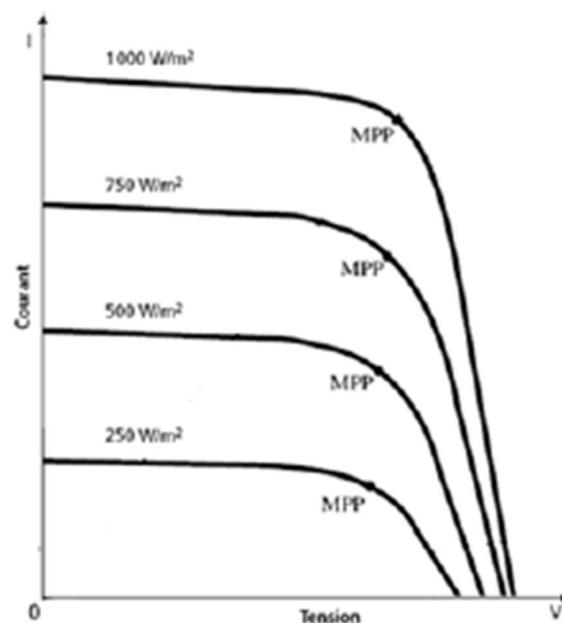


Fig. 1.9. Influence de l'éclairement sur la caractéristique de la cellule

d) L'effet de la température sur les caractéristiques de la cellule

La température est un paramètre important dans le comportement d'une cellule solaire, exposée à une irradiation de $1\text{kw}/\text{m}^2$ elle n'en transforme que 12% en électricité. Si la cellule n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader. La figure 1.10 montre l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension de la cellule. Lorsque la température augmente, le courant augmente alors que la tension décroît. Cela se traduit par une baisse de la puissance.

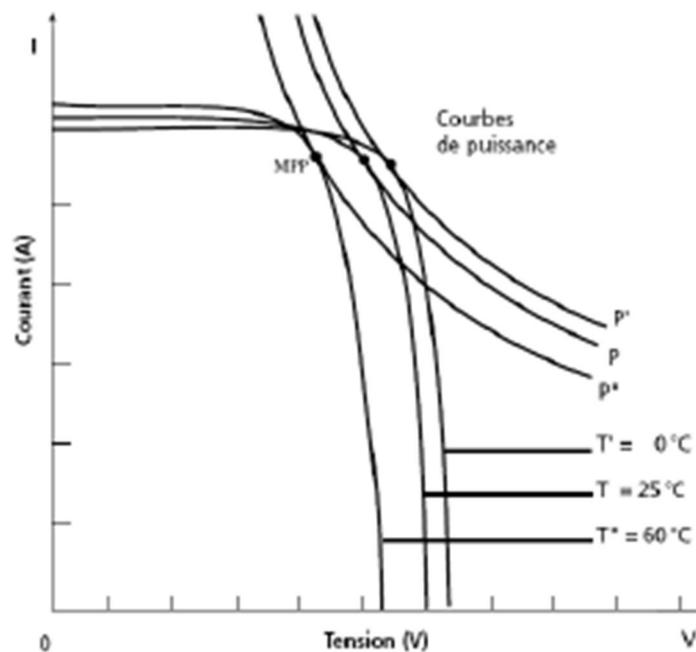


Fig. 1.10. Influence de la température sur la caractéristique de la cellule

e) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, ou jonction de type PN, absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et à celles des semi-conducteurs. Dans la zone de déplétion de la cellule PV, lorsque l'énergie du rayonnement ($h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, C : vitesse de la lumière et λ : longueur d'onde) est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous libres sont créées dans cette zone de déplétion, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors

un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule PV[9].

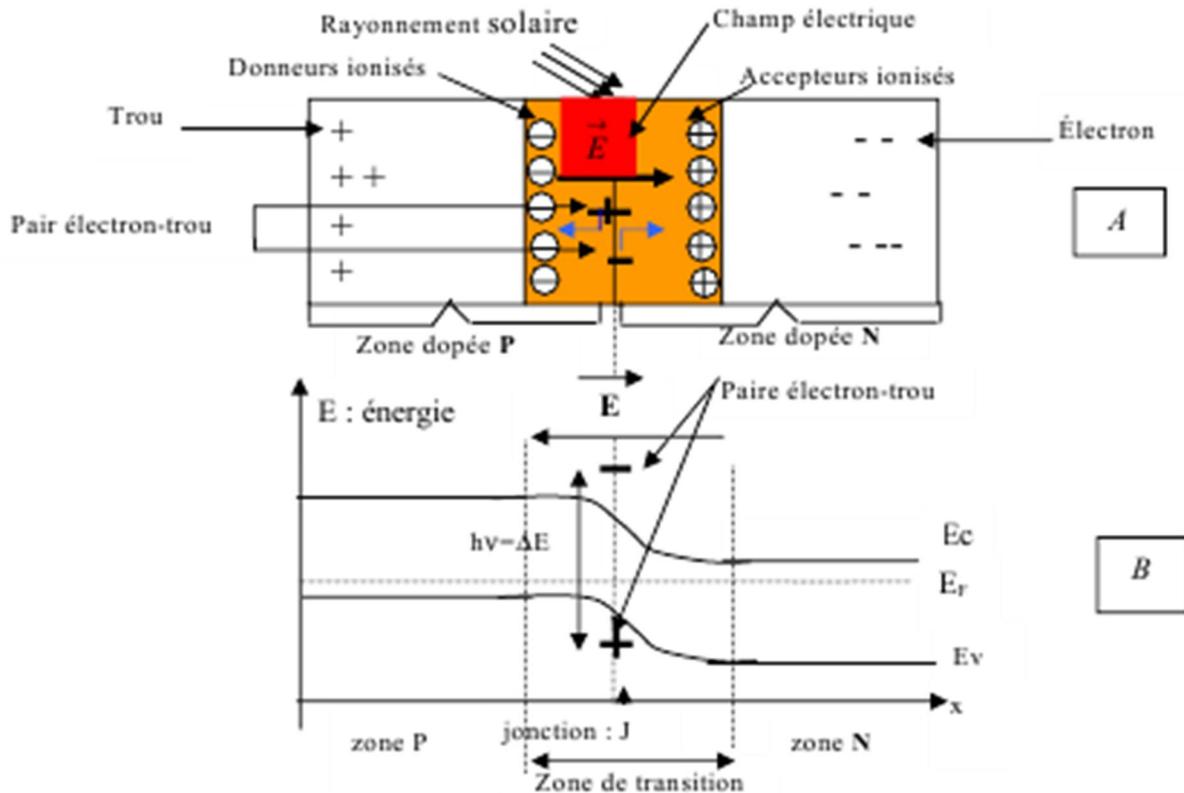


Fig. 1.11. Jonction PN éclairé

A) coupe transversale d'une jonction PN éclairée.

B) Diagramme de bandes d'énergie d'une jonction PN éclairée.

Si on place une charge non nulle et non infinie aux bornes de la cellule photovoltaïque (photodiode), on se trouve dans un cas intermédiaire entre la situation en court-circuit et celle du circuit ouvert. Le courant va se répartir entre la charge extérieure et la diode. Il en résultera une tension de travail inférieure à la tension de circuit ouvert.

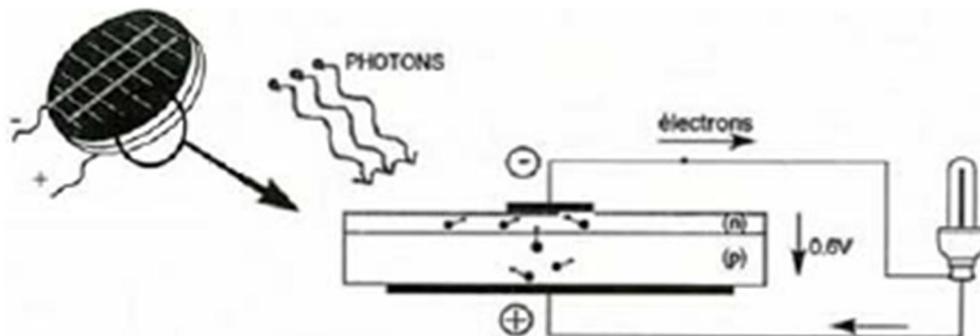


Fig. 1.12. Principe d'une cellule photovoltaïque

Une caractéristique fondamentale des photodiodes est que pour une irradiation et une température données, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe $I=f(v)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes de la photodiode qui va déterminer le point de fonctionnement. La figure (Fig. 1.13) montre en particulier que fermée sur une charge de résistance, la cellule ne cèdera qu'une puissance P bien inférieure à la puissance optimale P_{op} qu'elle pourrait débiter [6].

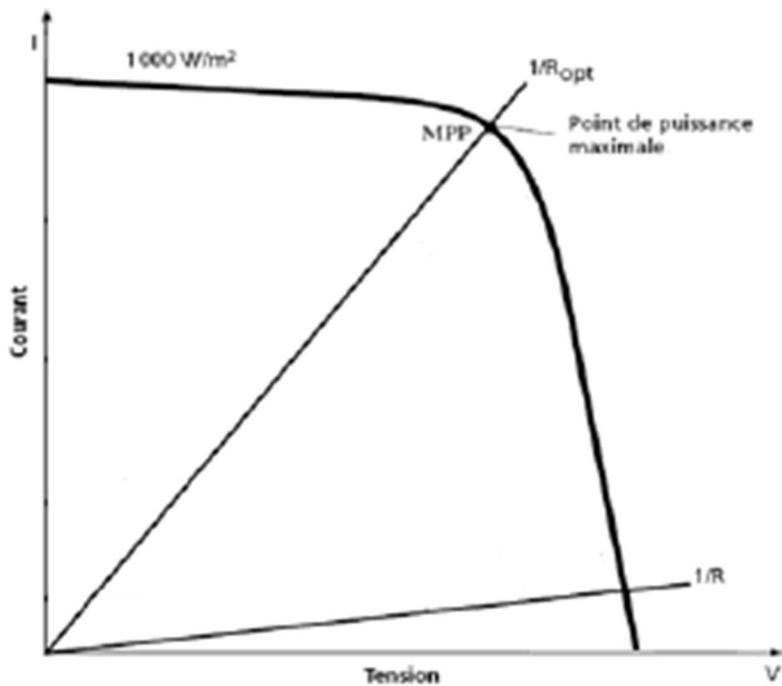


Fig. 1.13. Courbe d'une photodiode débitant sur une charge R et une charge optimale R_{op}

1.3.4 Le Module Photovoltaïque

Le module photovoltaïque se compose d'un certain nombre de cellules solaires, qui est installé en série et en parallèle dans une armature comme est représenté sur la figure 1.19.

Comme le module se compose de groupe de cellules, le modèle d'un module photovoltaïque est basé sur le modèle de cellule solaire. Un nombre important de techniques ont été employés pour simuler la cellule solaire et chaque technique possède une certaine simplification et particularité des applications [3].

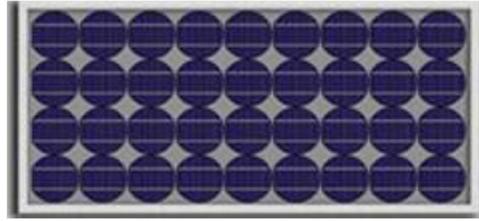


Fig. 1.14. Module photovoltaïque

a) Association de cellules en série

La tension générée par une photopile est limitée à la valeur du gap du matériau duquel elle est issue. Pour obtenir une tension compatible, on doit assembler les photopiles en série. Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La caractéristique $I=f(v)$ est homothétique de celle de la cellule de base. La figure 1.15 présente la caractéristique du groupement [6].

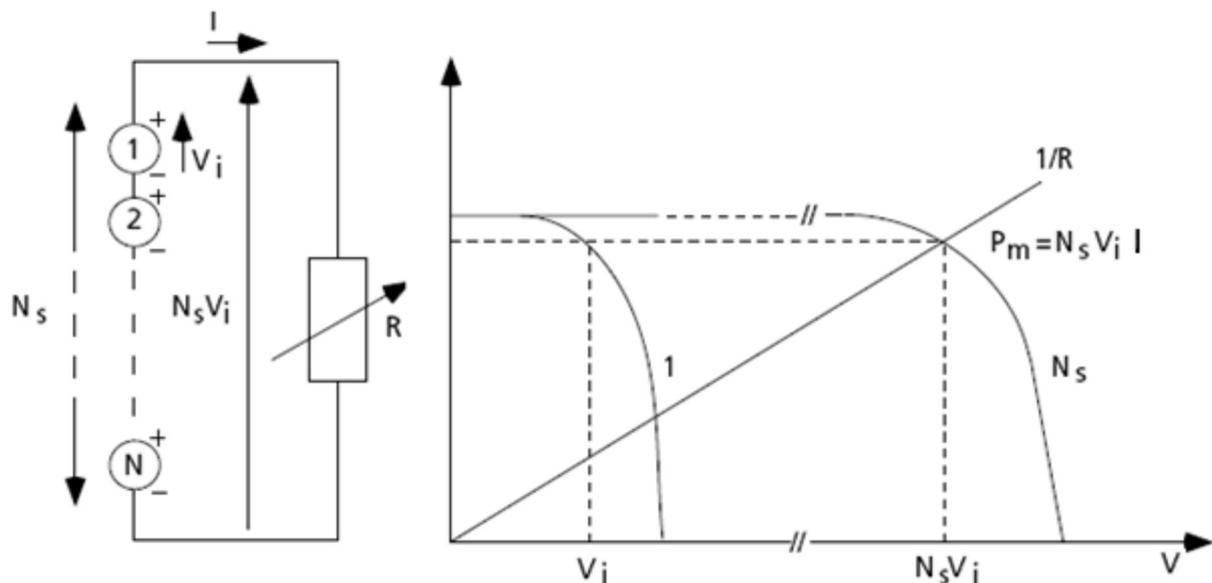


Fig. 1.15. Groupement de cellules en série

b) Association de cellules en parallèle

Dans ce cas c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutent, la caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de la tension, le courant de la cellule élémentaire par le nombre de cellule en parallèle. La figure 1.16 présente la caractéristique du groupement [6].

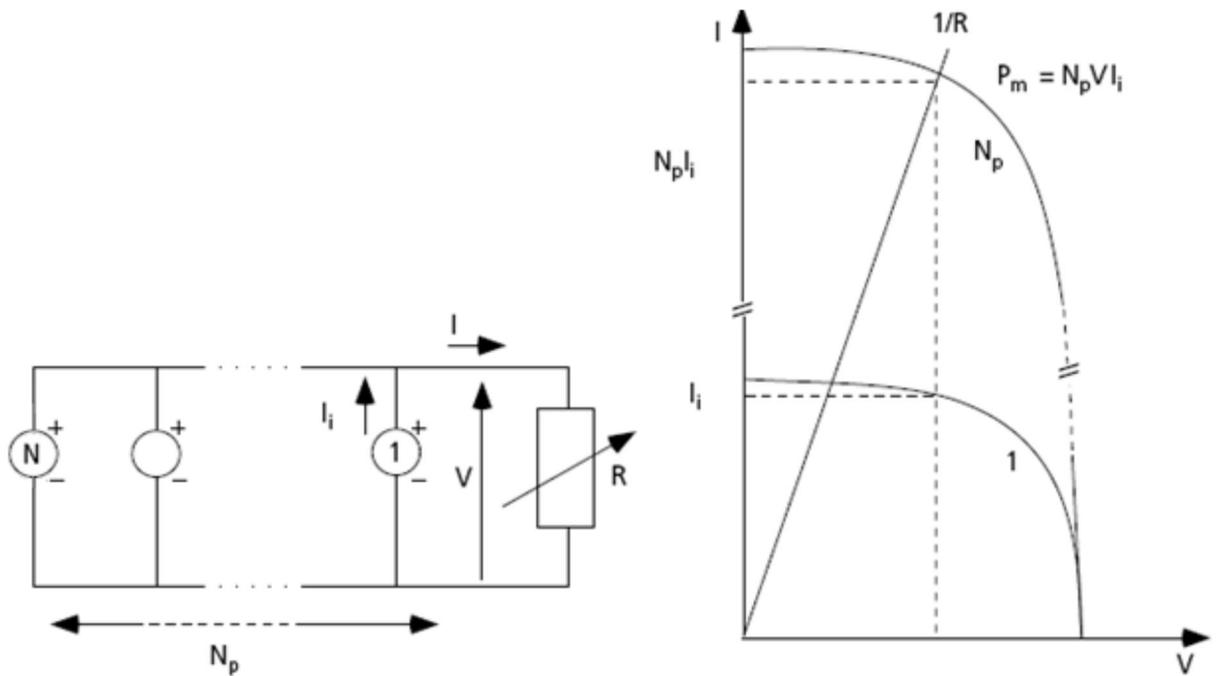


Fig. 1.16. Groupement de cellules en parallèle

1.4 Le Générateur Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires) [6].

La performance du générateur dépend de la variabilité des modules que comprend le générateur et les cellules comprises par les modules.

La tension de sortie du générateur photovoltaïque dépend du nombre de modules en série alors que le courant de sortie dépend du nombre de modules en parallèle [3]. La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier. L'ensemble intégré des modules photovoltaïques ainsi que la structure de soutènement est défini comme rangée photovoltaïque, voir figure 1.17 [6].

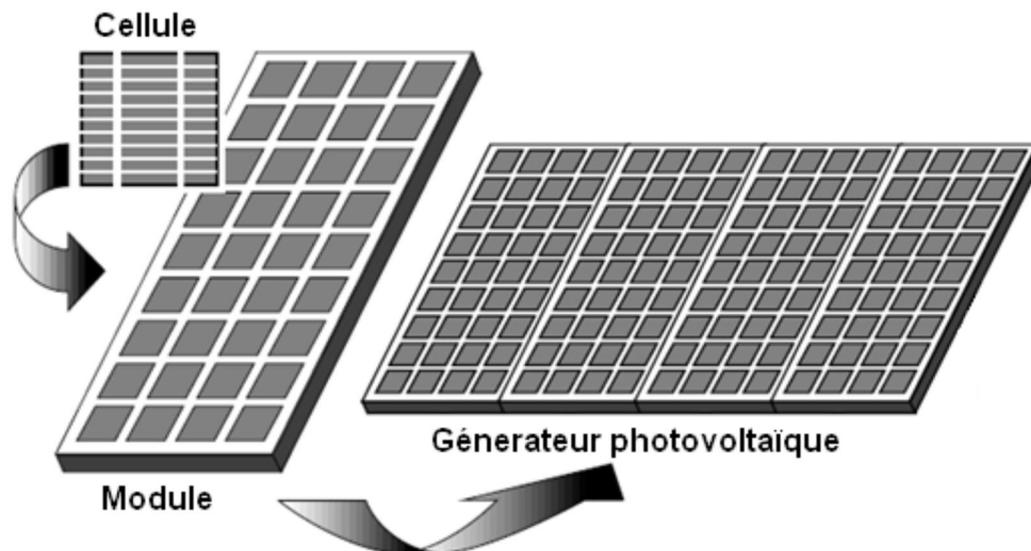


Fig. 1.17. Composantes d'un générateur photovoltaïque

1.4.1 Protection des générateurs photovoltaïques

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure 1.18) :

- ❖ la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- ❖ les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure 1.19 par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

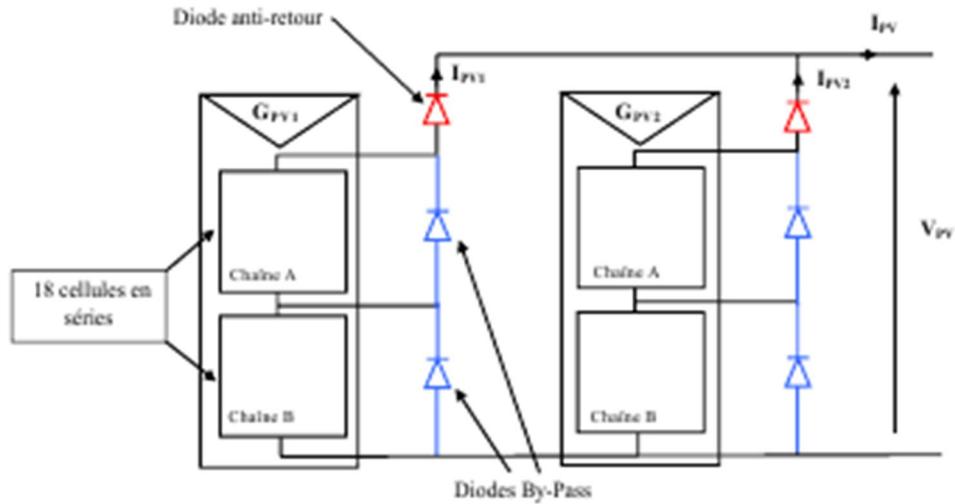


Fig. 1.18. Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections

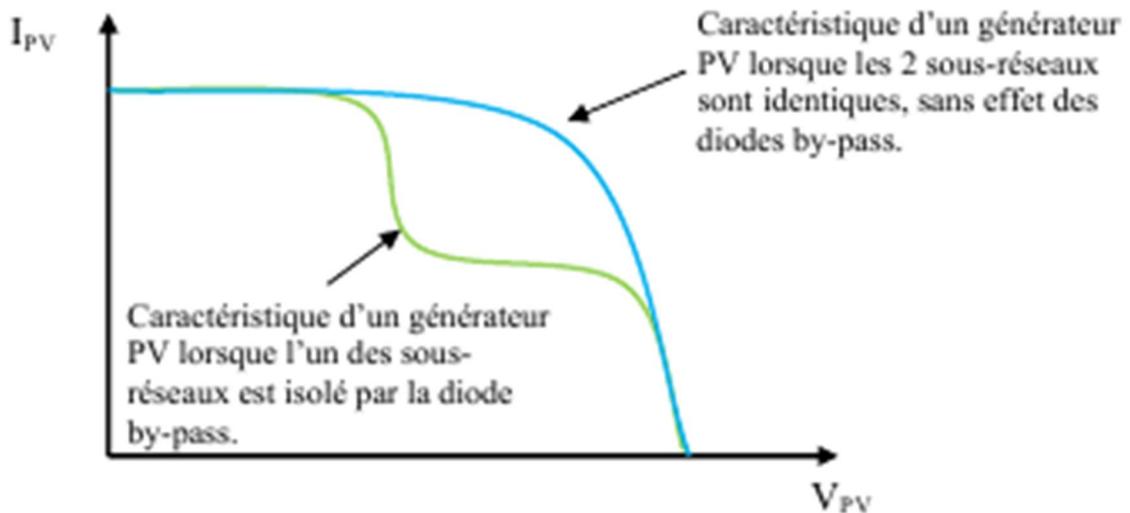


Fig. 1.19. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

1.4.2 Modélisation du panneau photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du générateur photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes), ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des

performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte.

Le modèle utilisé dans ce travail se base sur le modèle proposé dans les travaux de (A. Bellini et al 2006) [10]. C'est un modèle simplifié, exacte et amélioré des modules photovoltaïque qui ne demande aucune méthode numérique. En plus il fait appelle seulement aux paramètres fournis par les constructeurs dans les fiches techniques des modules photovoltaïques.

L'expression du courant d'un module photovoltaïque I_{pv} en fonction de la tension de sortie du module V_{pv} est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = n_p I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{V_{pv}}{n_s C_2 V_{oc}}} - 1)] \quad (1.3)$$

Avec :

$$I_{sc} = (I_{scr} + k_I (T - T_r)) \frac{L}{L_{ref}}$$

$$V_{oc} = V_{ocr} - k_v (T - T_r)$$

I_{sc} : Courant de court-circuit à la température T.

I_{scr} : Courant de court-circuit à la température de référence T_r .

V_{oc} : Tension de circuit ouvert à la température T.

V_{ocr} : Tension de circuit ouvert à la température T_r .

V_{pv} : Tension à la sortie du panneau PV.

k_I : Coefficient de température.

Les constantes C_1 et C_2 sont exprimées par :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) e^{\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}} \quad ; \quad C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}$$

I_{mp} est le courant de puissance maximale.

V_{mp} est la tension de puissance maximale.

1.4.3 Le modèle Simulink et simulation du GPV

Sur la base du modèle mathématique du générateur photovoltaïque développé dans le sous paragraphe précédent, le bloc schématique de Simulink est montré sur la figure 1.20 pour une insolation et une température données. Le même bloc schématique de Simulink peut être employé pour plusieurs insolation et températures.

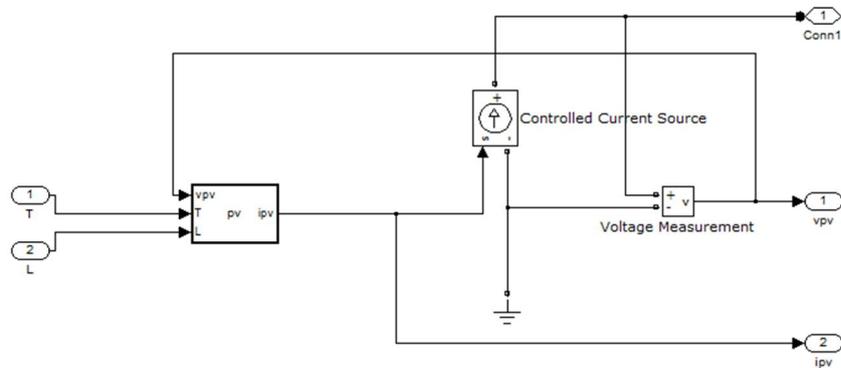


Fig. 1.20. Le modèle Simulink du générateur photovoltaïque

Les résultats de simulation du bloc Simulink sont montrés sur les figures 1.21 et 1.22. La figure 1.21 représente les caractéristiques I-V du générateur de photovoltaïque et La figure 1.22 illustre les caractéristiques de P-V du générateur photovoltaïque.

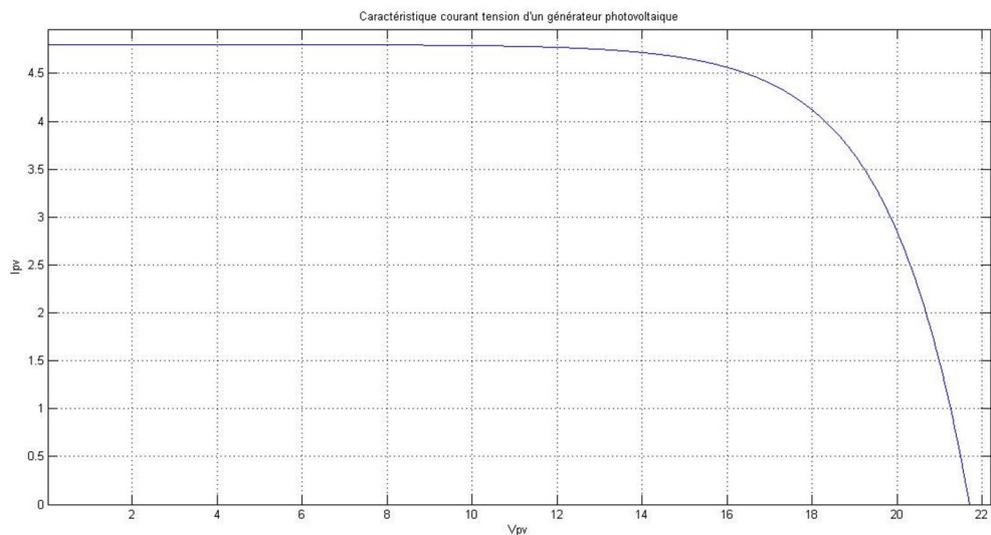


Fig. 1.21. Caractéristiques I-V du générateur photovoltaïque

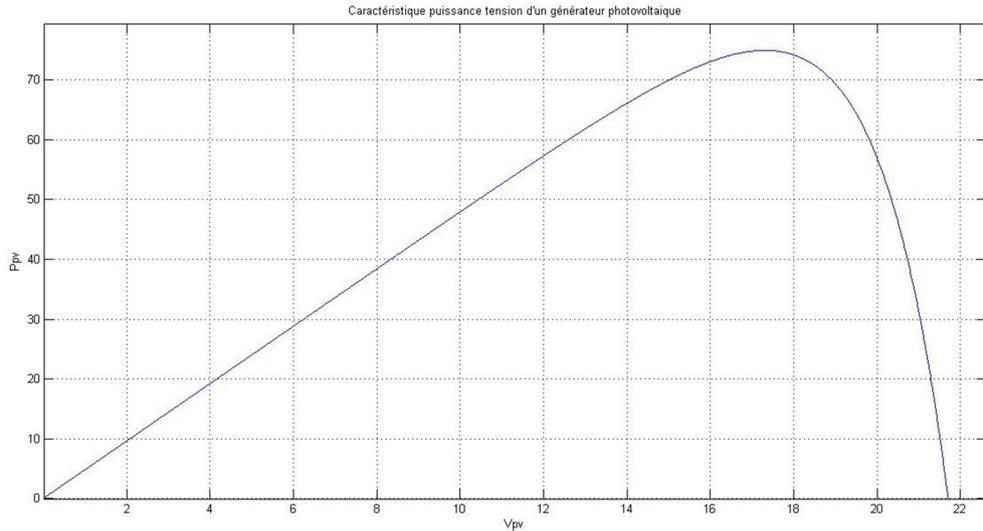


Fig. 1.22. Caractéristiques P-V du générateur photovoltaïque

Les figures 1.23 et 1.24 présentent la caractéristique I-V et la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de paramètres météorologiques (ensoleillement et température).

Comme on peut voir sur la figure, la variation simultanée des paramètres météorologiques induit une variation simultanée de la tension V_{co} et du courant I_{sc} se qui mène à une variation aléatoire du PPM. D'où le comportement de la cellule photovoltaïque est aléatoire donc un décroissement du rendement.

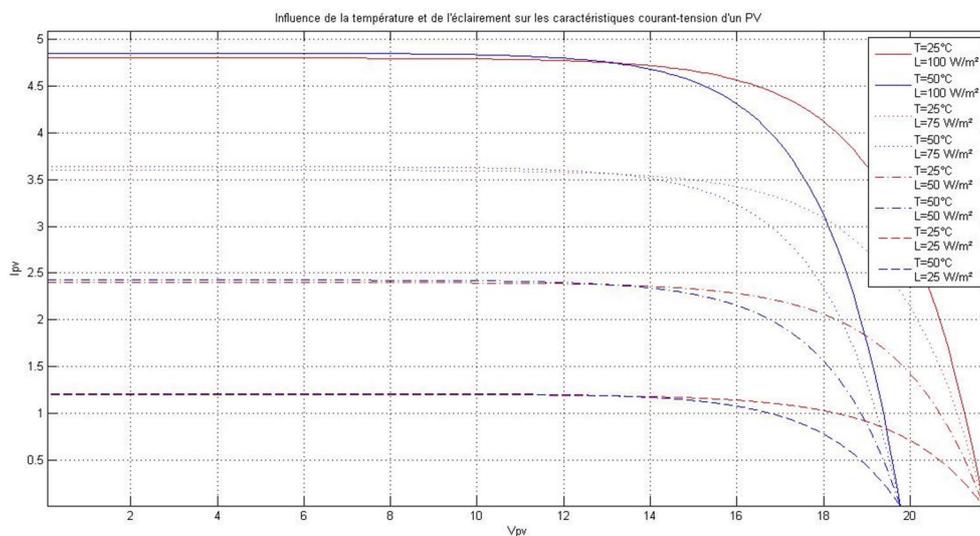


Fig. 1.23. Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension d'un PV

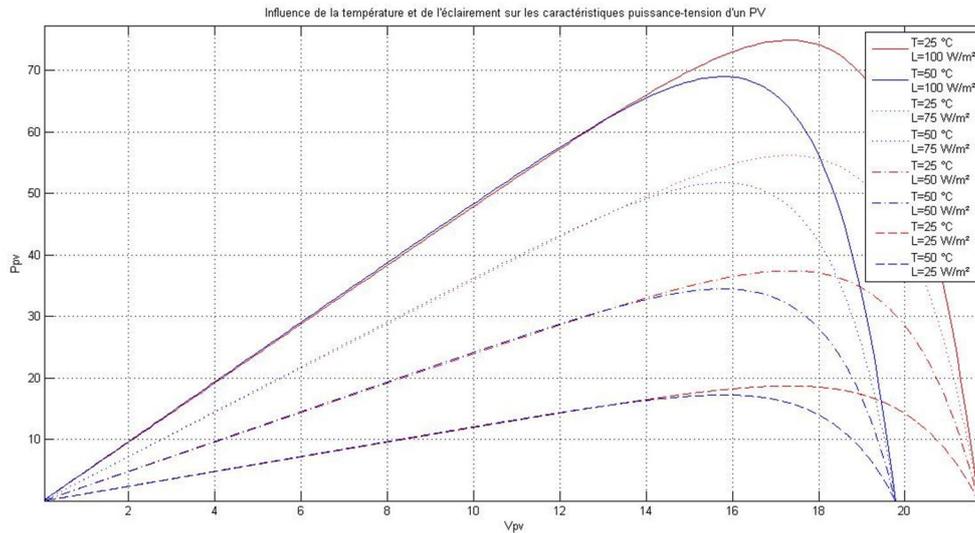


Fig. 1.24. Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un PV

1.5 Le MPPT (Maximum Power Point Tracking)

La Poursuite du point de puissance maximale, ou le MPPT (Maximum Power Point Tracking), est un mécanisme de control de poursuite qui est utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le générateur, en poursuivant continuellement le point de puissance maximale. Sachant que la caractéristique de générateur photovoltaïque dépend de l'ensoleillement et de la température. Le point de puissance maximal n'est pas évident à atteindre. La figure 1.25 montre une vue générale d'un système photovoltaïque doté d'un contrôleur MPPT [10].

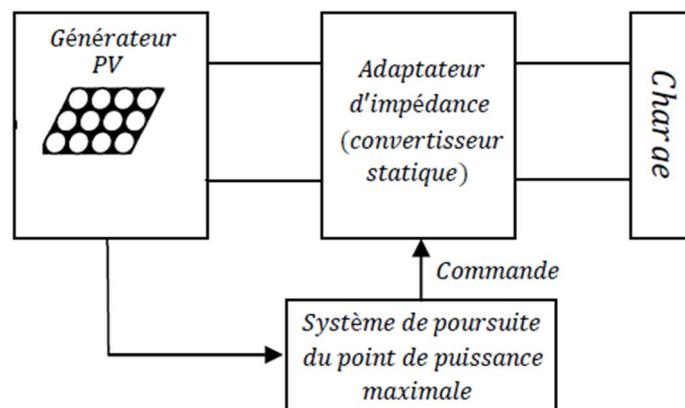


Fig. 1.25. Vue Générale d'un système photovoltaïque doté d'un MPPT

Plusieurs publications sur des méthodes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature. On peut les classer en :

1.5.1 Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes se basent sur des algorithmes de recherche itérative qui permettent de trouver le point de fonctionnement maximal du générateur sans interruption du système. La puissance extraite du générateur est calculée à partir des mesures du courant et de la tension, la multiplication de ces deux grandeurs donne la puissance. Le sens de variation de la puissance est connu par le calcul approximatif de la dérivée $dP=P(k)-P(k-1)$ sur un temps d'échantillonnage [10].

Algorithme P&O (Perturb and Observe)

C'est l'algorithme le plus utilisé car il est relativement simple à implémenter. Le principe de cet algorithme consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi comme l'illustre la figure suivante, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît [11].

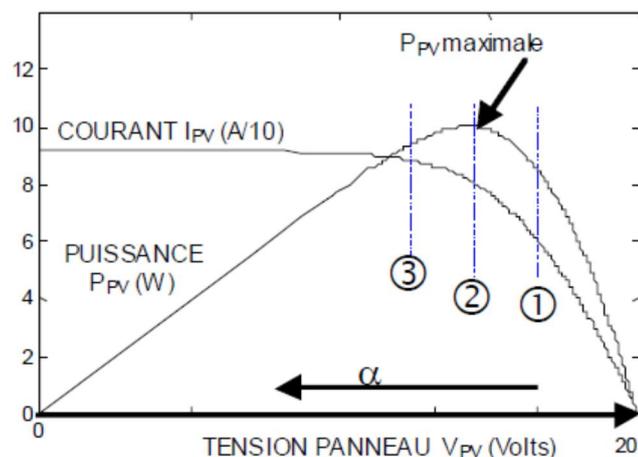


Fig. 1.26. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$

L'organigramme de cette commande est représenté par le schéma suivant [11] :

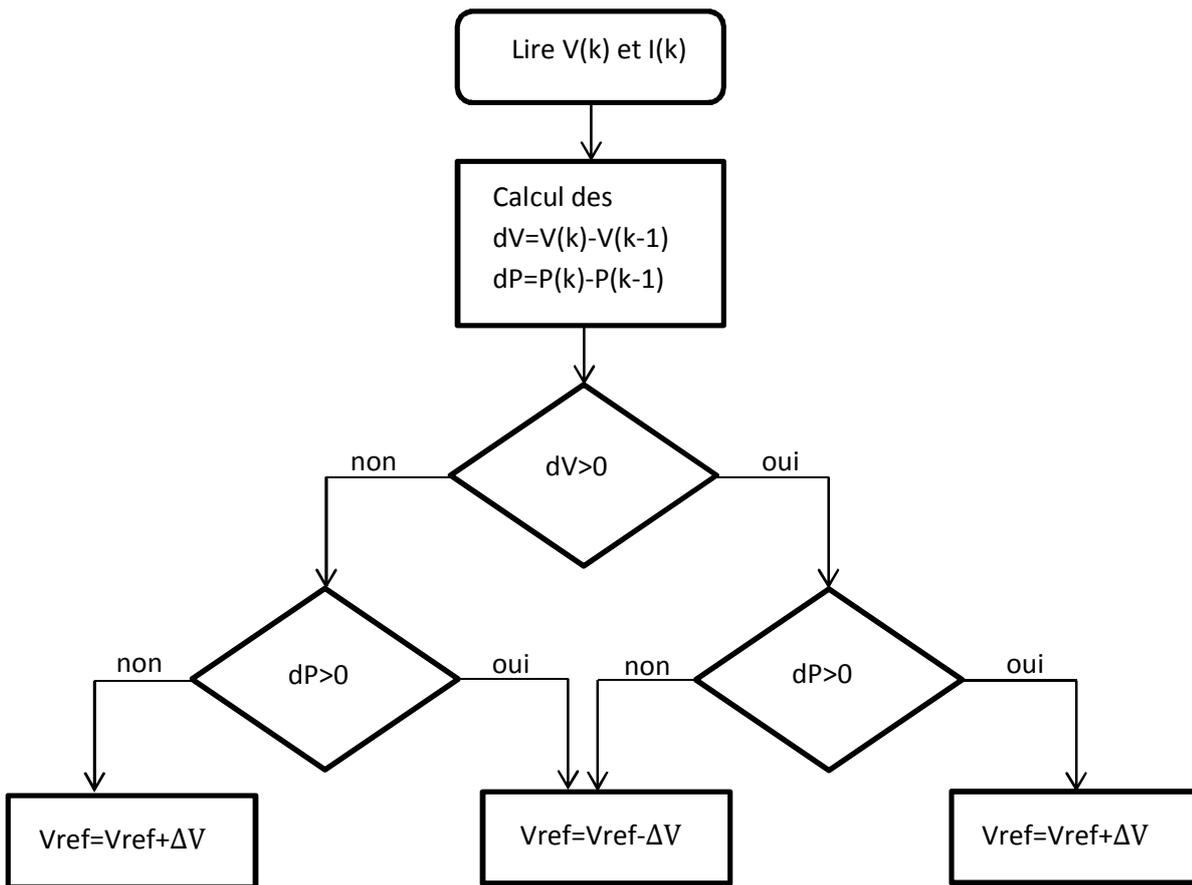


Fig. 1.27. L'organigramme de la commande MPPT en utilisant l'algorithme Perturb & Observe

L'algorithme d'inductance incrémentale

Dans cette partie, pour alléger les notations, on note V, I, P les grandeurs relatives au générateur photovoltaïque.

Notant I/V : la conductance et dI/dV la conductance incrémentale.

Le maximum de puissance (MPP) est obtenu lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \tag{1.4}$$

Comme l'illustre la figure suivante (1.28). À gauche du MPP , dP/dV est positive et négative de l'autre côté. Comme $P=I.V$, le calcul différentiel donne :

$dP=V.dI + I.dV$, soit au MPP :

$$\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1.5)$$

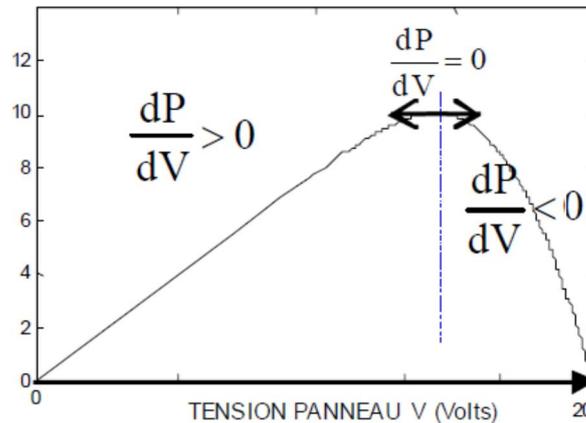


Fig. 1.28. Comportement en boucle ouverte et en boucle fermé du convertisseur

On montre que : $\frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} > 0$

Numériquement, à partir des mesures de $I(n)$, $I(n-1)$, $V(n)$, $V(n-1)$, et en supposant que $dI \approx \Delta I = I(n)-I(n-1)$ et $dV \approx \Delta V = V(n)-V(n-1)$, on peut calculer $I/V+dI/dV$ et en déduire la direction du MPP par rapport au point de fonctionnement présent (et dans une moindre mesure la distance au MPP). La direction de convergence est donc toujours connue, ce qui est un avantage par rapport à la technique Perturb & Observ présenté précédemment. Toutefois cette méthode pose des problèmes (répercussion des bruits de mesures dans les calculs, division par zéro ...)

La figure 1.29 ci-après montre l'algorithme de mise en œuvre d'une telle commande [10].

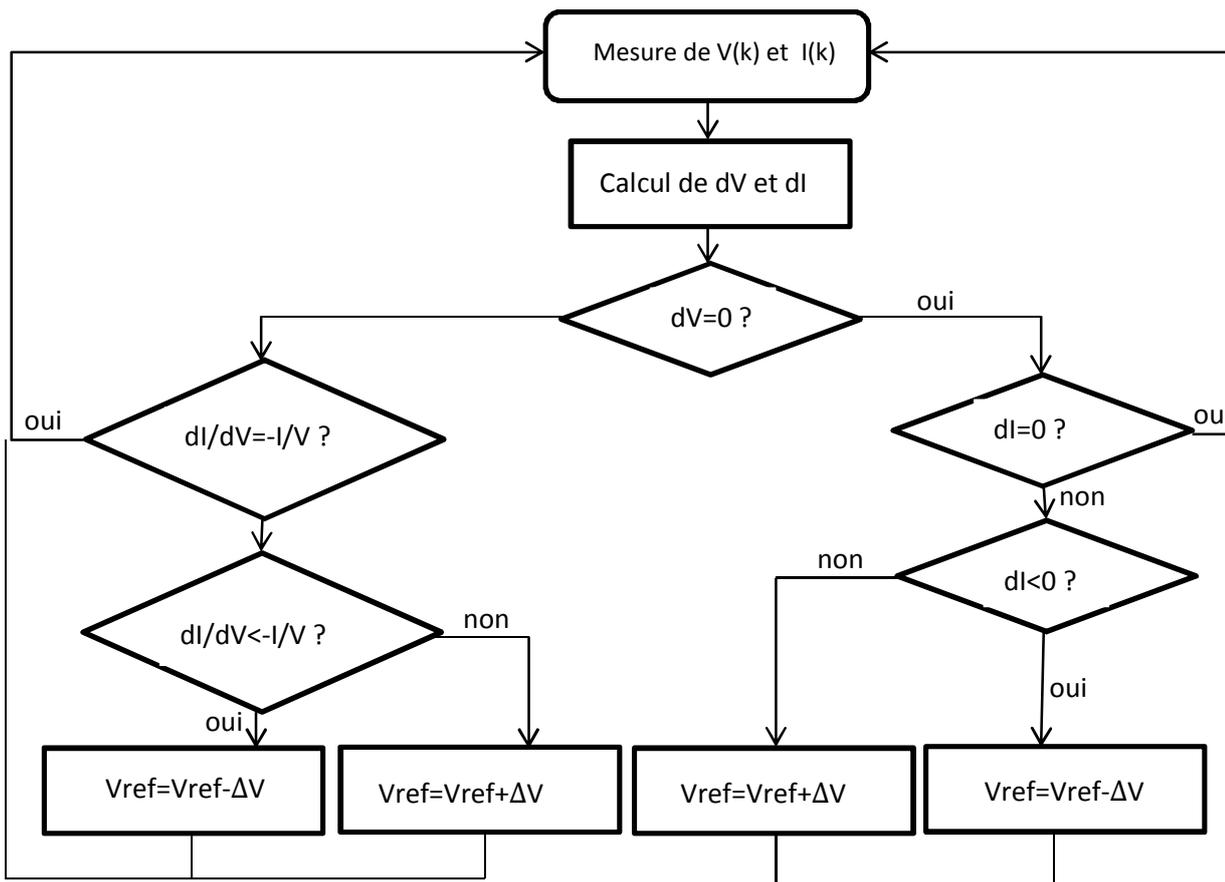


Fig. 1.29. L'organigramme de la commande MPPT en utilisant l'algorithme d'inductance incrémentale

1.5.2 Méthodes à contre réaction de tension

Cette méthode se base sur l'asservissement de la tension du générateur à une tension de référence. En fonction de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) cette méthode comporte trois sortes.

Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode résulte du fait que la tension des photopiles à la puissance maximale est en première approximation constante lorsque l'éclairement varie. Par conséquent il suffit de

maintenir constante la tension au borne du générateur quel que soit l'éclairement, et de faire corriger cette tension en fonction de la température [10].

Méthode à tension de référence en fonction de V_{oc}

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert V_{oc} ($V_{mp}=k_1*V_{oc}$) du générateur (panneau). Cette tension est prélevée régulièrement par le débranchement du générateur pour une courte durée afin d'ajuster la tension de référence. Le coefficient k_1 est pris dans l'intervalle 0.71-0.78. [10].

Méthode à tension de référence externe (cellule pilote)

Cette méthode fait appel au même principe que la précédente, dans ce cas l'estimation de la tension V_{oc} est réalisé par l'ajout d'une cellule pilote a l'ensemble de l'installation, cette cellule donne continuellement une information implicite sur la tension en circuit ouvert de l'ensemble. De même que les autres méthodes, la tension V_{mp} est estimée à partir de la tension V_{oc} . [10]

1.5.3 Méthodes à contre réaction du courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension, le courant de court-circuit du générateur permet de savoir la valeur du courant optimale qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court-circuit ($I_{mp}=k_2*I_{sc}$). Le coefficient k_2 est généralement entre 0.78 et 0.92 [12].

1.5.4 Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT

Ces méthodes sont en général des techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de contrôle des MPPT. Parmi lesquels, on peut citer les commandes MPPT par réseaux de neurones et par logique floue [10].

1.6 Conclusion :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température).

L'association de cellules en série et en parallèle donne lieu aux générateurs photovoltaïques, qui sont utilisés pour l'alimentation électrique.

La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, et l'étude de l'influence de la température et de l'éclairage sur la courbe $I=f(V)$ et $P=f(V)$ permettent de connaître son comportement pour un meilleur suivi de la poursuite du point de puissance maximal (augmenter le rendement) et pour une meilleure simulation du système photovoltaïque.

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite du PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

CHAPITRE 2

Les convertisseurs multicellulaires

2.1 Introduction

Au début des années 90, l'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne tension/moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement les domaines de l'industrie et de la traction (locomotives 3kV, variateurs de vitesse 4.5kV pour l'industrie et pour la propulsion de navires électriques), mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique, de distribution et de transmission.

Cette augmentation incessante des niveaux de puissance mis en jeu s'est traduit par une hausse des niveaux de tension et de courant, et a nécessité le développement de semi-conducteurs de plus en plus performants. Néanmoins, malgré des avancées significatives, l'évolution des possibilités de ces derniers est lente à l'heure actuelle par rapport au marché de la demande, notamment au niveau des calibres en tension disponibles.

En parallèle, de nombreuses études ont été menées pour concevoir de nouvelles structures de conversion d'énergie. Basés sur l'association de structures élémentaires, ces convertisseurs constituent des solutions attrayantes pour les applications moyennes tension/fortes puissance.

Ainsi, un grand nombre d'applications en électronique de puissance combinent de nos jours les derniers développements en matière de semi-conducteurs moyenne tension avec des structures de conversion d'énergie innovatrices et des commandes avancées. [13]

2.2 Structure de conversion multiniveaux

Les structures de conversion d'énergie multiniveaux reposent sur les associations de semi-conducteurs de puissance et pour certaines topologies de leurs connexions en série.

Cette section est consacrée à la présentation du fonctionnement, de la commande et des particularités des principales structures de conversion d'énergie multiniveaux : le convertisseur en cascade, le convertisseur clampé par le neutre et le convertisseur multicellulaire série. [2]

2.2.1 Présentation des principales structures multiniveaux

Associations de convertisseurs (exemple pont en H)

Une des premières possibilités pour fabriquer une onde à plusieurs niveaux est simplement d'utiliser une association d'éléments simples de conversions. On associe alors en série des convertisseurs monophasés en pont complet comme montré en figure 2.1

On effectue en sortie la somme des tensions fournies par chacun des convertisseurs. Dans l'exemple proposé, chaque convertisseur élémentaire peut fournir trois niveaux de tensions $\{E, 0, -E\}$. L'ensemble nous donne alors accès à n niveaux de tension $\{E.(n-1)/2, E.(n-3)/2, \dots, E, 0, -E, -E.(n-3)/2, -E.(n-1)/2\}$ en prenant en compte les redondances.

De fonctionnement simple et robuste, cette topologie souffre d'un inconvénient majeur qui est de nécessiter des sources de tension V_{DC} isolées, donc un transformateur relativement coûteux. Malgré ces inconvénients, on trouve cette solution au niveau industriel grâce à une optimisation du dimensionnement du transformateur.

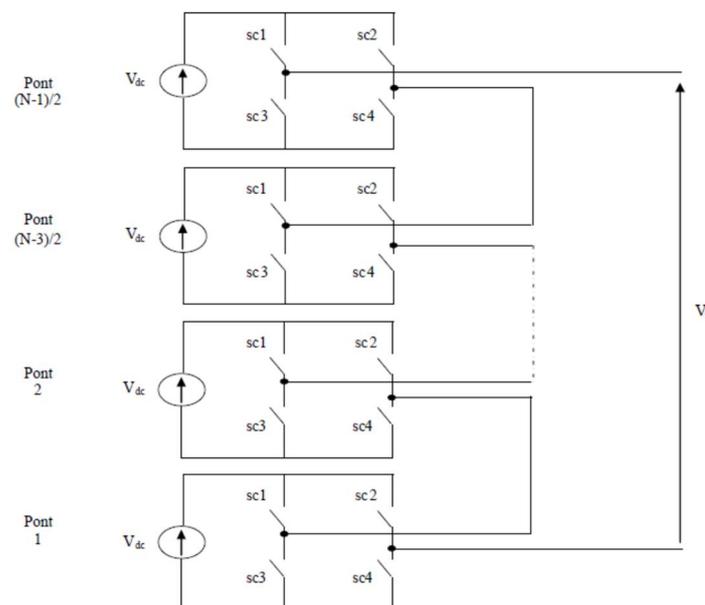


Fig. 2.1. Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

Association de sources en entrée : NPC

On peut ensuite directement travailler sur la structure de conversion plutôt que d'envisager une association de convertisseurs élémentaires. La première possibilité consiste à fractionner le bus continu en entrée et d'ajouter ensuite un aiguilleur qui permettra de délivrer le niveau de tension désiré.

La structure très largement répandue dans le monde industriel répondant à ces caractéristiques est le convertisseur NPC (neutre clampé) avec des versions ensuite plus évoluées comme le active NPC ou le ANPC 5 niveaux.[14]

Ce type de convertisseur représenté en figure 2.2 pour sa forme la plus utilisée, permet d'obtenir trois niveaux de tension en sortie et divise la contrainte en tension sur chaque interrupteur par 2.

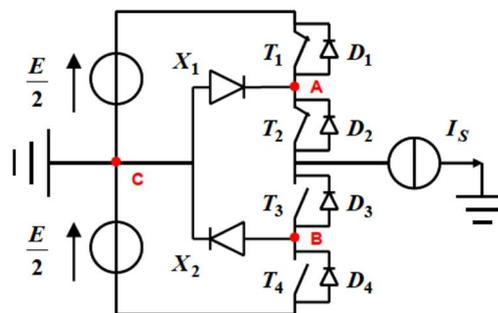


Fig. 2.2. Onduleur NPC trois niveaux

Deux diodes permettent de s'assurer que les contraintes en tension sur les interrupteurs de puissance sont respectées. Des versions récentes de cette topologie appelée ANPC (*Active NPC*) permettent d'optimiser la répartition des pertes en privilégiant certaines séquences plutôt que d'autres.

Il est à noter que cette structure est difficilement généralisable, d'une part à cause de la complexité du circuit de clamp au-delà de trois niveaux et d'autre part à cause des problèmes d'équilibrage des sources primaires lorsque l'on a plus de 2 sources.

Association de sources flottantes : le multicellulaire ou cellules imbriquées

Au début des années 90, une nouvelle structure de convertisseurs multiniveaux a été inventée. Cette structure est basée sur la mise en série de cellules de commutation entre lesquelles une source de tension flottante est insérée. Ces sources de tension flottantes sont réalisées par des condensateurs. La structure multicellulaire série peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur (avec un point milieu capacitif), en demi pont ou en pont complet. La figure 2.3 montre le schéma d'un bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux, constitué de $p=N-1$ cellules. [15]

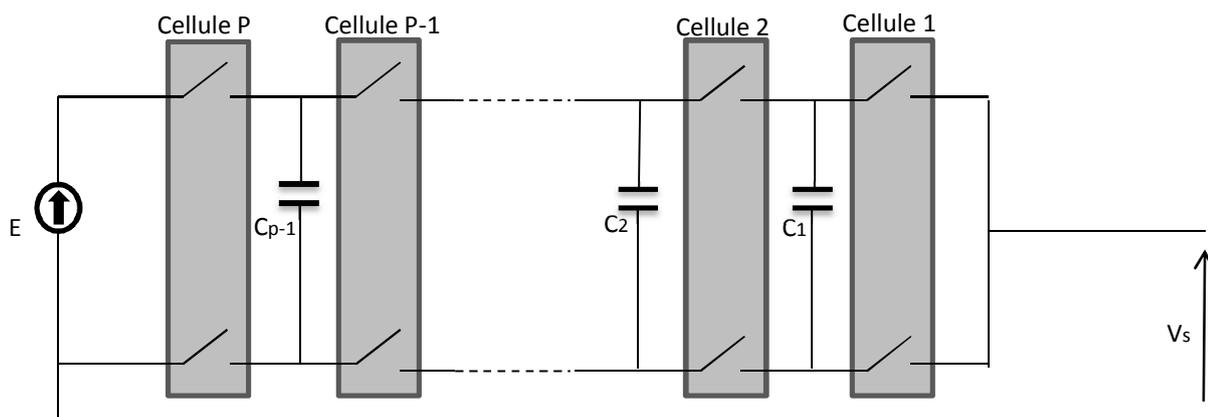


Fig. 2.3. Bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux

2.2.2 Avantages et inconvénients de la structure multicellulaire

Le bref rappel sur les topologies classiques nous a permis de mettre en avant un certain nombre de propriétés pour chaque convertisseur. Le but ici n'est pas de dire quel est le meilleur mais simplement de donner de façon objective les avantages et inconvénient de la structure multicellulaire.

Les principaux avantages de la structure multicellulaire sont de faire apparaître des redondances au niveau des états : plusieurs états différents peuvent conduire à une tension de sortie identique. Cette redondance permet de faire apparaître une fréquence apparente (f_a) en sortie du convertisseur supérieur à la fréquence de découpage de chaque interrupteur (f_{dec}) et directement proportionnelle au nombre de cellule (n) associé en sortie :

$$f_a = n * f_{dec} \quad (2.1)$$

Le prix à payer pour cela se traduit par un certain nombre d'inconvénient. Tout d'abord, contrairement au NPC, les interrupteurs de la structure n'ont pas de période de repos lors d'une période de modulation ce qui se traduit par des pertes en commutation légèrement plus importantes. Le second inconvénient se situe au niveau de l'augmentation du nombre de niveaux. Si l'on augmente le nombre de niveaux, on s'aperçoit que le condensateur situé au plus proche de la source d'alimentation voit sa tension augmenter et se rapprocher de celle-ci.

$$V_c = \frac{n-1}{n} E \quad (2.2)$$

Pour une tension d'alimentation au-delà de 6 kV, le dimensionnement de ce convertisseur pénalise fortement la structure. Mais l'inconvénient le plus important se situe au niveau des sources flottantes, qui par principe ne sont référencées à aucun potentiel. Pour assurer un bon fonctionnement du convertisseur, il est impératif que ces tensions restent autour de leurs valeurs initiales, c.à.d. une fraction de la tension d'entrée. De plus, ces tensions devront rester équilibrées aussi bien en statique que lors du fonctionnement dynamique. Lorsque l'on envisage de contrôler un tel convertisseur, il est alors nécessaire de prendre en compte cette observation pour inclure cet objectif dans l'objectif global de régulation.

Dans certains cas, il est possible d'ajouter un circuit auxiliaire pour améliorer l'équilibrage de ces tensions flottantes. L'utilisation de ce circuit auxiliaire est souvent réservée pour une commande en boucle ouverte des tensions flottantes ou lorsqu'un contrôle très dynamique est nécessaire, mais elle reste difficilement envisageable et on utilise le plus souvent des commandes en boucle fermée.

2.3 Modélisation mathématique des convertisseurs multicellulaires

La modélisation est une étape fondamentale dans la simulation, la synthèse de lois de commandes. Selon l'objectif visé, le modèle devra être plus ou moins précis. La difficulté majeure en électronique de puissance, réside dans le fait que les convertisseurs contiennent des variables continues (courants, tensions) et des variables discontinues (état bloqué ou passant des interrupteurs). Dans cette section, nous rappelons brièvement les trois principaux modèles existants pour le convertisseur multicellulaire. Ces modèles ont été utilisés dans de nombreux travaux pour la simulation ou la synthèse de lois de commande propre à ce type de

structure. Dans ce qui suit, nous supposons les interrupteurs parfaits, c.à.d. pertes nulles et temps morts négligeables.

2.3.1 Modèle instantané

Le modèle instantané est un modèle exact du convertisseur, puisqu'il prend en compte exactement l'état (passant ou bloqué) de l'interrupteur à chaque instant. Tous les phénomènes harmoniques seront représentés dans ce modèle. [16]

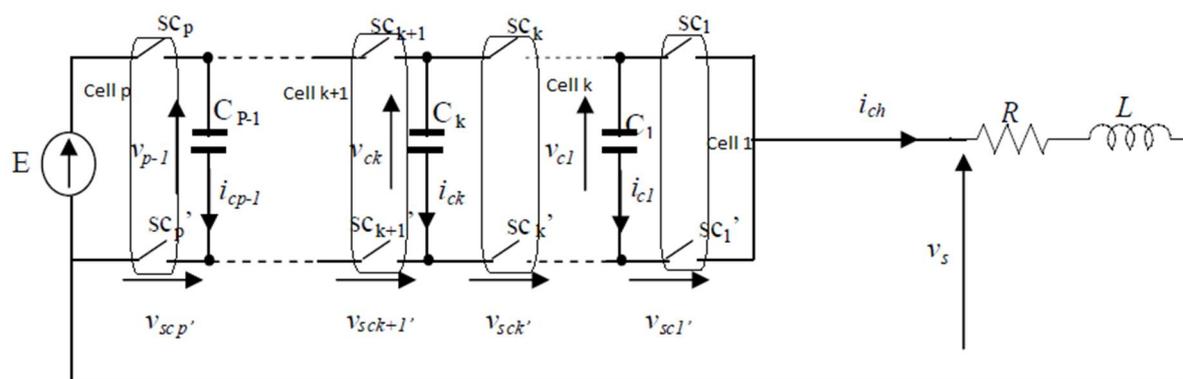


Fig. 2.4. Structure multicellulaire série associée à une charge R-L

En considérant la structure multicellulaire de la figure 2.4, on voit que le courant qui traverse la capacité flottante C_k dépend de l'état des interrupteurs de la cellule $cell\ k$ et de la cellule adjacente $cell\ k+1$ ainsi que du courant dans la charge. Puisque les interrupteurs de chaque cellule sont complémentaires, ce courant est donné par :

$$i_{C_k} = (S_{k+1} - S_k) * i_{ch} \quad (2.3)$$

Où S_k représente l'état (1 ou 0) de l'interrupteur du haut de la cellule $cell_k$.

L'équation de la tension aux bornes de la capacité C_k s'écrit alors :

$$\frac{dv_{C_k}}{dt} = \frac{1}{C_k} (S_{k+1} - S_k) i_{ch} \quad k = 1 \dots p - 1 \quad (2.4)$$

La tension V_s en sortie du convertisseur est donnée par :

$$V_s = \sum_{k=1}^p V_{sc_k'} = S_p E + (S_{p-1} - S_p) v_{C_{p-1}} + \dots + (S_2 - S_3) v_{C_2} + (S_1 - S_2) v_{C_1} \quad (2.5)$$

L'équation décrivant l'évolution du courant i_{ch} dépend de la charge et de la fonction du convertisseur (hacheur ou onduleur). Dans notre cas, il s'agit d'une charge R-L en fonctionnement hacheur parce que l'autre borne de la charge est reliée à la borne négative de la source de tension.

La tension aux bornes de la charge est alors égale à la tension en sortie du convertisseur ($v_{ch}=V_s$).

D'autre part, l'équation du courant i_{ch} est :

$$\frac{di_{ch}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{ch} + \frac{1}{L}v_s \quad (2.6)$$

De (2.5) et (2.6), on trouve :

$$\frac{di_{ch}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{ch} - \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{p-1}(S_k - S_{k+1})v_{C_k} + \frac{1}{L}S_p E \quad (2.7)$$

En notant $x=(x_1, x_2, \dots, x_p)^T=(v_{C_1}, v_{C_2}, \dots, i_{ch})^T$, $u=(S_1, S_2, \dots, S_p)^T$, le modèle instantané d'un hacheur à p cellules alimentant une charge R-L est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_1}(S_2 - S_1)x_p \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_2}(S_3 - S_2)x_p \\ \vdots \\ \dot{x}_{p-1} = \frac{1}{C_p}(S_p - S_{p-1})x_p \\ \dot{x}_p = -\frac{1}{L}(S_2 - S_1)x_1 - \frac{1}{L}(S_3 - S_2)x_2 - \dots - \frac{1}{L}(S_p - S_{p-1})x_{p-1} - \frac{R}{L}x_p + \frac{1}{L}S_p E \end{array} \right. \quad (2.8)$$

L'équation d'état instantanée d'un convertisseur à p cellules peut alors s'écrire sous une forme affine :

$$\dot{X} = AX + G(X)U \quad (2.9)$$

Tels que :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$\text{et } G(X) = \begin{bmatrix} -\frac{x_p}{C_1} & \frac{x_p}{C_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{x_p}{C_2} & \frac{x_p}{C_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{x_p}{C_{p-1}} & \frac{x_p}{C_{p-1}} \\ \frac{x_1}{L} & \frac{x_2 - x_1}{L} & \dots & \frac{x_{p-1} - x_{p-2}}{L} & \frac{E - x_{p-1}}{L} \end{bmatrix}$$

Comme le vecteur X intervient dans la matrice G , le modèle est donc non linéaire. Son inconvénient majeur est que la commande est discontinue. Toutes les commandes en amplitude (ou l'état des interrupteurs est défini en fonction du courant et de la tension), dont la commande par mode glissant, sont basées sur ce modèle.

2.3.2 Modèle moyen :

En remplaçant les ordres de commande dans le modèle instantané par leurs valeurs moyennes sur une période de découpage, on en déduit le modèle moyen [17]:

$$\langle \dot{X} \rangle = A \langle X \rangle + G(\langle X \rangle) U \quad (2.10)$$

$$\text{Avec : } U = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) \quad \text{et} \quad u_i = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} S_i dt$$

Ce modèle n'est valable que si les constantes de temps du système sont beaucoup plus grandes que la période de découpage.

Le modèle moyen s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_1} (u_2 - u_1) x_p \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_2} (u_3 - u_2) x_p \\ \vdots \\ \dot{x}_{p-1} = \frac{1}{C_{p-1}} (u_p - u_{p-1}) x_p \\ \dot{x}_p = -\frac{1}{L} (u_2 - u_1) x_1 - \frac{1}{L} (u_3 - u_2) x_2 - \dots - \frac{1}{L} (u_p - u_{p-1}) x_{p-1} - \frac{R}{L} x_p + \frac{E}{L} u_p \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Cette méthode a l'avantage de la simplicité et la maîtrise de la fréquence de découpage mais présente l'inconvénient d'être basée sur les valeurs moyennes et donc privilégier les évolutions lentes.

2.3.2 Modèle harmonique

Le modèle harmonique repose sur la décomposition en série de fourrier des signaux de commande. Il permet d'obtenir une représentation dynamique d'un convertisseur multicellulaire série en prenant en compte tous les phénomènes harmoniques. [15]

2.4 Commande des convertisseurs multicellulaires

2.4.1 Modulation MLI boucle ouverte

Il est possible de définir une stratégie de modulation MLI simple pour la structure multicellulaire. Le principe est de piloter les cellules avec des rapports cycliques égaux dont les motifs sont déphasés de $2\pi/p$. Ceci permet d'assurer l'équilibrage naturel des tensions flottantes à leurs valeurs d'équilibre (kE/p).

Mais l'équilibrage est lié fortement à la composante alternative du courant de charge. Cet équilibrage n'est pas envisageable dans le cas d'un fonctionnement à vide.

Pour assurer l'équilibrage quel que soit le point de fonctionnement, on peut mettre en parallèle avec la charge un circuit RLC auxiliaire dont la fréquence de résonance f_{aux} est choisi telle que l'impédance du circuit soit minimale pour les harmoniques à $k.f_{dec}$ (k entier positif non multiple de p) et maximale pour les harmoniques à $k.p.f_{dec}$. [18]

2.4.2 Objectifs des lois de commande

Il est important de fixer clairement les objectifs des lois de commande. La première grandeur d'état à contrôler sera le courant de sortie qui alimentera la charge. Cette grandeur

devra suivre une consigne continue ou sinusoïdale suivant le type de structure utilisé (hacheur ou onduleur).

Le deuxième objectif aussi important que le premier est de fixer à une fraction de la tension d'entrée les tensions flottantes.

Il est important de réguler ces tensions pour assurer une bonne répartition de la tension d'entrée sur les différents interrupteurs de la topologie.

2.4.3 Classification des stratégies de commande

La classification présentée dans cette section reste tout à fait standard. On effectue tout d'abord la séparation des commandes directes et indirectes.

Par définition, la commande directe pilote directement les états des interrupteurs comme par exemple la commande par hystérésis ou commande hybride. Un exemple dans la figure 2.5 avec une structure multicellulaire à trois bras.

On utilisera également une commande indirecte représentée sur la figure 2.6. Le principe est alors plus classique et utilise pour la génération des ordres de commande un bloc MLI.

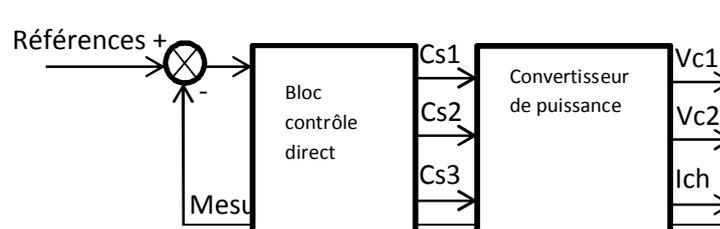


Fig. 2.5. Principe de la commande directe

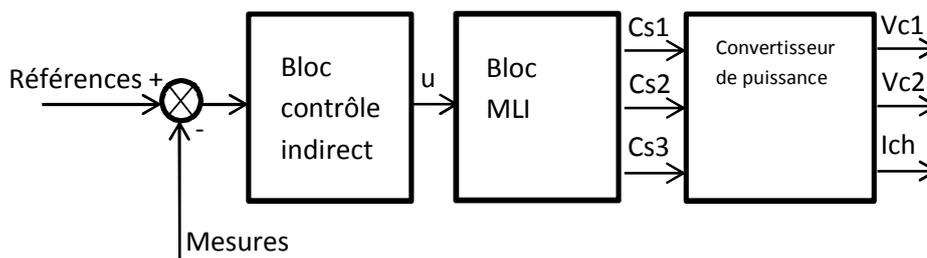


Fig. 2.6. Principe de la commande indirecte

L'avantage de ce type de stratégie par rapport à la commande directe est d'assurer de façon naturelle une fréquence fixe de fonctionnement pour le convertisseur. Le prix à payer est une légère dégradation des performances dynamiques car le bloc de contrôle est échantillonné à la fréquence de découpage.

Parmi les lois de commande indirecte les plus répandues, on cite : les commandes par découplage [15], contrôle par Backstepping [15], pilotage par utilisation des déphasages entre les signaux de commande.

Et pour les lois de commande directe, on cite : le contrôle par modes glissants [19]

2.5 Utilisation des convertisseurs multicellulaire dans une chaîne d'énergie photovoltaïque

Dans notre travail, on a proposé d'utiliser un convertisseur multicellulaire à deux cellules précédé par une capacité pour assurer le fonctionnement optimal du panneau photovoltaïque. Le schéma de la chaîne photovoltaïque est illustré par la figure 2.7.

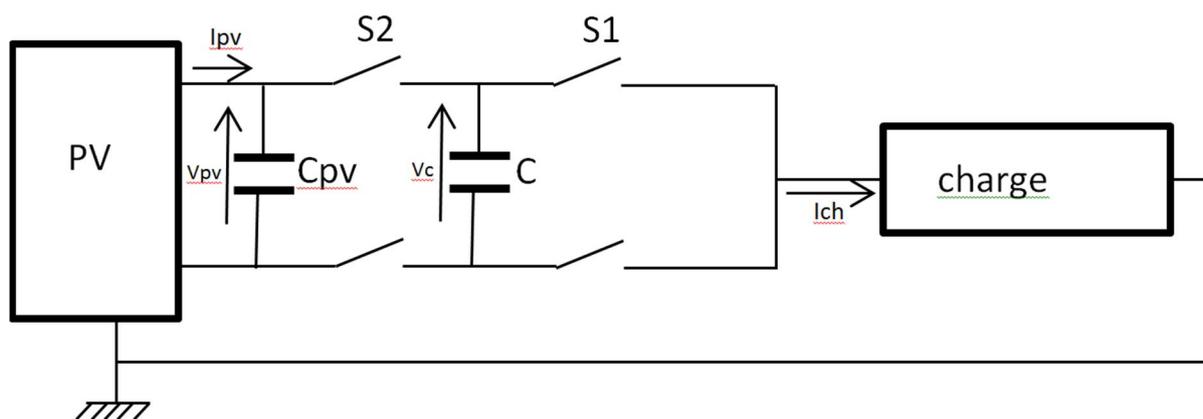


Fig. 2.7. Schéma général de la chaîne photovoltaïque associée à un convertisseur multicellulaire à deux cellules

Dans notre travail, on n'a pas tenu compte de la charge, donc les résultats qui suivent sont applicable pour n'importe quelle charge.

2.5.1 Modélisation de la chaine photovoltaïque par le modèle instantané :

La dynamique de la tension flottante est décrite par l'équation suivante :

$$C\dot{V}_c = (S_2 - S_1)I_{ch} \quad (2.12)$$

La dynamique de la tension aux bornes de la capacité d'entrée C_{pv} est décrite par l'équation suivante :

$$C_{pv}\dot{V}_{pv} = I_{pv} - S_2I_{ch} \quad (2.13)$$

La dynamique du courant de charge I_{ch} est décrite selon la nature de la charge. Pour une charge R-L, la dynamique de I_{ch} est décrite comme suit :

$$L\dot{I}_{ch} = -RI_{ch} + (S_1 - S_2)V_c + S_2V_{pv} \quad (2.14)$$

Le modèle d'état de notre chaine photovoltaïque associé à une charge R-L est décrit le système d'équation suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{S_2}{C_{pv}} \\ 0 & 0 & \frac{S_2 - S_1}{C} \\ \frac{S_2}{L} & \frac{S_1 - S_2}{L} & \frac{-R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

2.5 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre quelques structures de conversion multiniveaux et plus particulièrement le multicellulaire à cellules imbriquées. Nous avons aussi présenté notre chaine photovoltaïque résultant de l'association d'un convertisseur multicellulaire à un générateur photovoltaïque.

Cette structure permet d'améliorer le traitement de l'énergie électrique pour les applications haute tension (plusieurs kilovolts) et forte puissance (plusieurs mégawatts). Ces améliorations proviennent principalement du fractionnement de la tension d'entrée en utilisant des sources flottantes ce qui permet de répartir les contraintes en tension sur les différents interrupteurs et ainsi de pouvoir utiliser des composants de plus petit calibre. Sans oublier

l'amélioration des propriétés intrinsèques comme par exemple la multiplication de la fréquence apparente en sortie.

Le prix à payer pour ces améliorations est la complexité de la topologie et l'aspect commande. A la différence des boucles de régulation classique (pilotage du courant et de la tension de sortie), il faut ajouter d'autres objectifs comme la régulation des tensions internes à un niveau donné.

CHAPITRE 3

Optimisation de la chaîne
photovoltaïque par la
méthode de Backstepping

3.1 Introduction

Nous effectuons, dans cette partie, l'étude d'une procédure de commande utilisant les bases de la théorie de Lyapunov. Cette théorie basée sur les fonctions positives nous permettra de réguler les tensions flottantes et d'optimiser le fonctionnement de la chaîne photovoltaïque.

Nous étudierons les performances obtenues avec ce type de commande en utilisant un convertisseur multicellulaire à deux cellules pour différentes conditions climatiques, et nous faisons ensuite une étude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation.

Avant d'entamer l'étude de la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire commandée en boucle fermée, on propose de donner les résultats de simulation d'un générateur photovoltaïque sans contrôleur MPPT branché directement à la charge, puis avec un convertisseur Buck-Boost et un contrôleur MPPT inductance incrémentale et ensuite en utilisant un convertisseur multicellulaire commandé en MLI boucle ouverte.

3.2 Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT

Pour simuler le système sans contrôleur MPPT, le générateur photovoltaïque a été branché directement à la charge.

La figure (Fig.3.1) montre le fonctionnement du système sans contrôleur MPPT

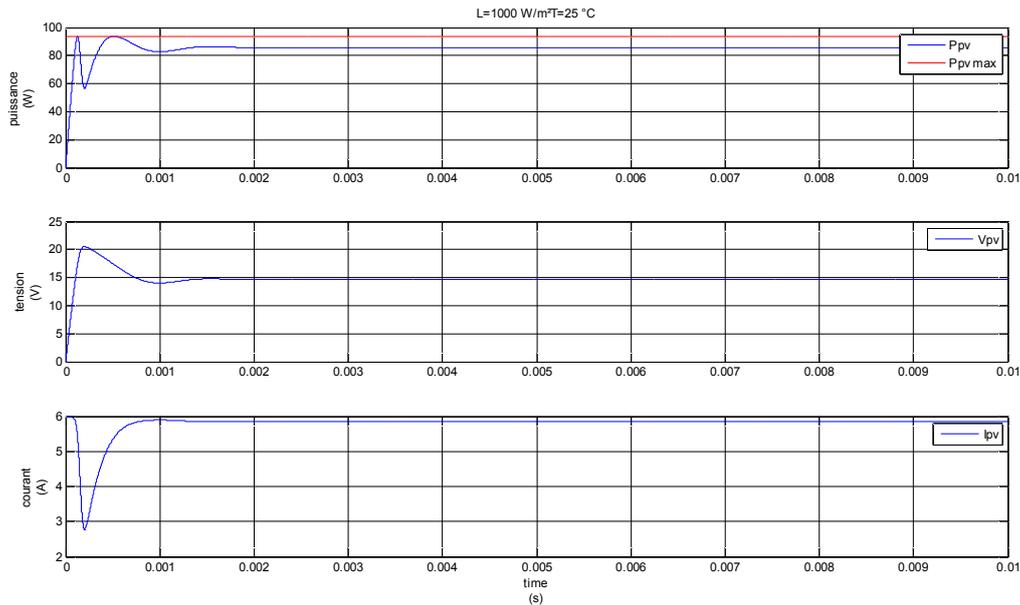


Fig. 3.1. Comportement du système sans contrôleur MPPT

Les résultats de simulation obtenu sur la figure (Fig.3.1) montre que la puissance délivrée par le générateur atteint 82 W, les conditions météorologiques sont telles que l'ensoleillement 1000 W/m^2 et la température 25°C , sous ces conditions, le générateur devrait délivrer 94 W/m^2 . Comme le système ne possède pas de convertisseur pour assurer la commande MPPT, le système ne fonctionnera pas à sa puissance maximale. D'où on confirme la nécessité d'introduire un convertisseur pour assurer le fonctionnement optimal.

3.3 Comportement du système photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un convertisseur continu-continu ayant pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Il peut fonctionner en abaisseur ou en redresseur.

Le convertisseur Buck-Boost est associé à un générateur photovoltaïque afin d'assurer son fonctionnement optimal et cela en utilisant l'algorithme MPPT d'inductance incrémentale développé dans le chapitre 1 [11].

La figure (Fig.3.2) présente un système photovoltaïque constitué d'un GPV, un hacheur Buck-Boost et une charge.

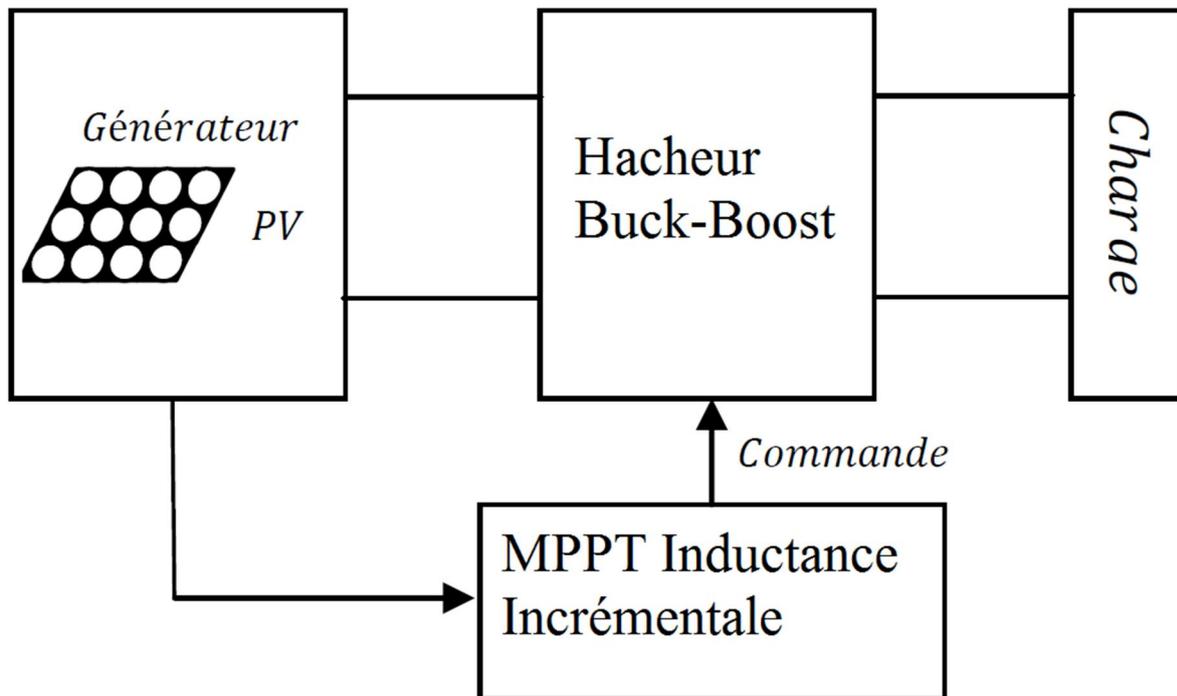


Fig. 3.2. Système photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost

Les résultats de simulation du système photovoltaïque pour différentes conditions climatiques sont donnés par les figures (Fig.3.3) et (Fig.3.4).

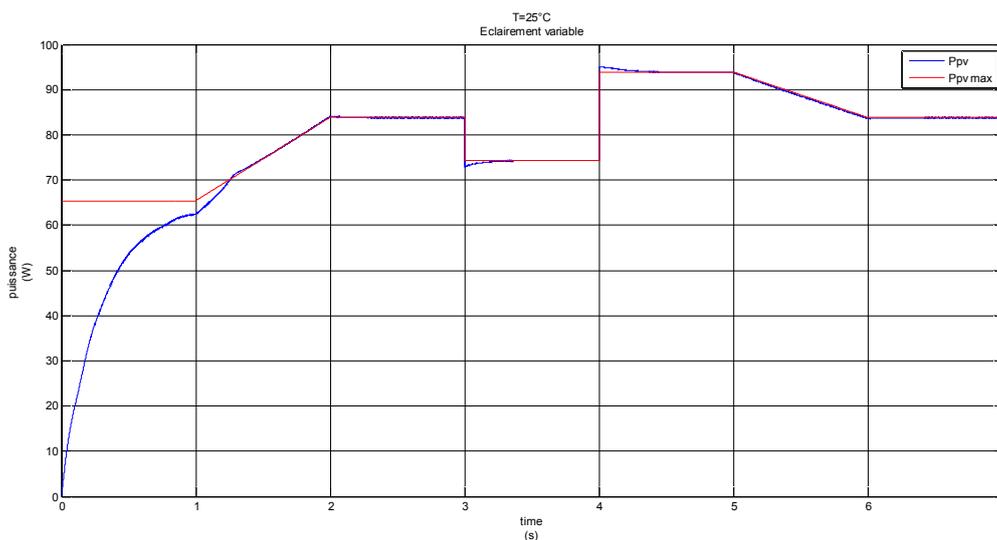


Fig. 3.3. Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et des variations de l'ensoleillement

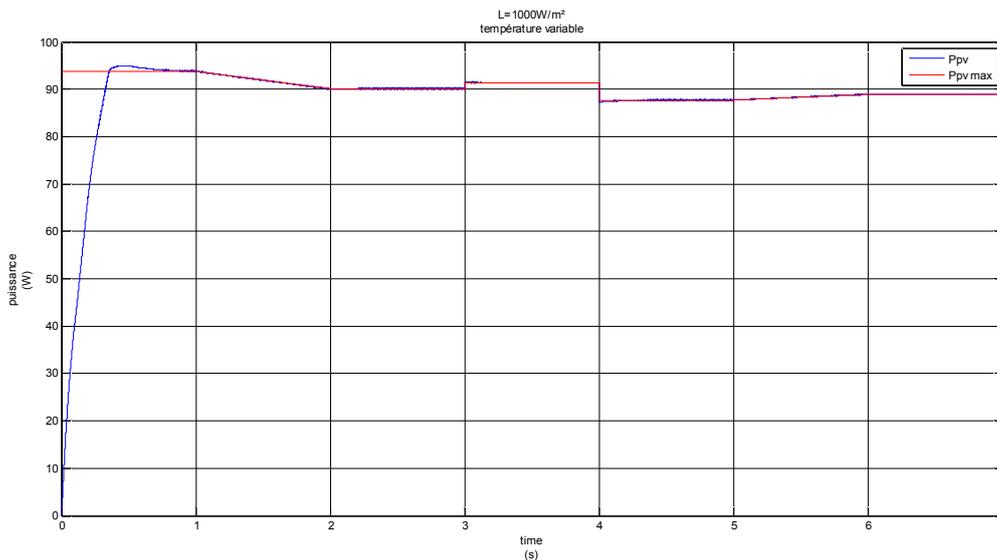


Fig. 3.4. Réponse du système photovoltaïque à un éclairement de 1000 W/m² et des variations de la température

Le convertisseur Buck-Boost assure le suivi du point de puissance maximale même en présence des variations météorologique.

Maintenant on va procéder à la simulation de la chaîne photovoltaïque associée à un convertisseur multicellulaire à deux cellules.

3.4 Fonctionnement de la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO

La commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI) consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible [2]. Les ordres de commande de chaque cellule S_k , dans le cas de la MLI naturelle, sont générés par l’intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant.

Cette commande permet d’assurer un équilibrage naturel des sources flottantes, à condition que le déphasage entre les signaux de commandes des interrupteurs soit de $\frac{2\pi}{p}$ (p est le nombre de cellules du convertisseur multicellulaire).

Pour assurer le fonctionnement optimal de la chaîne photovoltaïque en commande MLI-BO, on propose de générer le signal modulant à partir d’un algorithme MPPT.

La figure (Fig.3.5) montre le schéma général du fonctionnement d'une chaîne photovoltaïque constituée d'un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO.

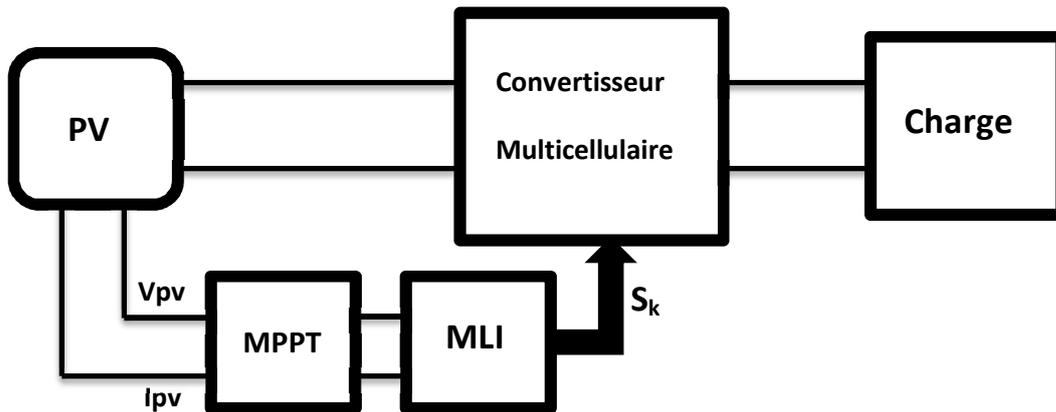


Fig.3.5.chaine photovoltaïque constituée d'un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO

Les figures (Fig.3.6) et (Fig.3.7) montrent les résultats de simulation d'une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à deux cellules sous une température de 25°C et un éclairement de 1000W/m².

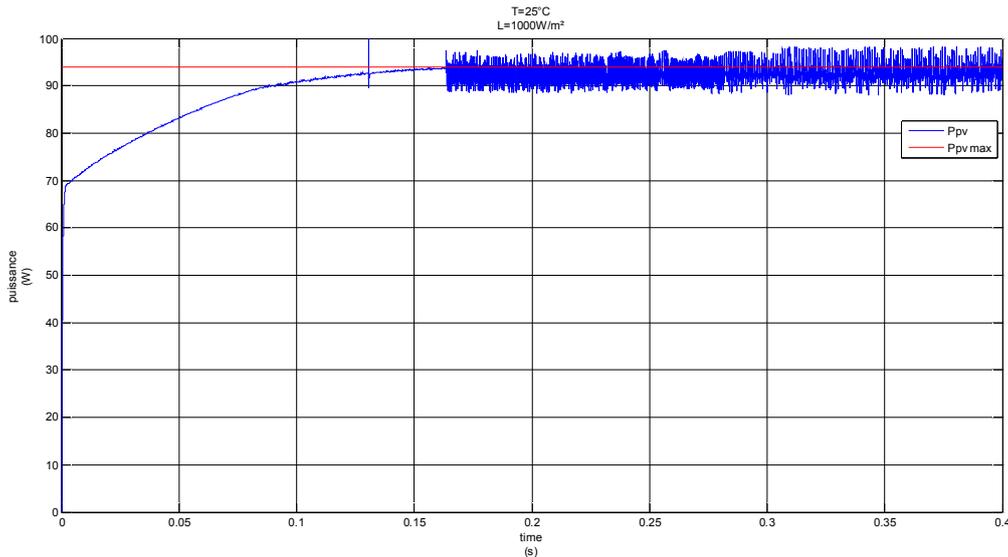


Fig. 3.6. Puissance délivrée par le générateur PV comparée avec la puissance maximale

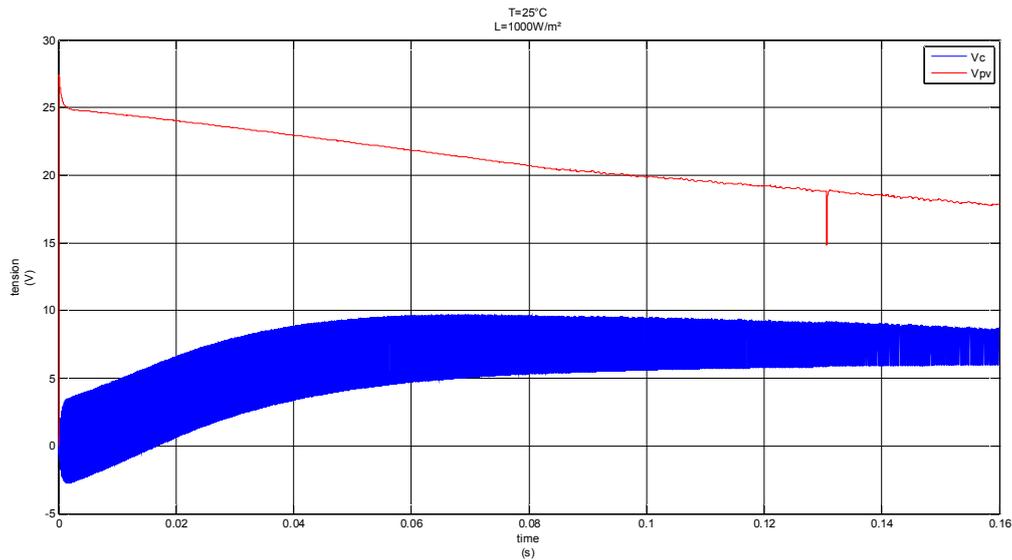


Fig. 3.7. La tension flottante comparée avec la tension d'entrée

Les résultats de simulation montrent une bonne poursuite du point de puissance maximale, mais l'inconvénient de cette commande est qu'elle n'assure pas la régulation de la tension flottante (présence de fortes oscillations).

Ces résultats nous emmènent à la nécessité de commander la chaine en boucle fermé pour assurer de bonnes dynamiques. Nous allons développer dans ce qui suit une commande en boucle fermé basée sur la méthodologie de Backstepping.

3.5 Rappels sur les fonctions de Lyapunov et la méthodologie de Backstepping

On va rappeler dans cette partie quelques définitions utiles sur les fonctions de Lyapunov ainsi que sur la méthodologie de Backstepping.

3.5.1 Notions de base

On définit d'abord B_R une région de l'espace d'état que l'on peut exprimer par $\|X\| < R$. on définit également S_R , la limite de cette région par $\|X\| = R$ [15].

Une fonction scalaire $V(X)$ continue est dite **localement définie positive** si $V(0)=0$ et si dans une région $B_{R_0} : X \neq 0 \Rightarrow V(X) > 0$

Une fonction scalaire $V(X)$ continue est dite **globalement définie positive** si $V(0)=0$ et si dans tout l'espace d'état: $X \neq 0 \Rightarrow V(X) > 0$

On peut également définir une fonction positive semi-définie si V peut s'annuler dans l'espace d'état ailleurs qu'en $X=0$.

On définit alors de la façon suivante une fonction de Lyapunov :

Si dans une région B_{R0} , la fonction $V(X)$ est définie positive et a une dérivée partielle continue et sa dérivée suivant n'importe quelle trajectoire du système est négative semi-définie, c'est-à-dire :

$$\dot{V}(X) \leq 0$$

*Alors $V(X)$ est **une fonction de Lyapunov**.*

3.5.2 Stabilité locale et stabilité globale en utilisant les fonctions de Lyapunov

Théorème (1): *Si dans une région B_{R0} , il existe une fonction $V(X)$ avec une dérivée partielle continue qui vérifie : [15]*

- $V(X)$ est définie positive (localement dans B_{R0}),
- $\dot{V}(X)$ est négative semi-définie (localement dans B_{R0}),

alors le point 0 est stable. Si de plus la dérivée $\dot{V}(X)$ est localement définie négative dans B_{R0} , alors la stabilité est asymptotique.

Afin d'étendre ce résultat, il faut vérifier les conditions du théorème (1) non plus dans une région (B_{R0}) mais dans l'espace d'état complet. Cette condition est nécessaire mais pas suffisante. On doit ajouter une autre condition sur V . cette condition est que V ne doit pas être bornée, c'est-à-dire que $V(X) \rightarrow \infty$ lorsque $\|X\| \rightarrow \infty$.

On obtient alors le résultat suivant :

Théorème 2 : *Si $V(X)$ est une fonction scalaire de X , de dérivée partielle continue et que : [2]*

- $V(X)$ est définie positive,
- $\dot{V}(X)$ est définie négative,

- $V(X) \rightarrow \infty$ si $\|X\| \rightarrow \infty$,

alors l'équilibre à l'origine est globalement asymptotiquement stable.

Ces deux premiers résultats seront d'une grande importance pour l'étude de la stabilité des boucles de commande ainsi que pour la poursuite du MPP.

3.5.3 Méthodologie de Backstepping

Soit la classe de système en cascade suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1).x_2 & \dots (\Sigma 1) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2).x_3 & \dots (\Sigma 2) \\ \vdots \\ \dot{x}_{q-1} = f_{q-1}(x_1, x_2, \dots, x_{q-1}) + g_{q-1}(x_1, x_2, \dots, x_{q-1}).x_q & \dots (\Sigma q - 1) \\ \dot{x}_q = f_q(x_1, x_2, \dots, x_q) + g_q(x_1, x_2, \dots, x_q).U & \dots (\Sigma q) \end{cases} \quad (3.1)$$

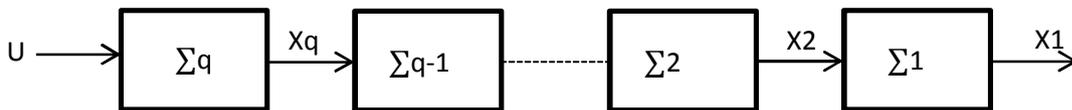


Fig. 3.8. La classe des systèmes en cascade sur lesquels on peut appliquer le Backstepping

Le but est de déterminer une commande afin de stabiliser le système et de faire converger la variable X_1 vers une valeur de référence X_{1ref} .

Pour simplifier l'étude, on se contente d'un système d'ordre 2, et le résultat est généraliser sur les classes de systèmes d'ordre p .

Soit le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1).x_2 & \dots (\Sigma 1) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + U & \dots (\Sigma 2) \end{cases} \quad (3.2)$$

Supposant qu'on a pu trouver une fonction $\alpha(x_1)$ tel que :

- $\alpha(0)=0$.
- le système bouclé : $\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1).\alpha(x_1)$ est asymptotiquement stable. (3.3)

Soit $V_1(X_1)$ une **fonction définie positive** sur R^{Q1} .

$\dot{V}_1 = \frac{\partial V_1}{\partial x_1} (f_1 + g_1 \cdot \alpha)$ est une **fonction définie négative** sur R^{Q1} .

Soit $V_2(X_1, X_2) = V_1(X_1) + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - \alpha)^T \cdot (x_2 - \alpha)$ une **fonction définie positive** sur $R^{Q1.Q2}$.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + (x_2 - \alpha)^T (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}) \quad (3.4)$$

On remplaçant le \dot{V}_1 et \dot{x}_2 par leurs expressions, on aura :

$$\dot{V}_2 = \frac{\partial V_1}{\partial x_1} (f_1 + g_1 \cdot \alpha) + (x_2 - \alpha)^T \left(f_2 + U - \dot{\alpha} + \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} g_1 \right)^T \right) \quad (3.5)$$

Soit la commande :

$$U = -f_2 + \dot{\alpha} - \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} g_1 \right)^T - \lambda (x_2 - \alpha) \quad (3.6)$$

Ce qui donne :

$$\dot{V}_2 = \frac{\partial V_1}{\partial x_1} \cdot (f_1 + g_1 \cdot \alpha) - (x_2 - \alpha)^T \cdot \lambda \cdot (x_2 - \alpha) \quad (3.7)$$

On aura donc \dot{V}_2 définie négative sur $R^{Q1.Q2}$

Ce résultat se généralise à la classe des systèmes en cascade d'ordre q.

3.6 Etude pour une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à deux cellules

Après ces quelques rappels sur les fonctions de Lyapunov et leurs utilisations pour l'analyse de la stabilité, nous allons faire l'étude d'une commande pour une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à deux cellules dont la représentation est donnée dans la figure (Fig.3.9).

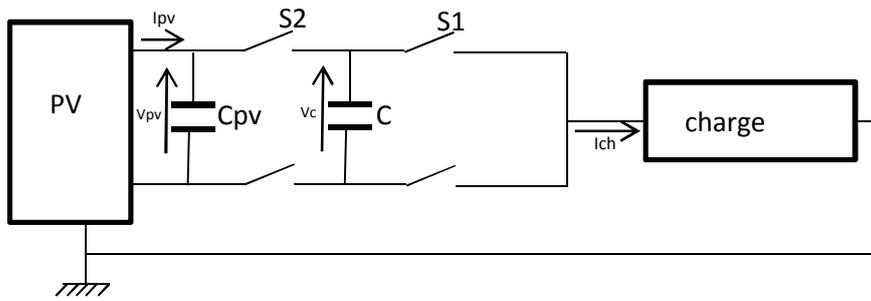


Fig. 3.9. Représentation de la chaîne photovoltaïque associée à un convertisseur multicellulaire à deux cellules

Nous allons d'abord rappeler le modèle utilisé et nous ferons la synthèse des boucles de régulation en utilisant la méthodologie de Backstepping.

3.6.1 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

Nous allons utiliser dans cette section le modèle moyen.

$$\begin{cases} \dot{V}_{pv} = \frac{1}{C_{pv}} \cdot (I_{pv} - u_2 I_{ch}) \\ \dot{V}_c = \frac{1}{C} (u_2 - u_1) I_{ch} \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec u_1 et u_2 sont les valeurs moyennes des signaux de commande sur une période de découpage.

$$u_i = \int_0^{T_d} S_i dt \quad (3.9)$$

Un autre objectif s'ajoute à la régulation de la tension flottante, est d'assurer le fonctionnement optimal de la chaîne photovoltaïque, c'est-à-dire maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.

Travailler au point MPP revient à éliminer : $\frac{dP}{dV}$

On choisit comme 3^e variable d'état à commander [20] : $z = \int \frac{dP}{dV}$ (3.10)

Pour notre étude, on a utilisé la modélisation à une diode du générateur photovoltaïque comme montré précédemment dans le chapitre 1.

$$I_{pv} = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V_{pv}}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right] \quad (3.11)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \quad (3.12)$$

Ces trois équations nous permettent d'écrire :

$$\dot{z} = I_{pv} - k_1 \cdot V_{pv} \cdot e^{k_2 \cdot V_{pv}} \quad (3.13)$$

avec : $k_1 = \frac{C_1 \cdot I_{sc}}{C_2 \cdot V_{oc}}$ et $k_2 = \frac{1}{C_2 \cdot V_{oc}}$

On aura donc le système en cascade suivant :

$$\begin{cases} \dot{V}_{pv} = \frac{1}{C_{pv}} \cdot (I_{pv} - u_2 I_{ch}) \\ \dot{V}_c = \frac{1}{C} (u_2 - u_1) I_{ch} \\ \dot{z} = I_{pv} - k_1 \cdot V_{pv} \cdot e^{k_2 \cdot V_{pv}} \end{cases} \quad (3.14)$$

Soit la variable virtuelle à commander : $\begin{cases} U = k_1 \cdot V_{pv} \cdot e^{k_2 \cdot V_{pv}} \\ \delta = u_1 - u_2 \end{cases} \quad (3.15)$

On choisit à commander la tension flottante par la différence entre les deux commandes ($\delta = u_1 - u_2$), commander la variable d'état z par la variable virtuelle U et U par la commande u_2

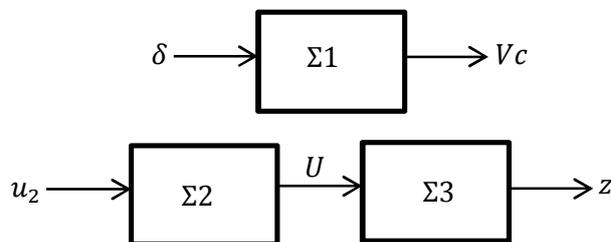


Fig. 3.10. Principe de commande par la méthode de Backstepping de la chaîne photovoltaïque

3.6.2 Synthèse de la loi de commande

$$\text{Soit la fonction de Lyapunov définie positive : } V_1 = \frac{1}{2} \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right)^2 \quad (3.16)$$

$$\dot{V}_1 = \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{\delta \cdot I_{ch}}{c} - \frac{dV_{pv}}{2} \right) \quad (3.17)$$

$$\text{Soit : } \delta = \frac{c}{I_{ch}} \cdot \left(-\frac{dV_{pv}}{2} + \lambda_1 \cdot \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right) + \lambda_2 \cdot \text{sign} \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right) \right) \quad (3.18)$$

$$\text{Alors, on obtient : } \dot{V}_1 = -\lambda_1 \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right)^2 - \lambda_2 \left| V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right| \quad (3.19)$$

La différence entre les deux commandes δ assure la convergence de tension flottante vers la moitié de la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

$$\text{Soit la fonction de Lyapunov définie positive : } V_2 = \frac{1}{2} z^2 \quad (3.20)$$

$$\dot{V}_2 = z \cdot (I_{pv} - U) \quad (3.21)$$

Soit à commander U à travers le u_2 pour qu'il converge vers I_{pv} .

L'objectif est de trouver la commande u_2 qui assure la convergence de U vers α , tel que :

$$U \rightarrow \alpha = I_{pv} + \lambda_3 \cdot z + \lambda_4 \cdot \text{sign}(z) \quad (3.22)$$

$$\text{On obtient alors : } \dot{V}_2 = -\lambda_3 z^2 - \lambda_4 \cdot |z| \quad (3.23)$$

Cette fonction est définie négative sur R ce qui assure la convergence de z vers 0.

Soit donc la fonction définie négative sur R^3 :

$$V_3 = \frac{1}{2} \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} z^2 + \frac{1}{2} (U - \alpha)^2 \quad (3.24)$$

$$\dot{V}_3 = \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{\delta \cdot I_{ch}}{c} - \frac{dV_{pv}}{2} \right) + z \cdot (I_{pv} - U) + (U - \alpha) \cdot (k_3 \cdot \dot{V}_{pv} - \dot{\alpha}) \quad (3.25)$$

$$\text{avec : } \dot{V}_{pv} = \frac{1}{c_{pv}} \cdot (I_{pv} - u_2 I_{ch})$$

$$\text{et } k_3 = k_1 e^{k_2 V_{pv}} \cdot (k_2 V_{pv} + 1)$$

On a déjà calculé δ .

$$\text{Soit : } u_2 = \frac{I_{pv}}{I_{ch}} - \frac{C_{pv}}{k_3 I_{ch}} \cdot (z + \dot{\alpha} - \lambda_5 \cdot (U - \alpha) - \lambda_6 \cdot \text{sign}(U - \alpha)) \quad (3.26)$$

On aura donc :

$$\dot{V}_3 = -\lambda_1 \left(V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right)^2 - \lambda_2 \left| V_c - \frac{V_{pv}}{2} \right| - \lambda_3 z^2 - \lambda_4 \cdot |z| - \lambda_5 (U - \alpha)^2 - \lambda_6 |U - \alpha|^2 \quad (3.27)$$

Cette fonction est définie négative sur R^3 ce qui assure la convergence de V_c vers $V_{pv}/2$, la convergence de U vers α et la convergence de z vers 0.

La convergence de z vers 0 assure l'annulation de $\frac{dP}{dV}$ donc l'optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque.

3.7 Résultats et simulation

Comme on l'a vu précédemment, le générateur photovoltaïque ne peut délivrer le maximum de sa puissance que sous certaines conditions climatiques charges bien définis. Pour remédier à ce problème, plusieurs algorithmes MPPT ont été proposés en utilisant différents convertisseurs.

Pour notre travail, on a proposé de travailler avec un convertisseur multicellulaire à deux cellules.

Avant d'aborder notre travail, on a donné quelques résultats de simulation d'une chaîne photovoltaïque utilisant un convertisseur Buck-Boost puis avec un convertisseur multicellulaire commandé en MLI boucle ouverte.

Dans cette partie, on va exposer les résultats de simulation de la chaîne photovoltaïque en utilisant la méthodologie de Backstepping.

3.7.1 Fonctionnement de la chaîne photovoltaïque sous des conditions constantes en utilisant la méthodologie Backstepping

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température égale à $25^\circ C$ et l'ensoleillement à $1000W/m^2$.

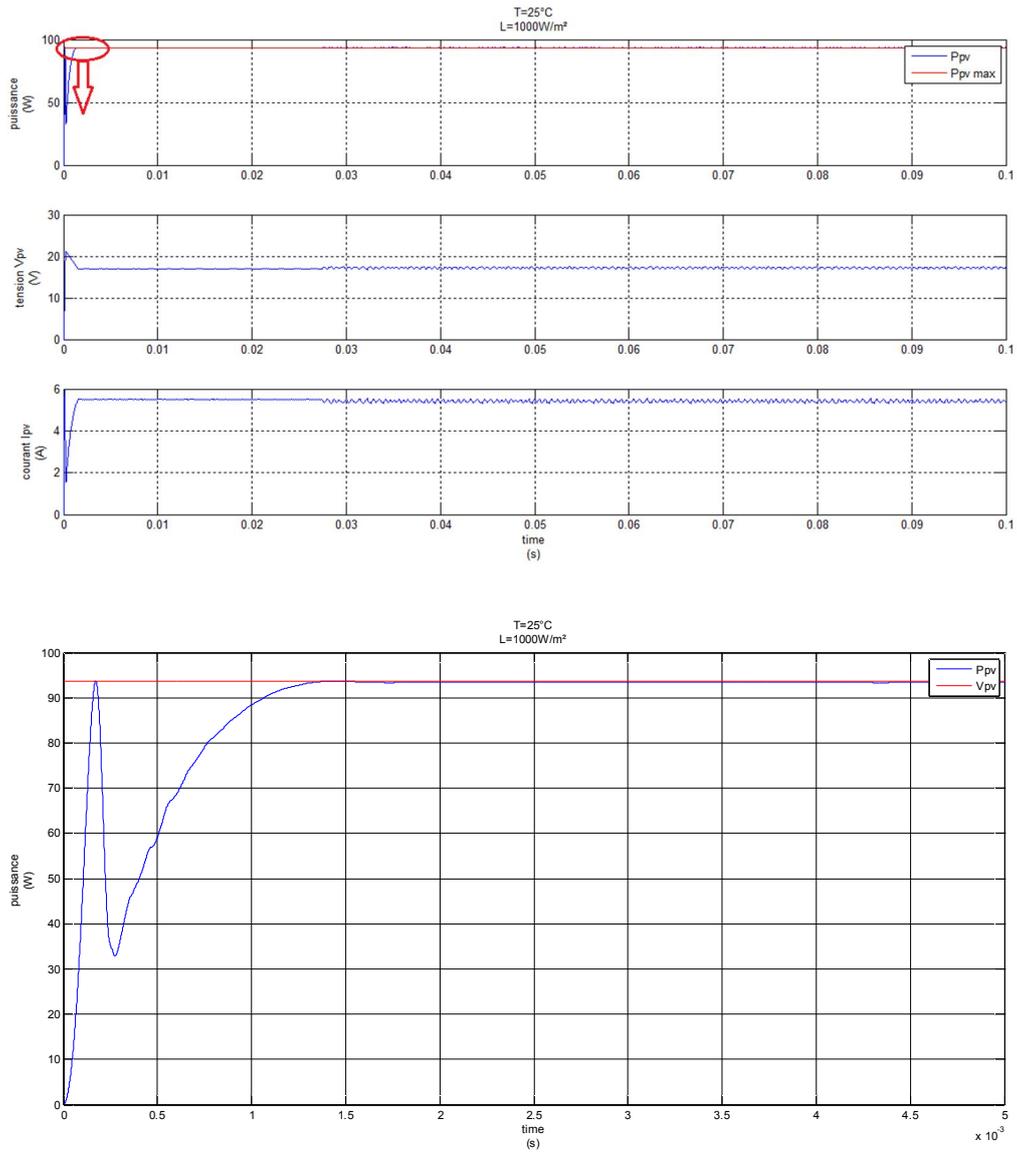


Fig. 3.11. Réponse du système photovoltaïque à une température de $25^{\circ}C$ et un ensoleillement de $1000\ w/m^2$. (puissance/tension/courant)

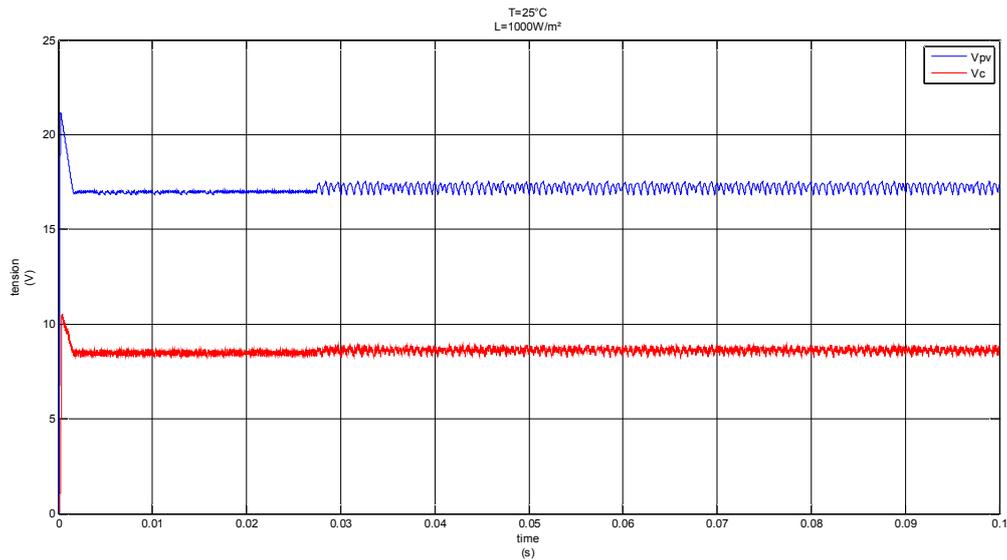


Fig. 3.12. Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque

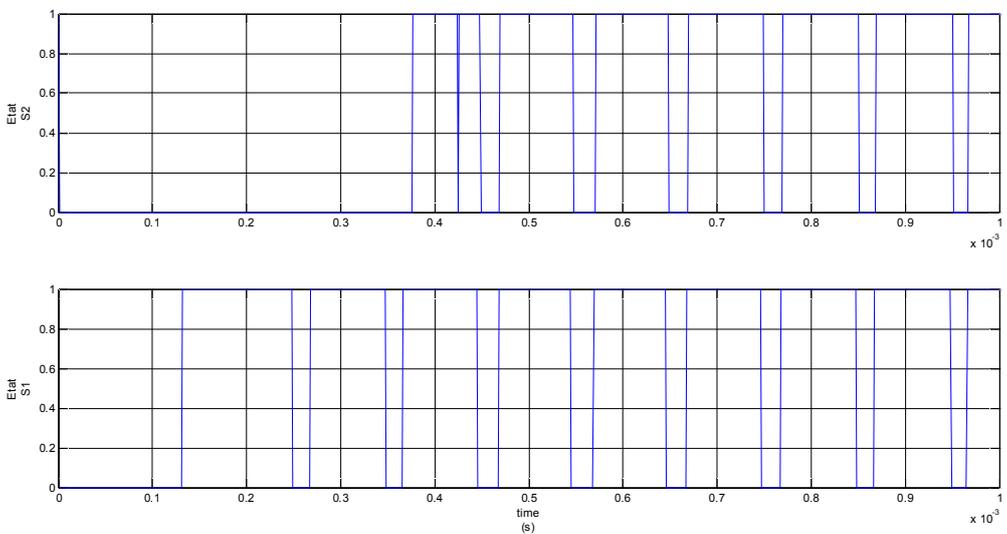


Fig. 3.13. Etat des interrupteur S1 et S2

Cette commande assure de bonnes dynamiques en termes de suivi du point de puissance maximale et la régulation de la tension flottantes.

En plus de ça, le temps de réponse de système pour la poursuite du point de puissance maximale est très bon par rapport au temps de réponse du système photovoltaïque avec un convertisseur Buck-Boost. Même la régulation de la tension flottante suit une dynamique très bonne avec un temps de réponse appréciable.

3.7.2 Comportement de la chaîne photovoltaïque face à des changements de l'éclairement

Afin d'évaluer le temps de réponse de mécanisme de poursuite, le système photovoltaïque est soumis à des variations des conditions de l'ensoleillement. Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'insolation, qui mènent à leur tour à un changement correspondant de la température des cellules.

Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement on va lui faire subir des tests, en variant l'ensoleillement brutalement et lentement.

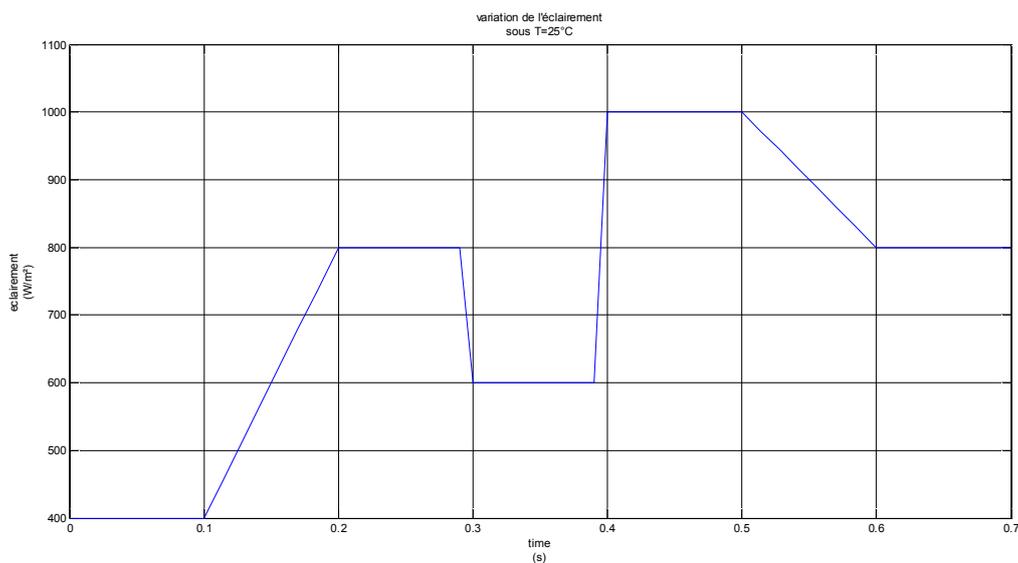
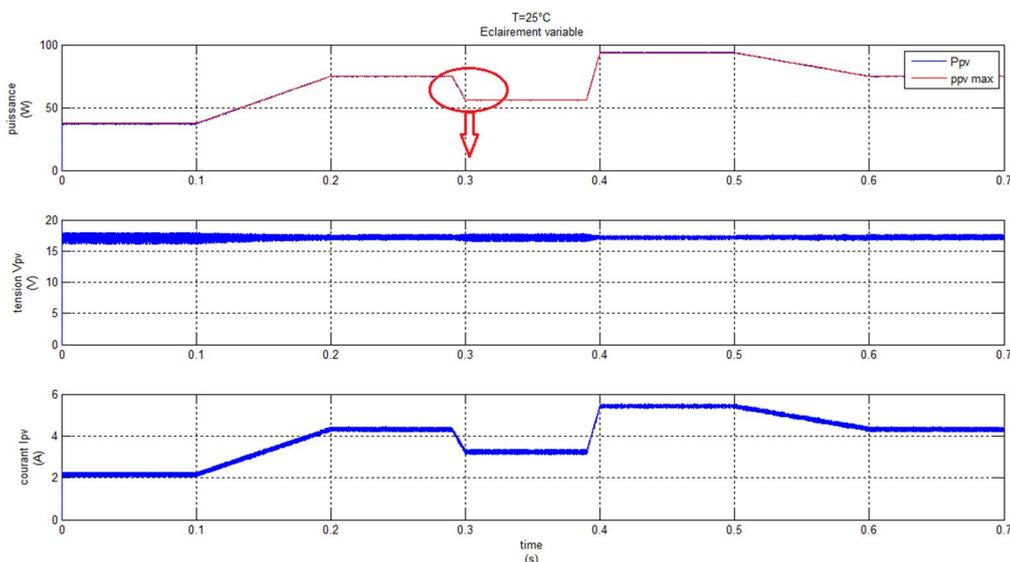


Fig. 3.14. Profil de l'éclairement



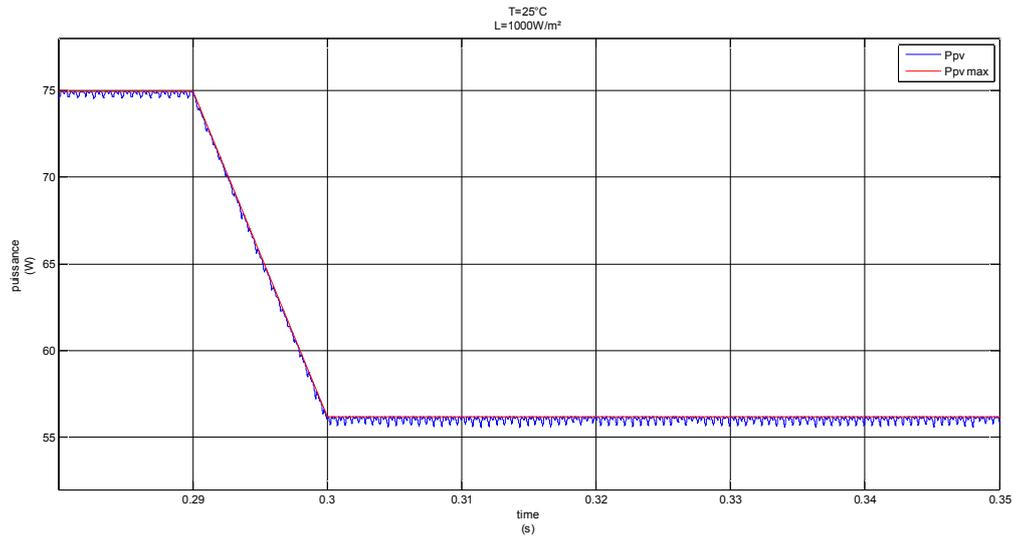


Fig. 3.15. Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et des variations de l'ensoleillement. (puissance/tension/courant)

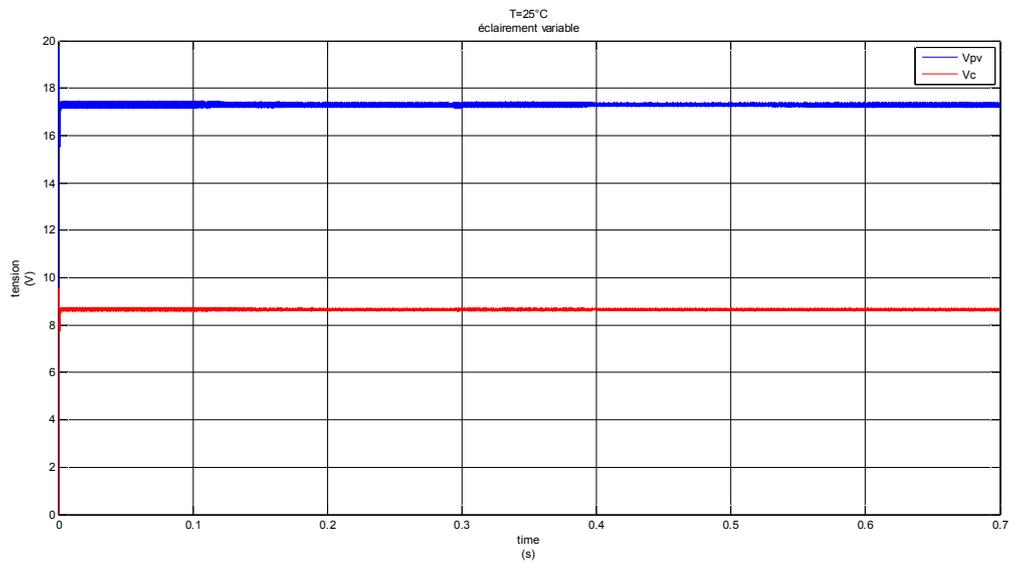


Fig. 3.16. Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque

3.7.3 Comportement de la chaîne photovoltaïque face à des changements de la température

En plus de l'ensoleillement, la température de la cellule solaire est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire.

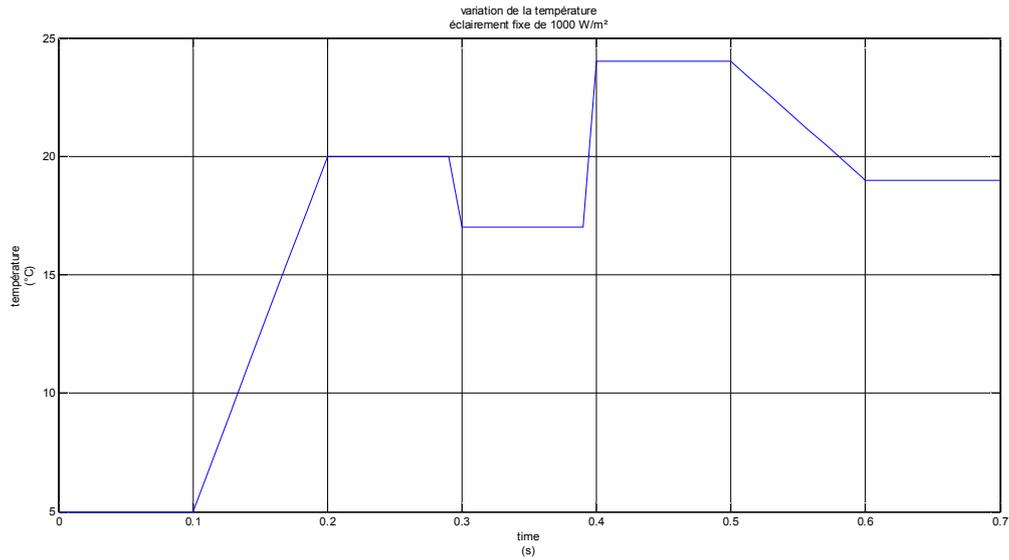
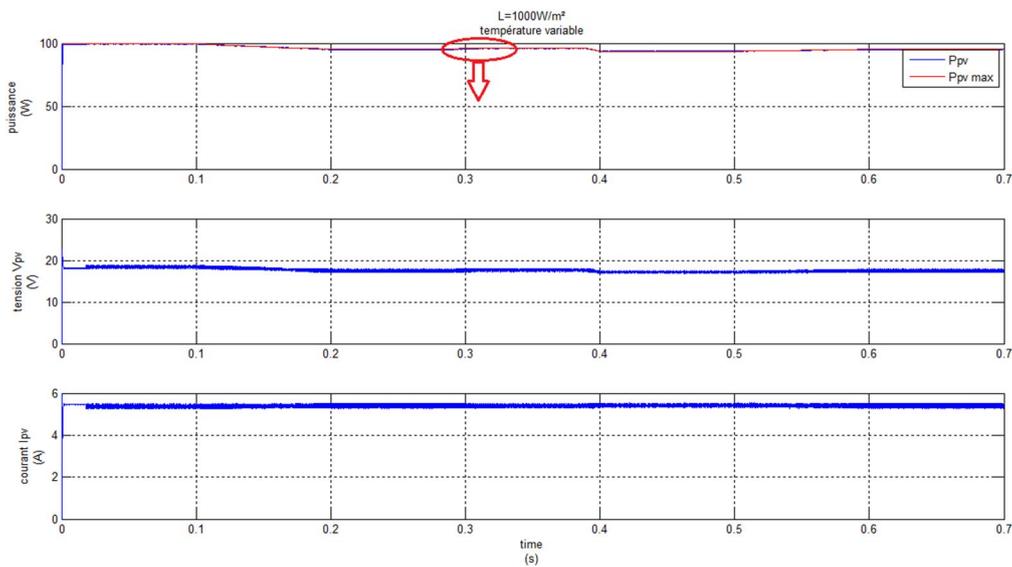


Fig. 3.17. Profil de la température



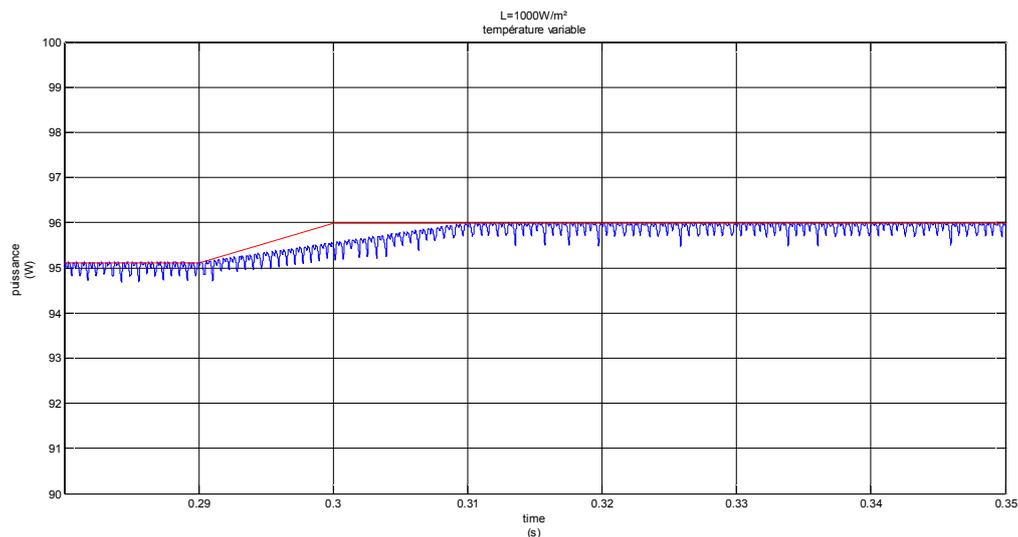


Fig. 3.18. Réponse du système photovoltaïque à un éclairement de 1000 W/m² et des variations de la température. (puissance/tension/courant)

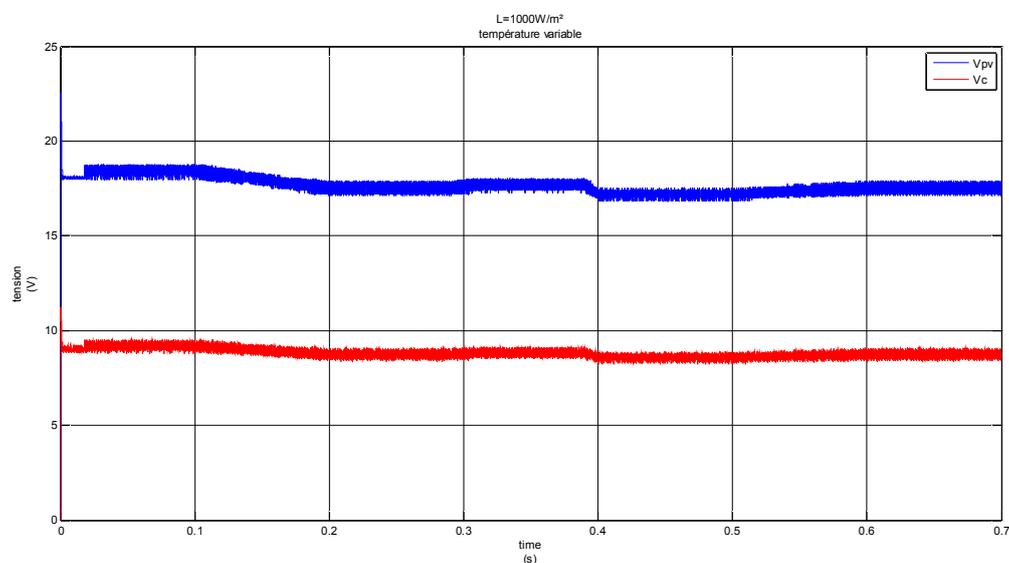


Fig. 3.19. Evolution des tensions flottantes et photovoltaïque

3.7.4 Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation du panneau photovoltaïque

Pour tester la robustesse de la commande développée vis-à-vis des erreurs de modélisation du panneau photovoltaïque, on perturbe les paramètres du panneau. Les résultats de simulation obtenus sont représentés dans les figures (Fig.3.19) et (Fig.3.20).

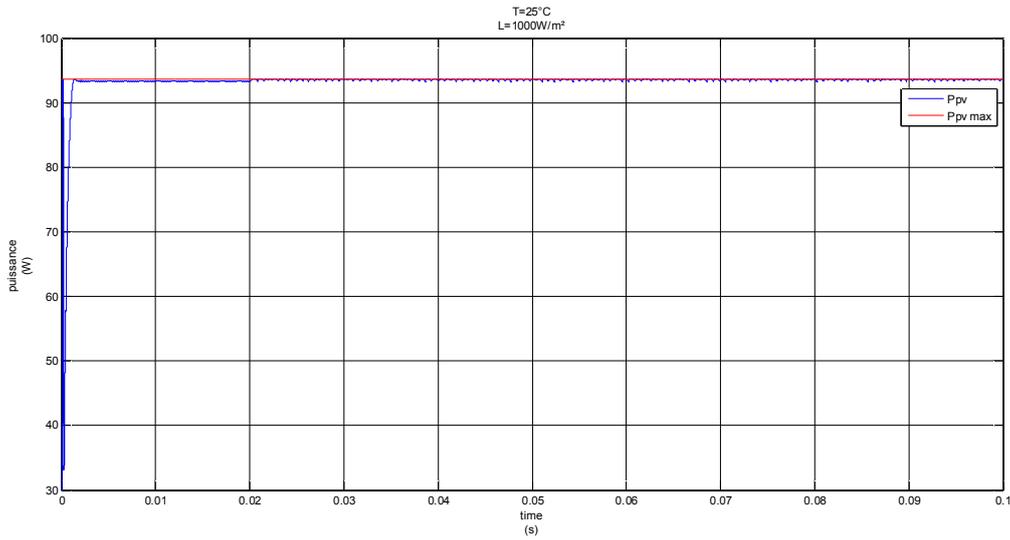


Fig. 3.20. Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale

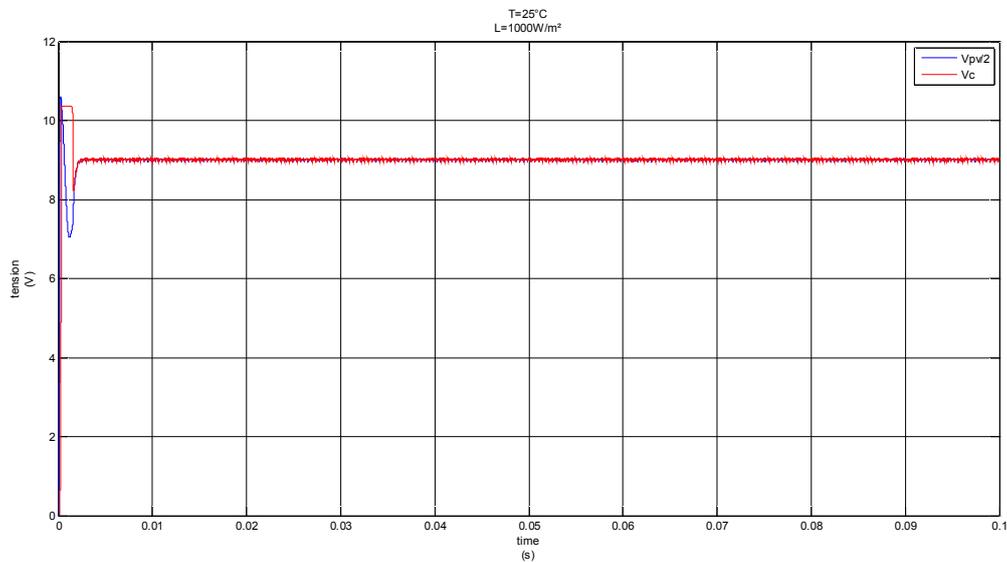


Fig. 3.21. La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV

On remarque que cette commande assure le suivi du point de puissance maximal même en présence des erreurs de modélisation du panneau photovoltaïque.

Cette commande est robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation du panneau photovoltaïque.

3.7.5 Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation du convertisseur multicellulaire

Pour tester la robustesse de la commande développée vis-à-vis des erreurs de modélisation du convertisseur multicellulaire, on perturbe les paramètres du convertisseur (en changeant la valeur de la capacité flottante). Les résultats de simulation obtenus sont représentés dans les figures (Fig.3.21) et (Fig.3.22).

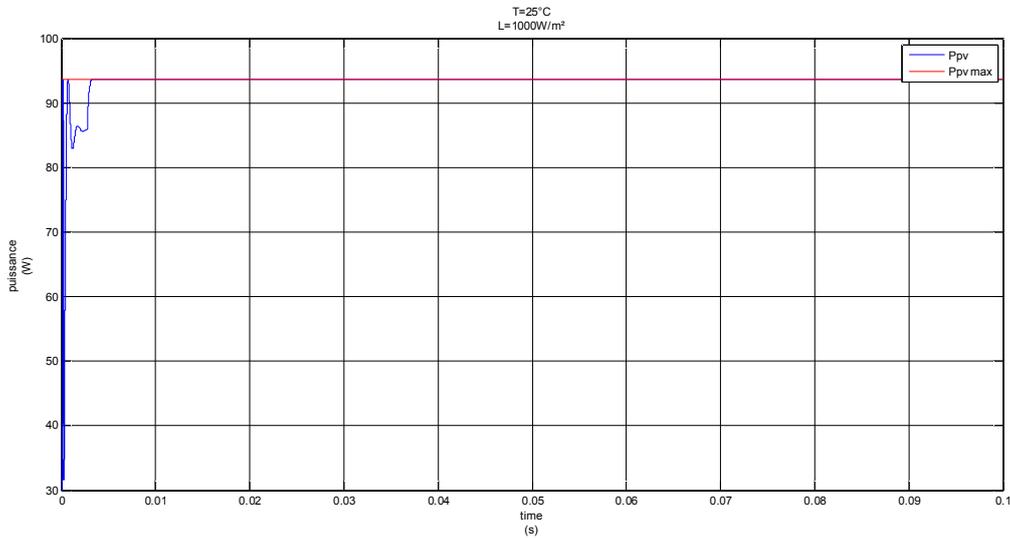


Fig. 3.22. Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale

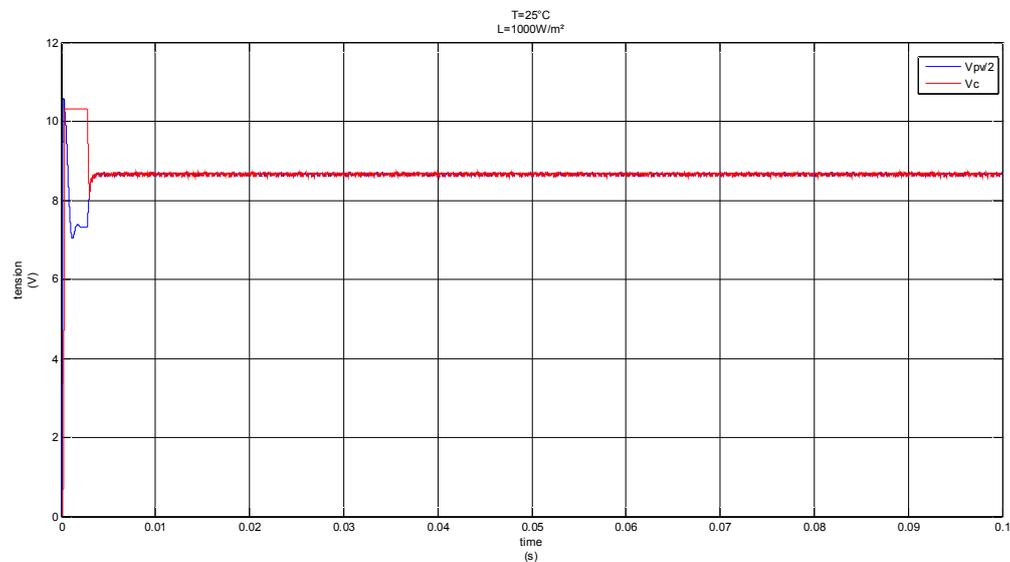


Fig. 3.23. La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV

Même en présence d'erreurs de modélisation sur le convertisseur multicellulaire, cette commande assure la délivrance de la puissance maximale par le panneau photovoltaïque et la convergence de la tension flottante vers la moitié de la tension d'entrée du panneau photovoltaïque.

Cette commande est robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation du convertisseur multicellulaire.

3.7.6 Comparaison des résultats avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO

Le tableau suivant illustre une comparaison entre les résultats obtenus avec cette commande et ceux obtenus avec un convertisseur Buck-Boost et un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO.

	Temps de réponse	Ondulation autour du PPM	Nécessité de capteur	Quantité de calcul
Avec un convertisseur Buck-Boost	Moyen	Faible	Faible	Faible
Avec un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO	Moyen	Haute	Faible	Moyenne
Avec un convertisseur multicellulaire commandé avec la méthode de Backstepping	Rapide	Faible	Moyenne	Forte

Tableau. 3.1. Comparaison des résultats obtenus avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une structure basée sur le convertisseur multicellulaire pour piloter une chaîne photovoltaïque, et nous avons développé un algorithme de commande par les fonctions de Lyapunov par la méthode de Backstepping.

Avant d'aborder les résultats de simulation de cette commande, on a développé les résultats de simulation d'un générateur photovoltaïque branché directement à la charge. Les résultats de simulation confirment la nécessité d'introduire des mécanismes assurant les commandes MPPT.

Ensuite, on s'est intéressé à la chaîne photovoltaïque associée à un convertisseur Buck-Boost puis la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire commande en MLI boucle ouverte.

Les résultats de simulation obtenus avec le convertisseur multicellulaire commandé en Backstepping ont montré de bonnes performances dynamiques, une grande capacité de poursuite du MPP, une bonne poursuite de la tension flottante à la moitié de la tension d'entrée du convertisseur multicellulaire et des temps de réponses meilleurs que ceux obtenus avec le générateur Buck-Boost.

Parmi les inconvénients de cette commande est qu'elle est basée sur le modèle moyen donc elle privilégie les évolutions lentes et elle assure la convergence de la valeur moyenne des signaux commandés et non pas les valeurs instantané, donc il pourrait y avoir des phénomènes de chattering autour des valeurs de consigne.

CHAPITRE 4

Modélisation et commande de
la chaîne photovoltaïque par
l'approche hybride

4.1 Introduction

Dans toute formulation d'un problème de commande, le modèle mathématique développé dans le but d'établir la loi de commande, ne reflète pas exactement le processus réel. Ces différences peuvent par exemple être dues à des dynamiques non modélisées, à des variations des paramètres du système ou à l'approximation trop directe de comportements complexes du processus. On doit néanmoins s'assurer que, malgré toutes ces incertitudes, la loi de commande résultante permet d'atteindre les objectifs prédéfinis.

L'importance du problème a entraîné un développement rapide de la théorie des systèmes hybrides. Cette théorie a trouvé de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que l'informatique, l'industrie automobile, la robotique, le contrôle du trafic aérien, la biologie, l'automobile, et l'électronique de puissance [21]

Les convertisseurs multicellulaires décrivent un modèle mathématique non-linéaire régi par des variables d'état continues et des commandes discrètes (états des interrupteurs). Cette interaction de variables continues et discrètes définit une classe de système qu'on appelle les systèmes hybrides. Donc un système hybride est tout système impliquant des processus continus et des phénomènes discrets [2].

Les travaux qui concernent la modélisation et la commande hybride des convertisseurs multicellulaires ont été faits par [2]. Nous allons, dans ce chapitre, développer une modélisation et une commande hybride d'une chaîne photovoltaïque comportant un convertisseur multicellulaire à 2 cellules afin d'assurer les objectifs de commandes.

4.2 Rappel sur les systèmes dynamiques hybrides

4.2.1 Définition des systèmes hybrides

En automatique, les systèmes physiques sont souvent représentés par un modèle dynamique continu ou par un modèle à événements discrets. La nature de chaque modèle est définie selon les variables utilisées pour décrire l'état du système et la variable caractérisant le temps. Il est important dans de nombreux cas d'utiliser l'une de ces deux catégories de modèles.

Cependant la majorité des systèmes complexes réalistes mélangeant le continu et le discret ne peuvent pas être classés ni dans la catégorie "système continu" ni dans la catégorie "système discret". Il est nécessaire alors d'utiliser des modèles hybrides permettant la prise en compte à la fois des variables continues et des variables discrètes ainsi que l'interaction entre elles. Plusieurs modélisations hybrides ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être classées en trois catégories principales [2]:

- ❖ L'approche discrète ou événementielle qui consiste à supprimer la dynamique continue du système, en interprétant le SDH comme un système à événement discret. Celle-ci est l'approche la plus utilisée dans la littérature. En effet, parmi ses inconvénients, on a d'une part le risque d'obtenir un automate non déterministe et d'autre part le risque que la partition ne soit pas adéquate pour l'espace d'état. De plus les états continus peuvent alors avoir des transitions non admissibles.
- ❖ L'approche continue qui consiste à supprimer la dynamique discrète du système de telle façon que le système ne puisse être modélisé que par des équations différentielles.

Cela peut poser un problème lors de la modélisation des systèmes complexes, tels les convertisseurs par exemple. Cette approche ne prend pas en compte les changements éventuels pour le passage d'une dynamique à une autre.

- ❖ L'approche mixte qui utilise une même structure pour traiter les dynamiques continues et discrètes. Les SDH peuvent être modélisés par des automates hybrides. L'approche mixte interprète le SDH comme une interaction de systèmes dynamiques de types différents. Cette approche est plus complexe et regroupe les avantages des deux approches précédentes.

4.2.2 Définition des automates hybrides

Précédemment, on a simplement décrit les systèmes hybrides comme des systèmes dans lesquels les deux dynamiques : continue et discrète interagissent. Dans ce qui suit, nous présentons une modélisation spécifique des systèmes hybrides, celle que nous appelons : les automates hybrides. Les systèmes hybrides sont communément modélisés avec l'utilisation des Automates hybrides. L'idée est simple : Un " mode machine " fini est construit en combinant les changements de l'état continu, décrits par les équations différentielles, qu'on appelle les modes et les changements de l'état discret qui sont modélisés en utilisant les

transitions, dépendant des conditions, et des performances des actions possibles, entre les modes [2].

Une définition formelle de l'automate hybride est donnée en se basant sur [2].

Définition (systèmes hybrides) : un système hybride est défini par :

$$H = \{Q, X, f, Init, D, E, G, R, U\}$$

- Q est l'ensemble de nombrable des d'états discrets,
- X est l'ensemble des états continus,
- I_{init} est l'ensemble des conditions initiales,
- $E \subset Q \times Q$ est l'ensemble des transitions,
- $D = \{D_q ; q \in Q\}$ est l'ensemble des domaines continus, $\forall q \in Q, D_q$ est un sous-ensemble de \mathfrak{R}^n d'intérieur non vide,
- $U = \{U_q ; q \in Q\}$ est l'ensemble des domaines de commande admissibles, $\forall q \in Q, U_q$ est un sous-ensemble de \mathfrak{R}^p
- $f = \{f_q ; q \in Q\}$ est l'ensemble des champs de vecteurs décrivant les dynamiques du système. $\forall q \in Q, f_q : D_q \times U_q \longrightarrow \mathfrak{R}^n$
- $G = \{G_e ; e \in E\}$ est l'état de garde. $\forall e = (q; q') \in E, G_e \subseteq D_q$.
- $R = \{R_e ; e \in E\}$ est l'ensemble des fonctions reset.
 $\forall e = (q; q') \in E, R_e : G_q \longrightarrow 2^{D_{q'}}$ ou $2^{D_{q'}}$ dénote l'ensemble des parties de $D_{q'}$. On suppose que pour tout $x \in G_e, R_e(x) \neq 0$.

4.2.3 Exécution d'un système hybride

Un système hybride est caractérisé à chaque instant par une évolution de l'état discret q et une évolution de l'état continu $x(t)$. La paire (q, x) compose le vecteur d'état hybride (respectivement les paires (σ, u) et (ψ, y) composent les entrées hybrides et les sorties hybrides). La variable discrète $q(t)$ est constante entre deux instants de commutation successifs t_i, t_{i+1} . Par conséquent $q(t)$ est constant par intervalles de temps $I_i = [t_i, t_{i+1}]$, $\{t_i, i=1, \dots, N\}$ où N est le nombre de commutations. Une trajectoire temporisée est une séquence finie ou infinie d'intervalles de temps $I = \{I_i, i=1, \dots, N$. Suivant les valeurs de N et de I_i . Ainsi, une exécution d'un système hybride est représentée par des séquences d'intervalles de temps sur lesquels le vecteur hybride $(q(t), x(t))$ évolue. La figure (Fig.4.1)

illustre un exemple d'exécution d'un SDH où nous avons mentionné l'évolution des trois variables hybrides (x, q) , (σ, u) et (ψ, y) . L'entrée discrète et la sortie discrète sont indiquées par des impulsions car nous supposons que le franchissement d'une transition est instantané [2].

A l'instant $t_0 = 0$, l'état hybride initial est (q_0, x_0) tel que $x_0 \in \text{Inv}(q_0)$ et $q_0 \in Q$. Sur l'intervalle de temps $I_0 = [t_0, t_c]$, l'état discret est constant $q(t) = q_0$ et $\dot{x}(t)$ évolue suivant l'équation $\dot{x} = f_{q_0}(x(t), u(t))$ avec x_0 comme condition initiale. Enfin, lorsqu'à l'instant t_c une transition $T = (q_0, \sigma, q_1)$ (due à l'arrivée d'une entrée discrète $\sigma \in \Sigma$) se produit, la variable discrète q prend alors une nouvelle valeur q_1 . La sortie discrète devient $\psi = \gamma(T)$ et la variable continue $x(t)$ est actualisée à une nouvelle valeur $\text{Reset}(T, x)$. Nous répétons alors le même processus avec une nouvelle dynamique: $\dot{x} = f_{q_1}(x(t), u(t))$.

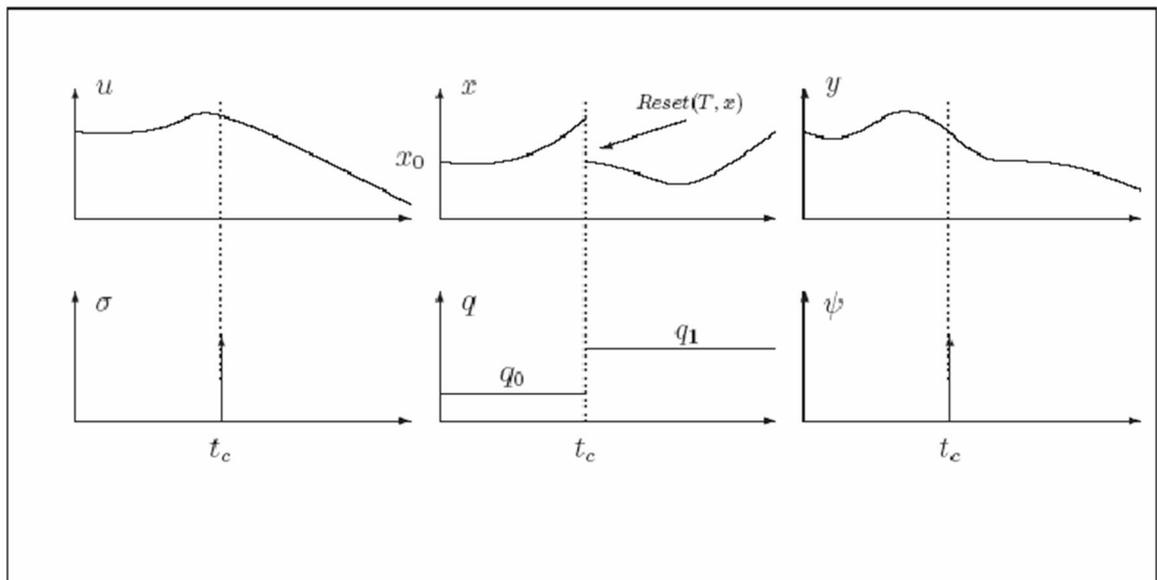


Fig.4.1.Exemple d'une exécution d'un système hybride

4.2.4 Classes des systèmes dynamiques Hybrides

Le formalisme des SDH est très général et englobe de nombreuses classes de modèles, il est évidemment impossible de passer en revue la totalité des classes. Par conséquent, nous présentons dans ce paragraphe celles qui ont un rapport avec notre travail: les systèmes dynamiques à commutations (SAC) (Switched Systems) caractérisés par des transitions discrètes type commutation. La classe des systèmes à commutations est probablement l'une

des plus importantes classes des systèmes hybrides. En effet, une large classe de systèmes dynamiques est modélisée par une famille de sous-systèmes continus et une loi logique ou d'appartenance orchestrant les commutations entre ces sous-systèmes. Un effort particulier a été apporté à l'étude de cette classe pour deux raisons principales. D'abord, elle est suffisamment riche pour permettre une modélisation réaliste de nombreux problèmes (convertisseurs de puissance, systèmes de contrôle de processus, système de contrôle de température, etc...). Ensuite, sa simplicité relative permet la conception d'outils algorithmiques pour leur analyse [2].

4.2.5 Définition des Systèmes dynamiques à commutations

Un système dynamique à commutations est un système hybride où la variable discrète $q(t)$ n'est pas vue comme une variable d'état discrète mais soit comme une variable de contrôle de la dynamique continue, soit comme un événement sans mémoire. Par conséquent, d'après la définition donnée par [2], on peut donner une définition du SAC comme suit.

Définition : Un système dynamique hybride est dit à commutations, s'il vérifie la propriété suivante :

$$\forall e = (q, q') \in E, G_e = D_q$$

En d'autres termes, la frontière du domaine de validation correspond à la condition de commutation. Plusieurs systèmes physiques peuvent être modélisés comme des SAC, on peut citer par exemple le cas d'un convertisseur de puissance qui alimente une charge inductive. Nous nous intéresserons au développement d'un modèle hybride pour une classe particulière de SDH que sont les convertisseurs multicellulaires (système à commutation sans saut).

Les convertisseurs multicellulaires présentent par leur nature un comportement hybride. L'aspect hybride est décrit par la présence des variables discrètes et continues. Il est alors tout à fait naturel de les modéliser sous forme d'un système hybride. L'objectif de notre travail est de modéliser et d'analyser le comportement d'une chaîne photovoltaïque composée d'un convertisseur multicellulaire d'un point de vue hybride. Nous avons mis en évidence le fonctionnement de cette structure en utilisant le modèle des différents modes et en établissant des surfaces de commutation appropriées assurant la stabilité et la sûreté de la chaîne.

4.3 Modélisation hybride d'une chaîne photovoltaïque

Notre chaîne photovoltaïque est le résultat de l'association d'un générateur photovoltaïque à un convertisseur multicellulaire précédé par une capacité. Cette chaîne présente par sa nature un comportement hybride dû à la présence du convertisseur multicellulaire.

Les convertisseurs multicellulaires sont construits à partir de l'association d'un certain nombre de cellules. Notre structure de convertisseur montre l'association de p cellules en série. Cette association en série permet à la source de tension en sortie V_s d'évoluer sur p niveaux possibles.

Comme les commandes des interrupteurs des cellules de commutation sont indépendantes, on obtient $2p$ combinaisons possibles. Ainsi, il est nécessaire d'assurer une répartition équilibrée des tensions aux bornes des condensateurs flottants. Dans ces conditions, on obtient la propriété suivante :

Le convertisseur dispose de $(p-1)$ sources de tension flottantes et la tension aux bornes de la capacité d'indice k est $\frac{kV_{pv}}{p}$. D'abord pour simplifier l'étude et les notations de base, nous allons étudier le fonctionnement (approche hybride) d'un convertisseur à 2 cellules imbriquées [2].

4.3.1 La chaîne photovoltaïque (module photovoltaïque associé un convertisseur multicellulaire à deux cellules)

Quatre modes de fonctionnement sont alors possibles pour cette chaîne comme le montre la figure (Fig. 4.2). Notons que la source flottante ne participe à l'évolution de la dynamique du système qu'au premier et troisième mode. Dans le premier mode, la capacité se décharge et se charge durant le troisième mode. Ainsi, si ces deux modes durent le même temps avec un courant de charge constant, alors la puissance moyenne transmise par cette source flottante sur une période de commutation est nulle. Nous remarquons aussi que ces deux modes permettent d'obtenir par commutation le niveau supplémentaire $V_{pv}/2$ sur la tension de sortie V_s .

S_k sont des signaux de commande des interrupteurs ($k=1, 2$).

Le comportement de cette chaîne est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{S_2}{C_{pv}} \\ 0 & 0 & \frac{S_2-S_1}{C} \\ \frac{S_2}{L} & \frac{S_1-S_2}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

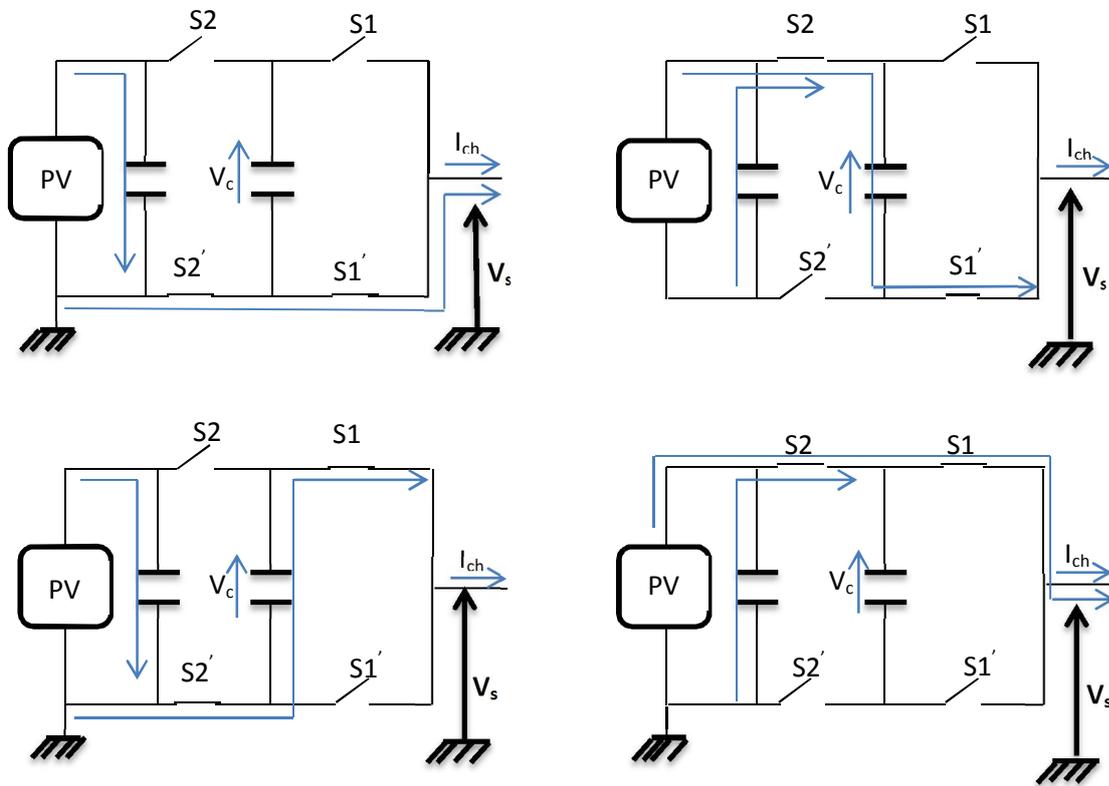


Fig.4.2. les quatre modes de la chaîne photovoltaïque

Comme les interrupteurs de chaque cellule sont considérés comme idéaux, leur comportement peut être modélisé par un état discret prenant des valeurs 0 (ouvert) ou 1 (fermé).

En pratique, certains de ces états ne seront jamais visités pour des raisons de sécurité ou suite à la stratégie de commande adoptée ou encore à cause de la structure du convertisseur lui-même ou enfin pour respecter la règle d'adjacence. Les transitions ne sont pas nécessairement contrôlées.

4.3.2 Automate hybride De la chaîne photovoltaïque

La chaîne photovoltaïque peut donc être modélisée par le système hybride suivant,

Etape 1 : Pour notre chaîne photovoltaïque nous distinguons quatre modes opérants donnés par : $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$. Chaque mode est défini sur l'espace de $X_{q_i} = \mathbb{R}^2, \forall q_i \in Q$.

Etape 2 : En chaque mode, le champ de vecteur f_q est linéaire. Ici la dynamique continue peut être donnée pour chaque mode sous la forme :

$$\dot{X} = f_q(X) = A(q)X + b(q) \quad (4.2)$$

Etape 3 : Le vecteur d'état $X = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ où : x_1 représente la tension à la sortie du générateur photovoltaïque, x_2 présente la tension au borne de la source flottante et x_3 présente le courant dans la charge I_{ch} .

Ainsi, nous pouvons donner une dynamique, pour chaque mode, comme suit:

Mode $q = q_1$ avec $(S1=1 \ S2=0)$. Les équations dynamiques des variables continues sont données par :

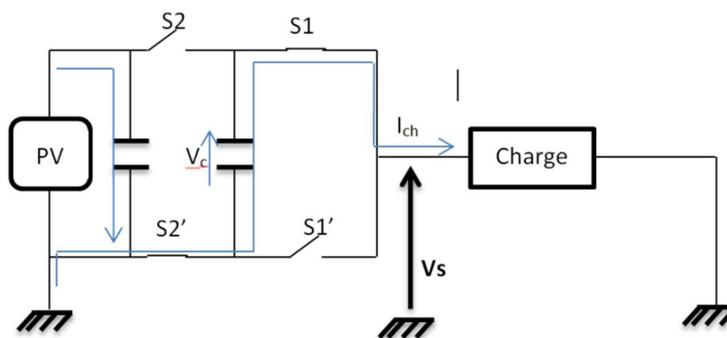


Fig.4.3 .la chaîne PV dans le mode q_1

L'énergie est fournie par la source flottante. Le condensateur est déchargé et son énergie est retournée vers la charge. Le système reste en ce mode aussi longtemps que la tension terminale du condensateur ne diminue pas au-dessous d'une valeur tolérée. Si cette condition est violée ou si la tension à la sortie du générateur PV n'est pas dans la zone désirée, le système commute vers le mode q_2 ou q_4 . Le choix entre q_4 et q_2 est fait selon les conditions de la transition.

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C} \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Mode $q=q_2$ avec ($S1=1$ $S2=1$) Les équations dynamiques des variables continues sont données par :

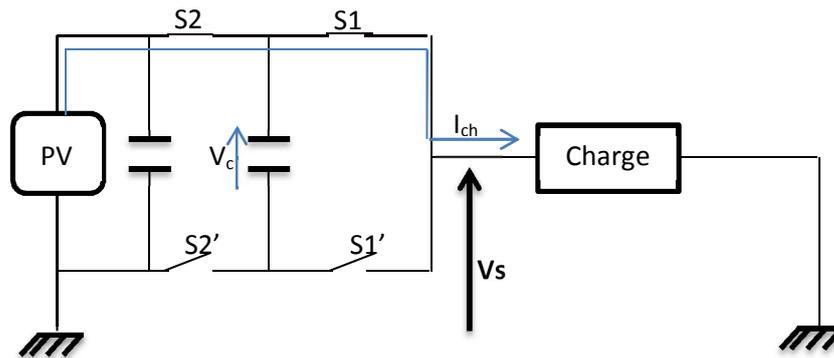


Fig.4.4.la chaine PV dans le mode q_2

Dans ce cas-ci, l'énergie est fournie par la source d'alimentation V_{pv} . La tension délivrée par le générateur photovoltaïque diminue et la tension aux bornes du condensateur reste constante. Le système demeure dans ce mode aussi longtemps que la tension à la sortie du générateur PV n'est pas inférieure à une valeur donnée par $V_{pv}=V_{pvref}-\Delta V$ et si la tension flottante demeure équilibrée. Si une de ces conditions est alors violée le système commute vers le mode q_1 ou q_3 .

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_{pv}} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & \frac{-R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Mode $q=q_3$ avec ($S1=0$ $S2=1$) Les équations dynamiques des variables continues sont données par :

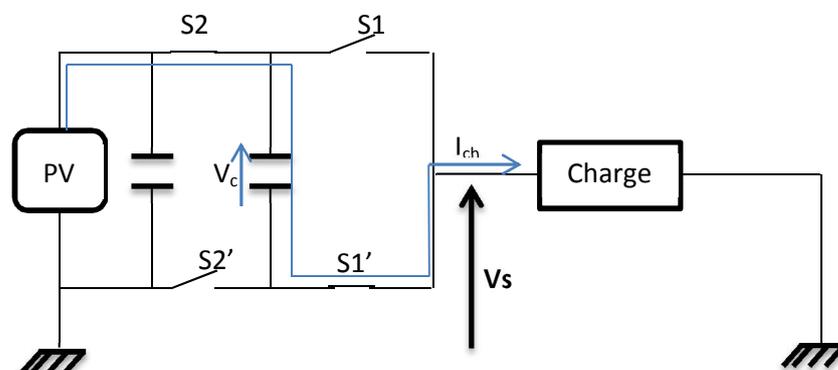


Fig.4.5.la chaine PV dans le mode q_3

En ce mode, la capacité prend de l'importance et l'énergie est fournie par la source photovoltaïque. Le système demeure dans ce mode aussi longtemps que la tension du condensateur n'excède pas la tension tolérée. Si cette condition est violée ou si la tension à la sortie du générateur PV n'est pas dans la zone désirée, le système commute vers le mode q2 ou q4. Le choix entre q4 et q2 est fait selon les conditions de la transition.

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_{pv}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Mode q=q4 avec (S1=0 S2=0) Les équations dynamiques des variables continues sont données par :

En ce mode le générateur photovoltaïque est isolé de la charge comme s'il est mis en circuit ouvert ; la tension V_{pv} aura tendance à augmenter vers la tension du circuit ouvert (V_{oc}). On est dans une phase de roue libre. La tension flottante du condensateur n'évolue pas.

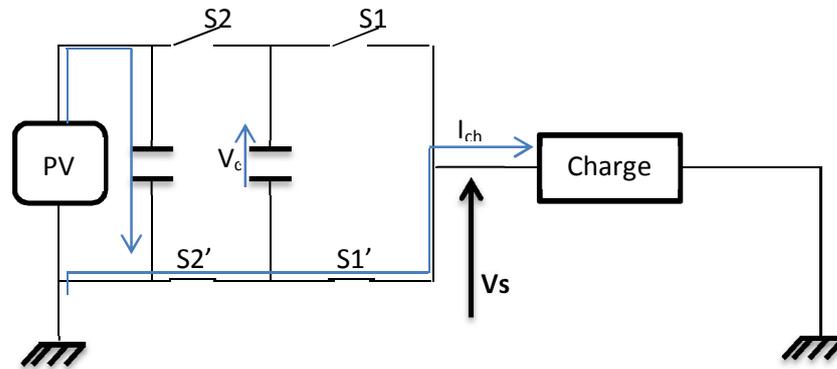


Fig.4.6.la chaine PV dans le mode q4

Le système demeure dans ce mode aussi longtemps que la tension V_{pv} ne dépasse pas une valeur donnée par $V_{pv} = V_{pvref} + \Delta V$ et si la tension flottante demeure équilibrée. Si une de ces conditions est alors violée le système commute vers le mode q1 ou q3

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

L'objectif du modèle hybride de la chaîne est de commander la tension de la sortie du générateur photovoltaïque V_{pv} et la tension flottante V_c autour des valeurs de références suivantes :

$$V_{pv} = V_{pvref} \quad ; \quad V_c = \frac{V_{pvref}}{2} \quad ; \quad (4.7)$$

$$V_{pvref}^+ = V_{pvref} + \Delta V \quad ; \quad V_{pvref}^- = V_{pvref} - \Delta V \quad ; \quad (4.8)$$

$$V_{cref}^+ = V_{cref} + \Delta V_c \quad ; \quad V_{cref}^- = V_{cref} - \Delta V_c. \quad (4.9)$$

On cite aussi les valeurs limites V_{min} et V_{max} de la tension du générateur photovoltaïque.

La tension de référence V_{pvref} est déterminée à partir d'un algorithme MPPT. Pour notre étude, on a travaillé avec l'algorithme de conductance incrémentale.

Etape 4 : Maintenant, nous pouvons donner ainsi les conditions d'invariance pour chaque mode.

Notons que le vecteur d'état est le suivant :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_c \\ I_{ch} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Invariance du mode q1 : Cette invariance est donnée par :

$$X(q_1) = \{X \in \mathbb{R}^3 : [(V_{min} < x_1 < V_{max}) \wedge (x_2 > V_{cref}^+)] \vee [(|x_1 - V_{pvref}| \leq \Delta V) \wedge (|x_2 - V_{cref}| \leq \Delta V')]\} \quad (4.11)$$

Invariance du mode q2 :

$$X(q_2) = \{X \in \mathbb{R}^3 : [x_1 > V_{max}] \vee [(x_1 > V_{pvref}^+) \wedge (x_2 - V_{cref} \leq \Delta V')]\} \quad (4.12)$$

Invariance du mode q3 :

$$X(q_3) = \{X \in \mathbb{R}^3 : [(V_{min} < x_1 < V_{max}) \wedge (x_2 < V_{cref}^-)] \vee [(|x_1 - V_{pvref}| \leq \Delta V) \wedge (|x_2 - V_{cref}| \leq \Delta V')]\} \quad (4.13)$$

Invariance du mode q4 :

$$X(q_4) = \{X \in \mathbb{R}^3 : [x_1 < V_{min}] \vee [(x_1 < V_{pvref}^-) \wedge (x_2 - V_{cref} \leq \Delta V')]\} \quad (4.14)$$

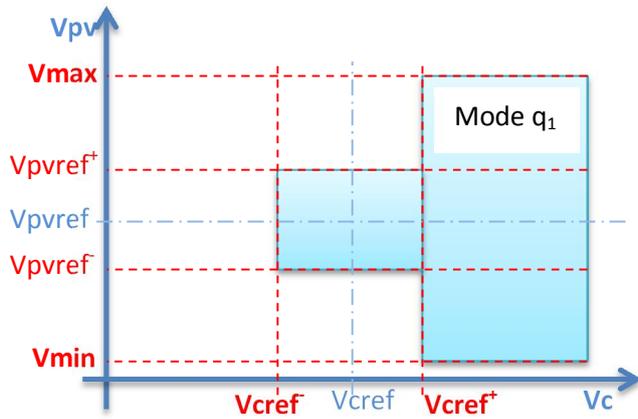


Fig.4.7. Domaine du mode q1

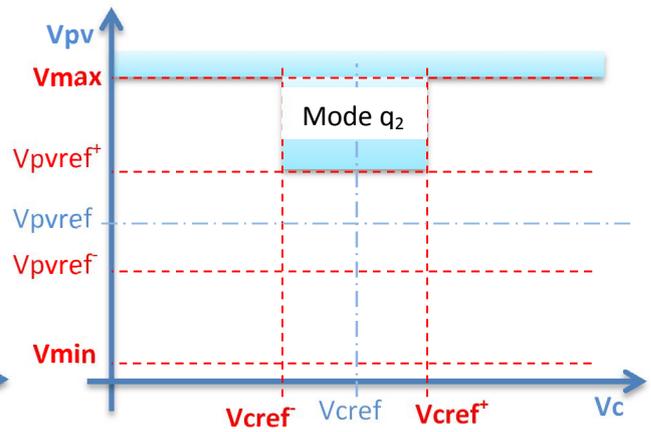


Fig.4.8. Domaine du mode q2

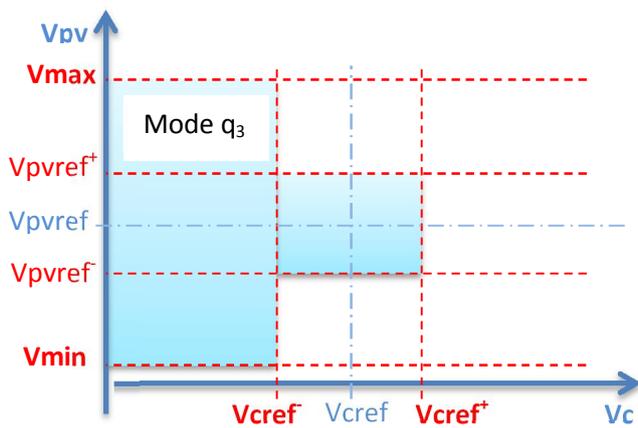


Fig.4.9. Domaine du mode q3

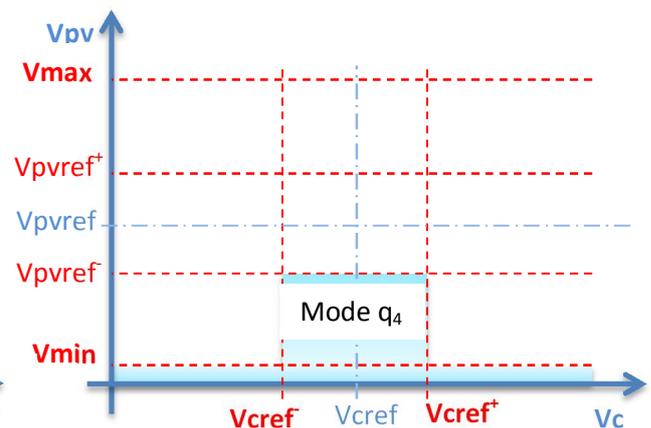


Fig.4.10. Domaine du mode q4

Etape 5: Les ensembles de transitions sont définis par :

$$E = \left\{ \begin{array}{l} (q_i, q_j), \forall i \neq j, \text{ pour } : i, j = 1, \dots, 4 \\ (q_1, q_2), (q_2, q_1), (q_1, q_4), (q_4, q_1) \\ (q_2, q_3), (q_3, q_2), (q_3, q_4), (q_4, q_3) \end{array} \right\} \quad (4.15)$$

Etape 6: Les conditions possibles des transitions entre les divers modes (prenant en compte les conditions de travail du convertisseur) sont définies par les ensembles selon :

$$G(q_1, q_2) = \{ [x_1 \geq V_{max}] \vee [(x_2 < V_{cref}^-) \wedge (V_{pvref} \leq x_1 < V_{max})] \} \quad (4.16)$$

$$G(q_2, q_1) = \{ (x_1 < V_{pvref}^-) \wedge (x_2 \geq V_{cref}) \} \quad (4.17)$$

$$G(q_2, q_3) = \{ (x_1 < V_{pvref}^-) \wedge (x_2 < V_{cref}) \} \quad (4.18)$$

$$G(q_3, q_2) = \{ [x_1 \geq V_{max}] \vee [(x_2 > V_{cref}^+) \wedge (V_{pvref} \leq x_1 < V_{max})] \} \quad (4.19)$$

$$G(q_3, q_4) = \{ [x_1 \leq V_{min}] \vee [(x_2 < V_{cref}^-) \wedge (V_{min} < x_1 < V_{pvref})] \} \quad (4.20)$$

$$G(q_4, q_3) = \{(x_1 > V_{pvref}^+) \wedge (x_2 < V_{cref})\} \quad (4.21)$$

$$G(q_4, q_1) = \{(x_1 > V_{pvref}^+) \wedge (x_2 \geq V_{cref})\} \quad (4.22)$$

$$G(q_1, q_4) = \{[x_1 \leq V_{min}] \vee [(x_2 < V_{cref}^-) \wedge (V_{min} \leq x_1 < V_{pvref})]\} \quad (4.23)$$

Remarque : Les autres transitions : $G(q_1, q_3)$, $G(q_3, q_1)$, $G(q_2, q_4)$ et $G(q_4, q_2)$ ne sont pas tolérées parce qu'ils ne se conforment pas à la règle de l'adjacence.

Etape 7 : Les conditions initiales du système sont définies par:

$$Init = \{q_2\} \times \{X \in \mathbb{R}^3 : (x_1 < V_{min}) \wedge (x_2 < V_{cref}^-)\} \quad (4.24)$$

En ce mode, le courant de charge croît rapidement, ce qui permettra par la suite une meilleure dynamique de convergence de la tension flottante.

4.3.3 Schéma d'Automate hybride De la chaîne photovoltaïque

La figure suivante (Fig.4.11) présente le modèle hybride de la chaîne photovoltaïque pour un convertisseur à deux cellules. La dynamique de chaque mode est indiquée à l'intérieur de chaque cercle et les conditions de transitions au-dessus des flèches (avec $T_{ij} = G(q_i, q_j)$). Quand une condition de la transition est vérifiée, le système commute vers un autre mode. Les conditions de l'invariance et des transitions établies précédemment sont données afin d'assurer un réglage de la tension flottante V_c et la tension à la sortie du générateur PV autour des valeurs de référence.

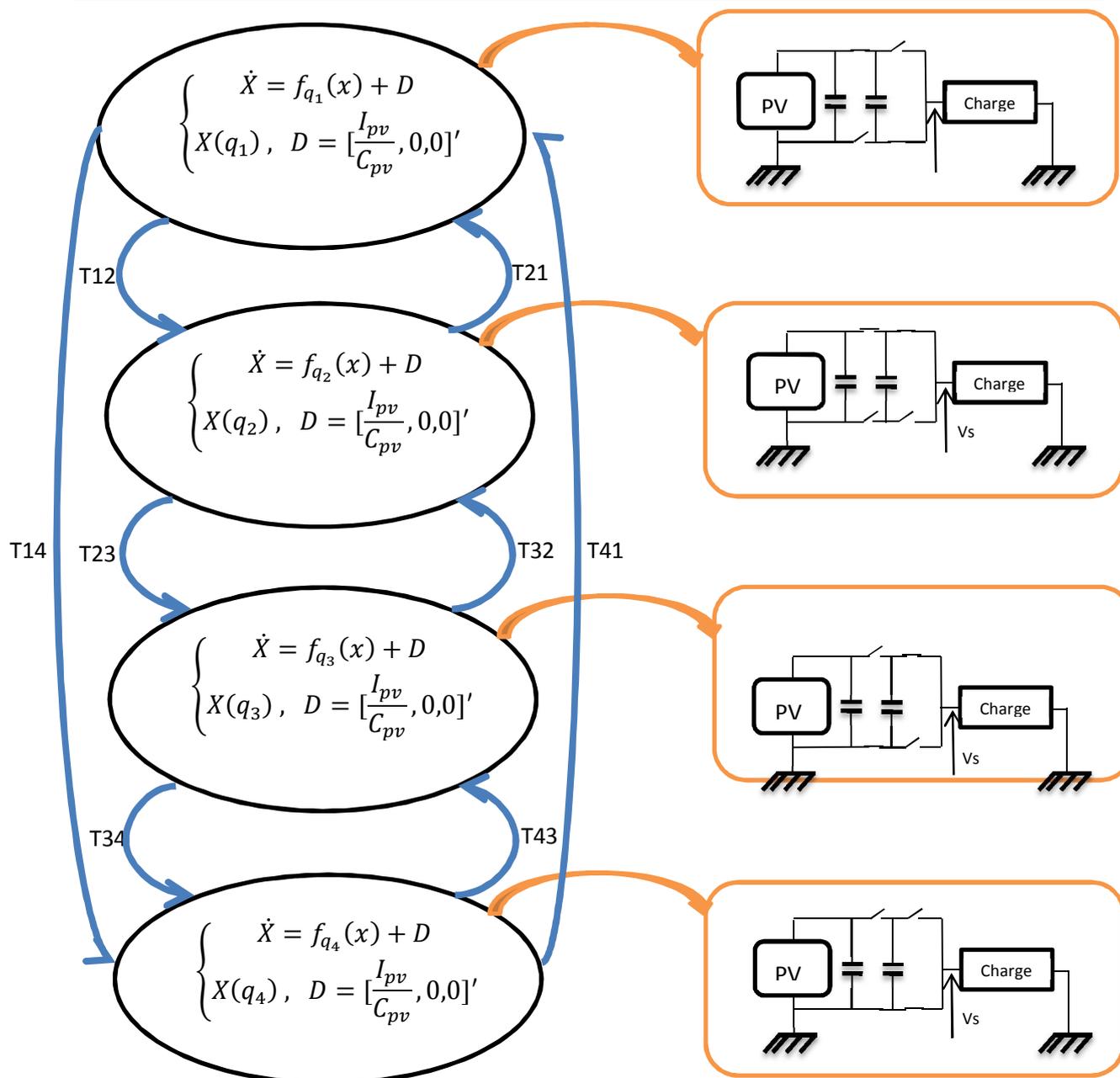


Fig.4.11. Schéma d'Automate hybride De la chaine photovoltaïque

4.3.4 Modélisation hybride avec State flow

Stateflow est un outil graphique de conception et de développement pour la commande et la logique de surveillance utilisé en même temps que Simulink. En utilisant Stateflow nous pouvons visuellement modéliser et simuler le système dynamique complexe basé sur la théorie des systèmes hybrides. Pour modéliser, simuler, et analyser le système ; Stateflow fournit clairement, des descriptions concises du comportement du système complexe en utilisant la théorie des automates, des notations d'organigramme, et des diagrammes à états. Il est facile de créer des conceptions, de considérer divers scénarios, et de les réitérer jusqu'à ce

que le diagramme de Stateflow modélise le comportement désiré. Traditionnellement, les concepteurs avaient l'habitude des tables de vérité pour représenter des rapports parmi les entrées, les sorties, et les états d'une machine d'état fini. La table résultante décrit la logique nécessaire pour commander le comportement du système. Une autre approche pour concevoir les systèmes entraînés par les événements est de modéliser le comportement du système en le décrivant en termes de transitions parmi des états discrets, en utilisant Statflow. (Fig.4.12). (voir annexe A)

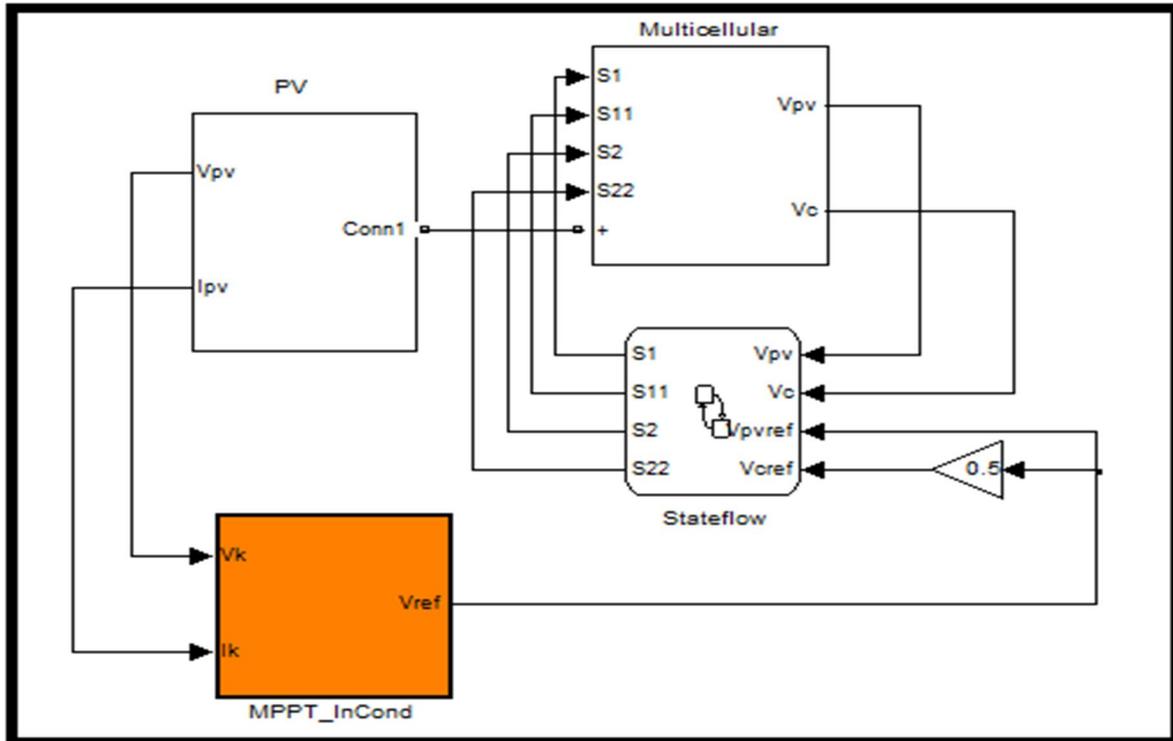


Fig.4.12. modèle Simulink de la commande hybride appliquée à la chaîne photovoltaïque

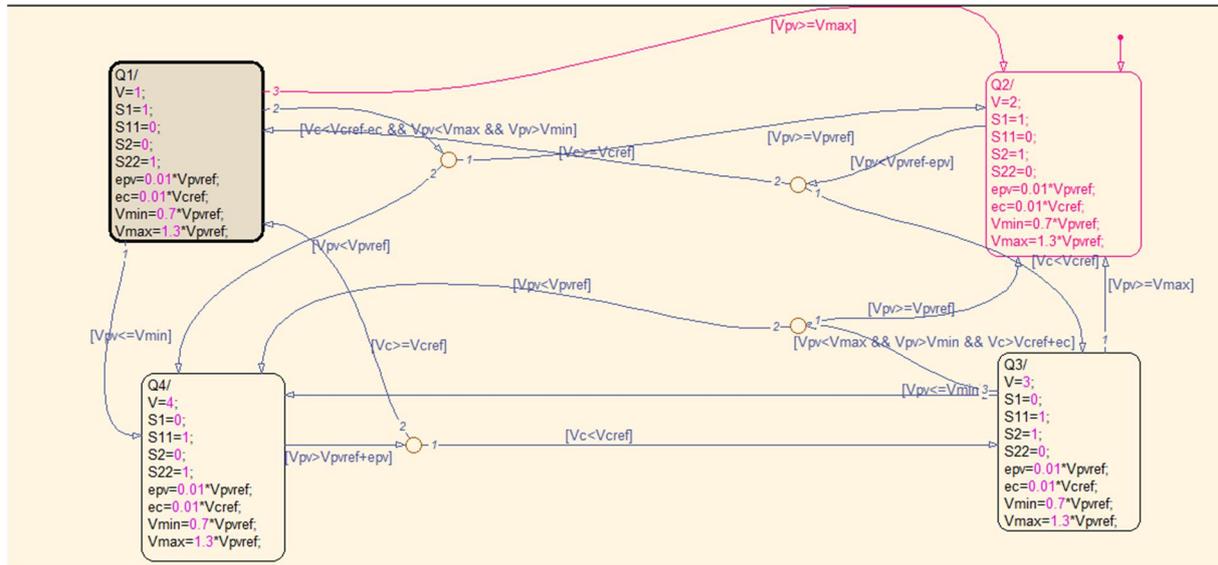


Fig.4.13. Schéma state flow pour la commande de la chaîne photovoltaïque

4.4 Résultats de simulation

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation de la chaîne photovoltaïque avec la commande hybride sous plusieurs conditions. Ces résultats nous permettent de valider les concepts théoriques de la commande hybride.

4.4.1 Fonctionnement de la chaîne photovoltaïque sous des conditions constantes en utilisant la commande hybride

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température égale à 25°C et l'ensoleillement à 1000 W/m^2 .

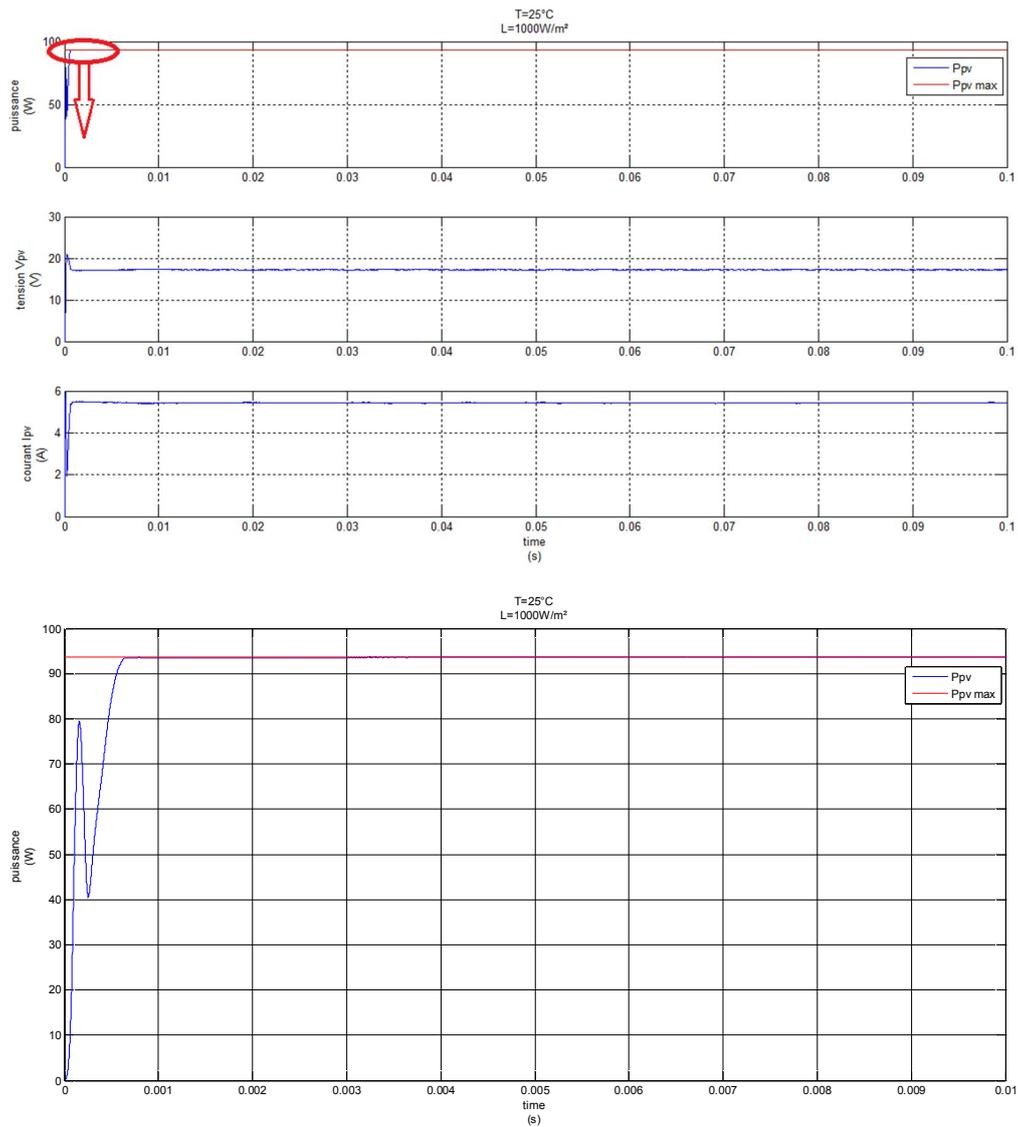


Fig.4.14. Réponse du système photovoltaïque sous une température de 25°C et un éclairement de $1000\ \text{W/m}^2$ en utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant)

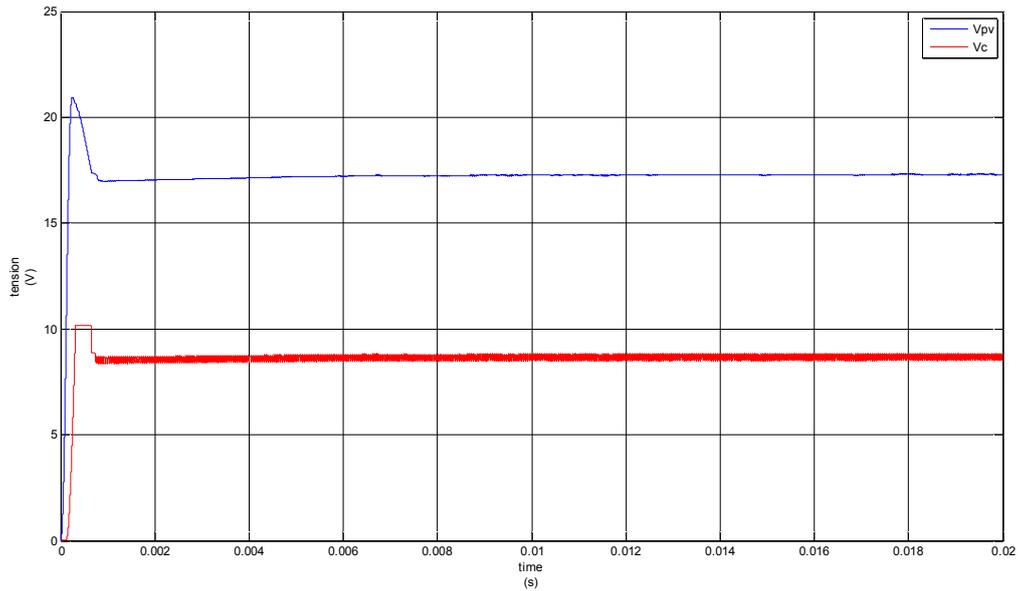


Fig.4.15. Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque »

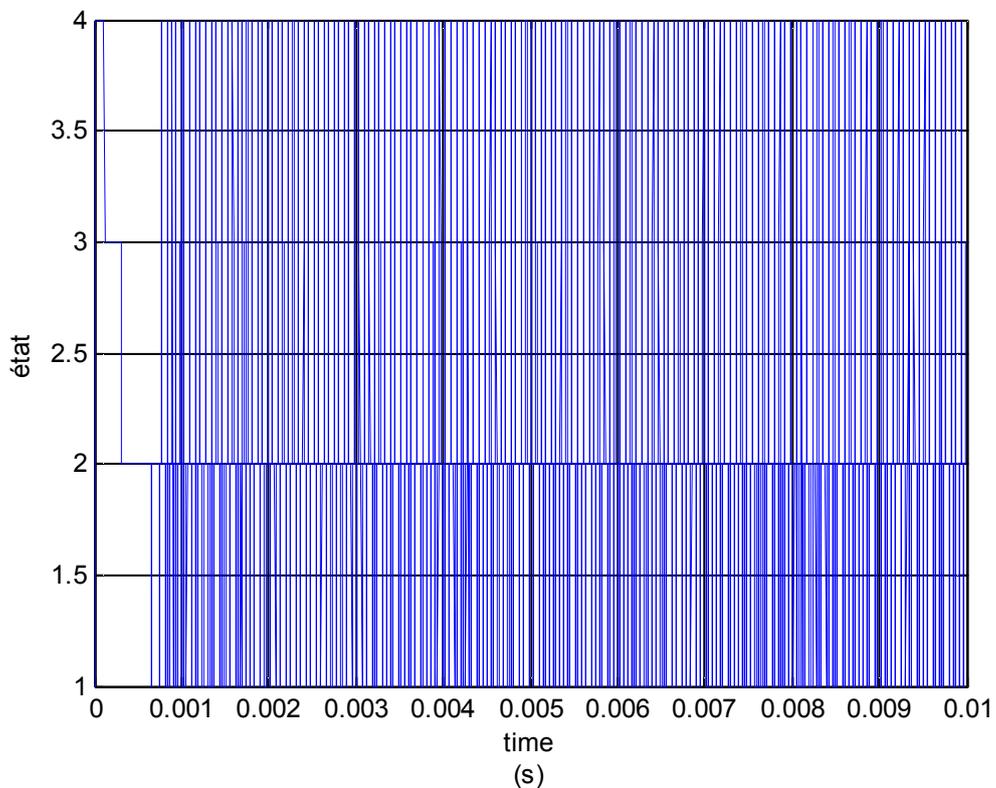


Fig. 4.16. Evolution des transitions entre les modes

Cette commande assure avec perfection le fonctionnement optimal de la chaîne photovoltaïque et la régulation de la tension flottante.

En plus, le temps de réponse du système est très appréciable comparée avec les résultats donnés par le convertisseur Buck-Boost.

4.4.2 Comportement de la chaîne photovoltaïque face à un changement de l'éclairement en utilisant la commande hybride

Afin d'évaluer le temps de réponse de mécanisme de poursuite, le système photovoltaïque est soumis à des variations des conditions de l'ensoleillement. Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'insolation, qui mènent à leur tour à un changement correspondant de la température des cellules.

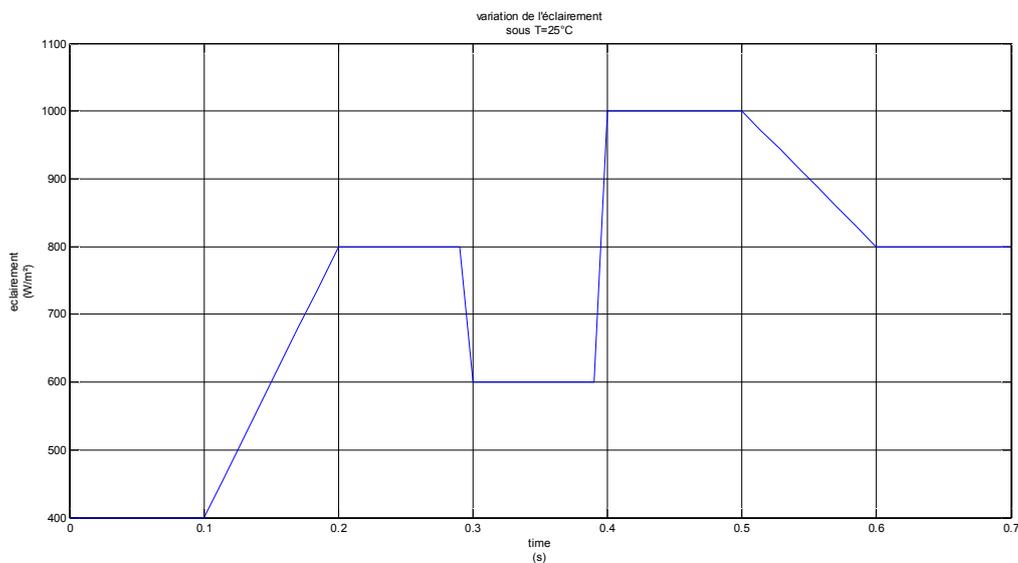


Fig.4.17. variation de l'ensoleillement

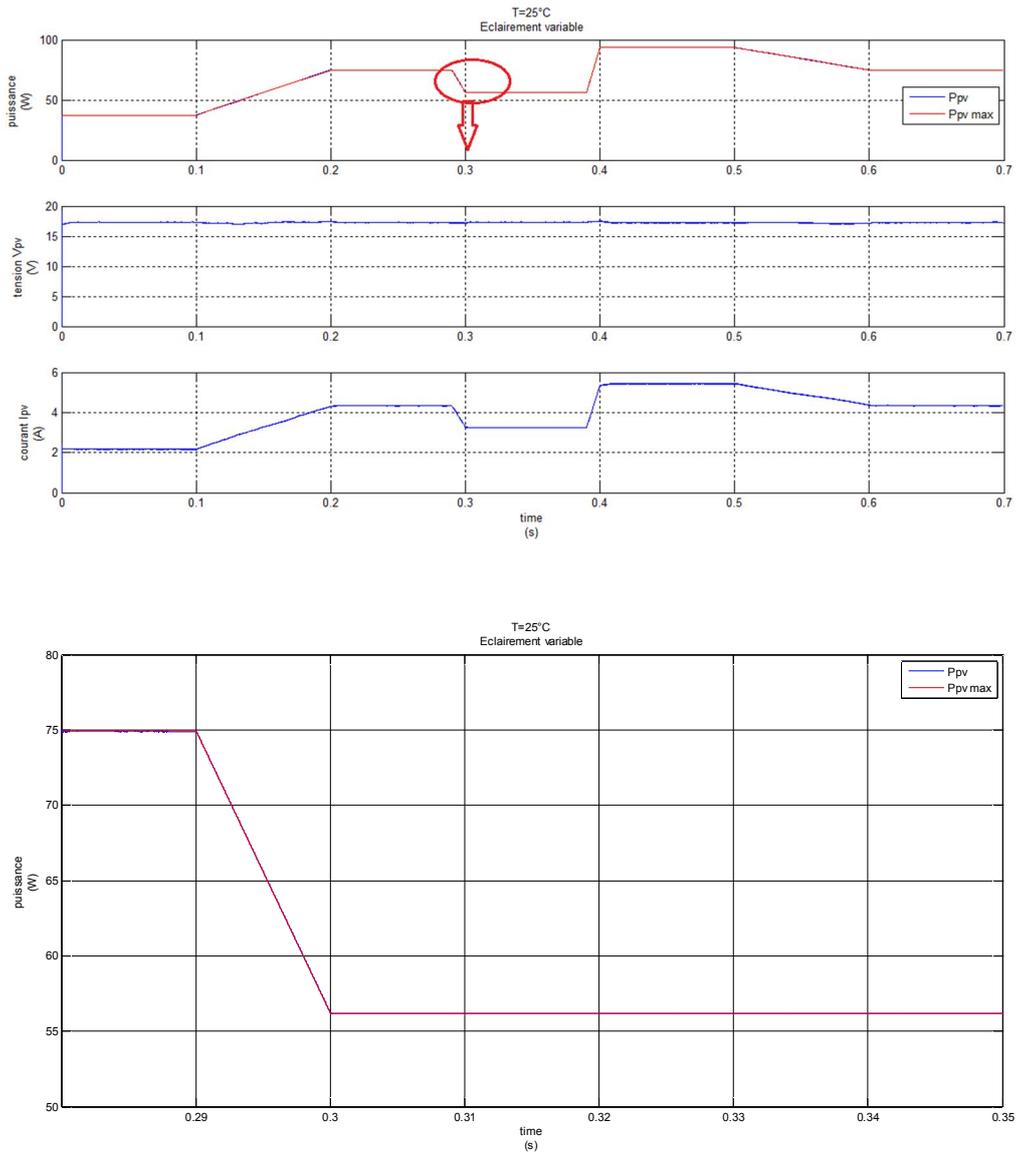


Fig.4.18. Réponse du système photovoltaïque à des variations de l'ensoleillement et sous une température de 25°C utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant)

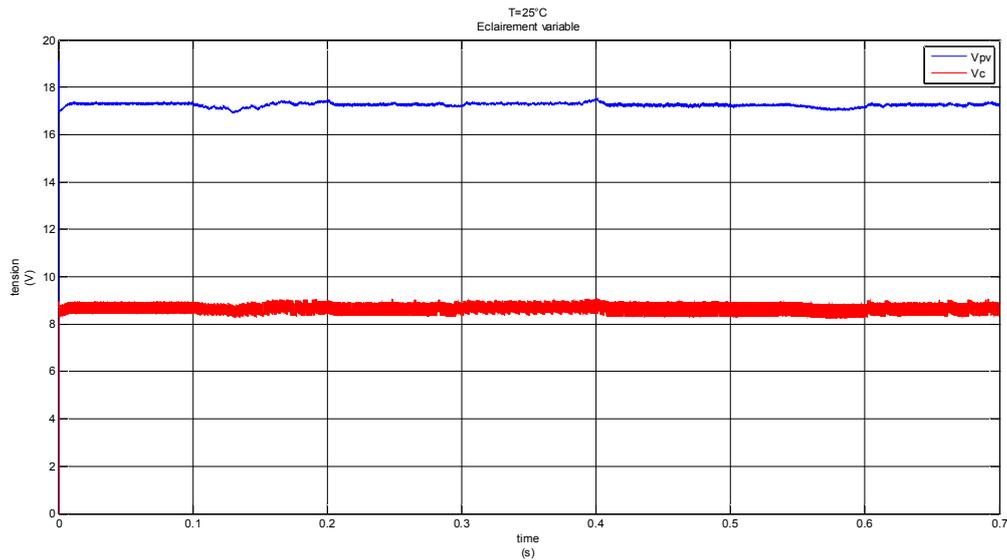


Fig.4.19. Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque »

4.4.3 Comportement de la chaîne photovoltaïque face à un changement de la température en utilisant la commande hybride

En plus de l'ensoleillement, la température de la cellule solaire est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire.

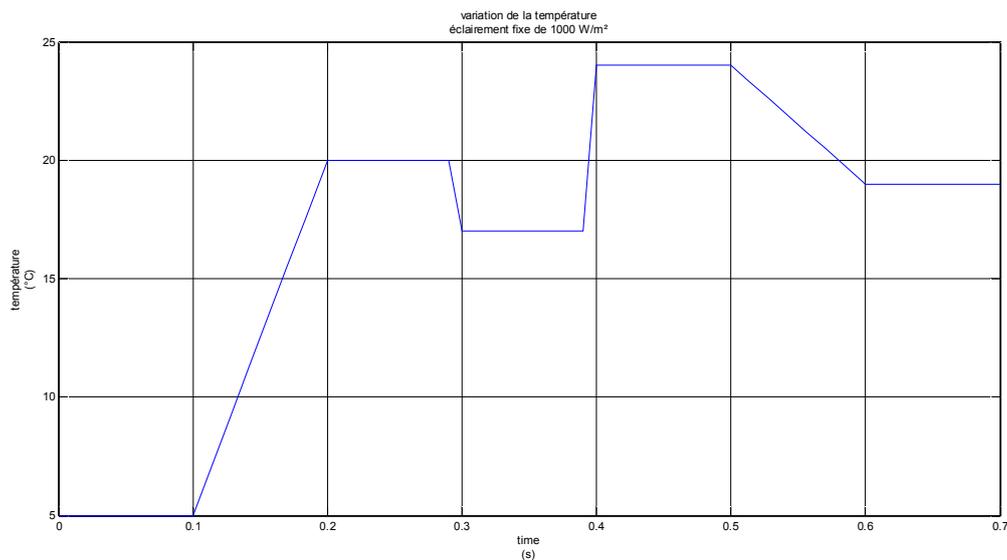


Fig.4.20. variation de la température

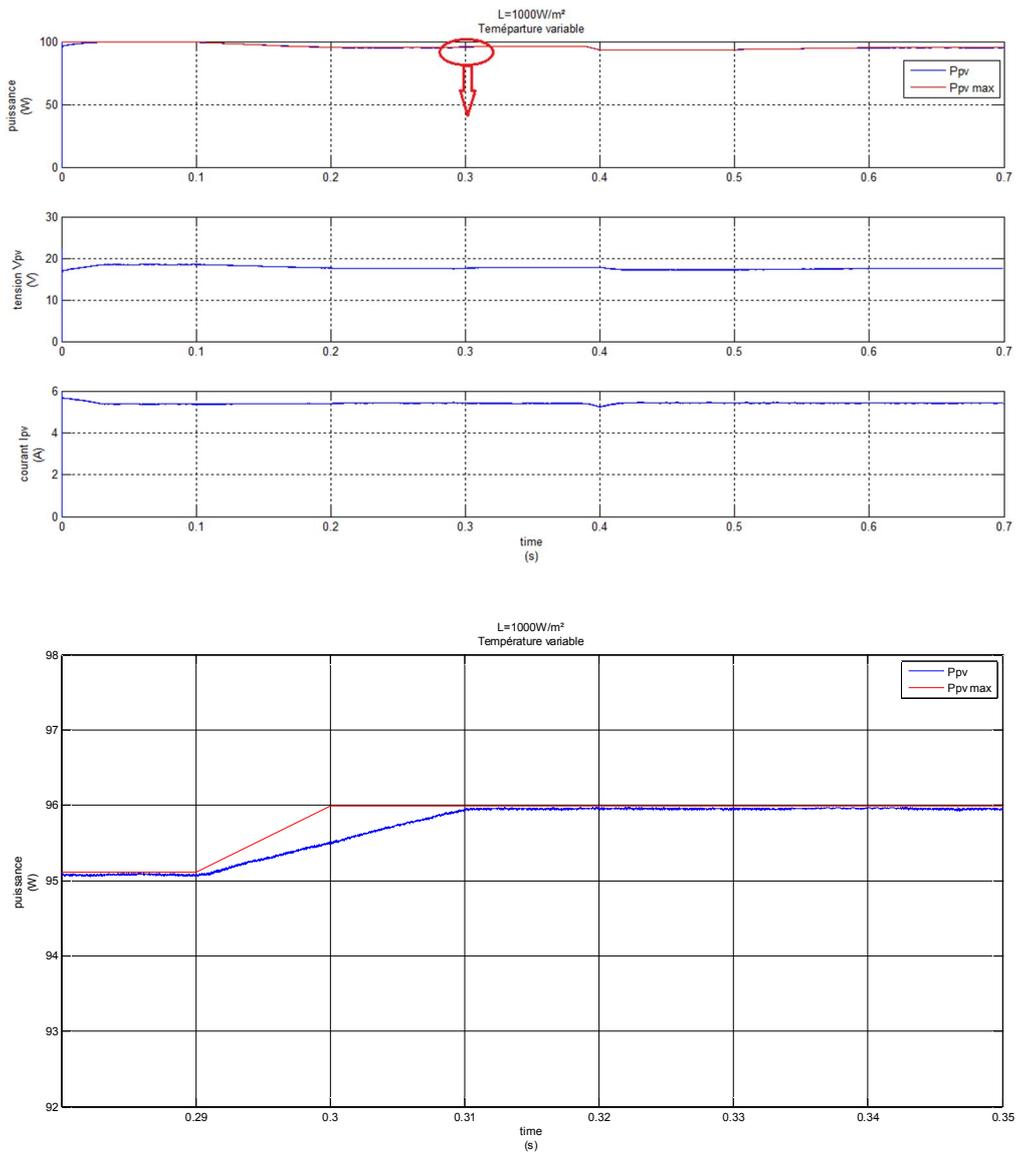


Fig.4.21. Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température et sous un éclairement de 1000 W/m² utilisant la commande hybride (puissance/tension/courant)

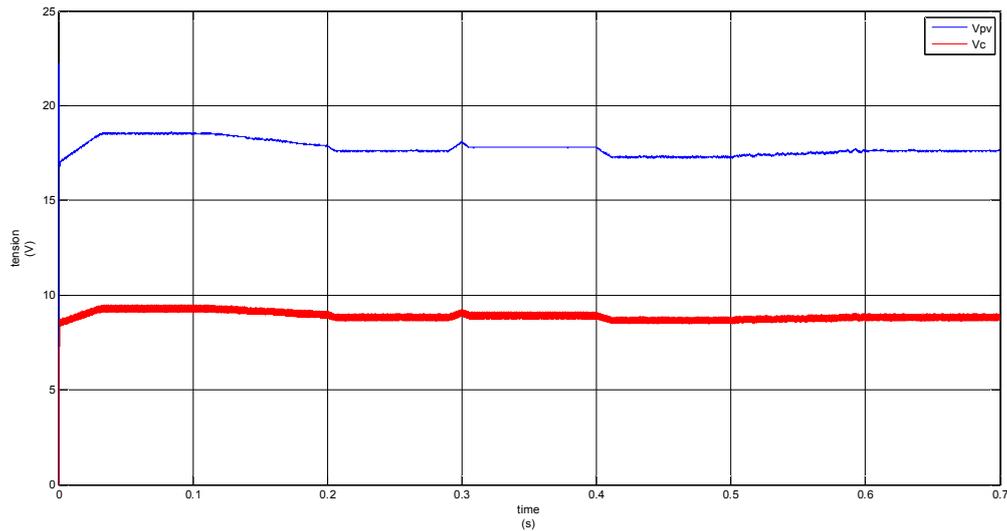


Fig.4.22. Evolution des tensions « flottante et photovoltaïque »

Le système photovoltaïque assure le fonctionnement optimal avec de bonnes dynamiques même en présence des variations climatiques, ce qui confirme la robustesse de cette commande vis-à-vis des perturbations climatiques.

4.4.4 Etude de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation de la chaîne photovoltaïque

Pour tester la robustesse de la commande développée vis-à-vis des erreurs de modélisation de la chaîne photovoltaïque, on perturbe les paramètres du panneau ainsi que ceux du convertisseur multicellulaire. Les résultats de simulation obtenus sont représentés dans les figures (Fig.4.23) et (Fig.4.24).

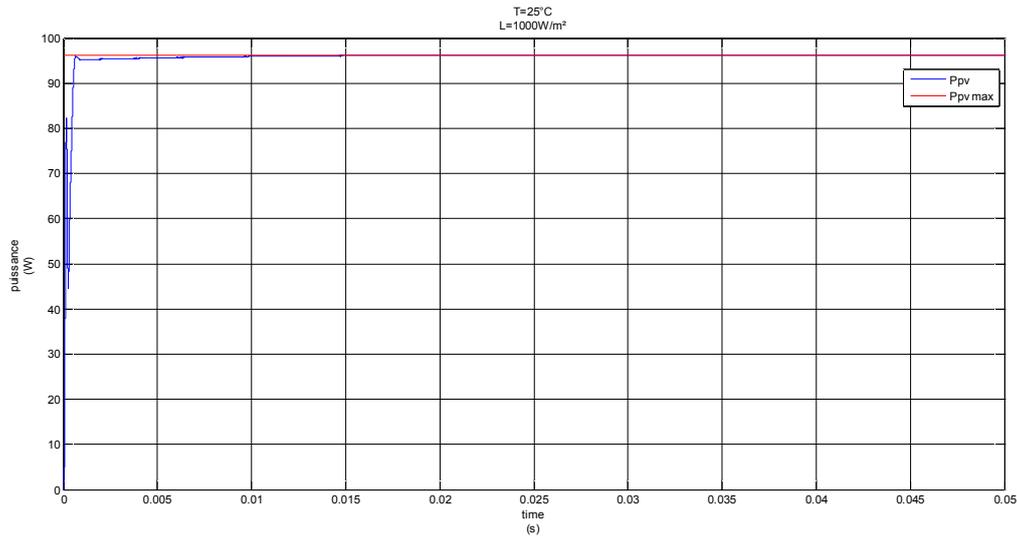


Fig.4.23. Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque comparée avec la puissance maximale

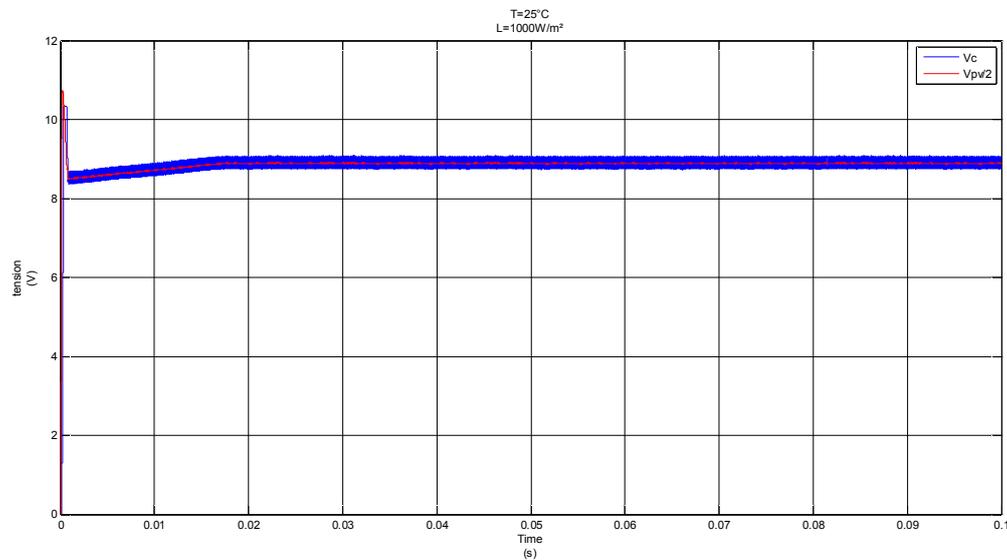


Fig. 4.24. La tension flottante du convertisseur multicellulaire comparée avec la moitié de la tension délivrée par le panneau PV

On remarque que cette commande assure le suivi du point de puissance maximale et la régulation de la tension flottante même en présence des erreurs de modélisation. Ceci est dû au fait que cette commande ne tient pas compte des paramètres du modèle mais seulement des mesures des tensions flottante et photovoltaïque et du courant délivré par le générateur photovoltaïque.

4.4.4 Résultats de simulation avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules

Nous allons maintenant appliquer le modèle hybride à une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules. Le schéma de la chaîne est illustré dans figure 4.25 et le comportement de cette chaîne est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ S3 \\ \frac{dV_{c2}}{dt} \\ \frac{dI_{ch}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{S3}{C_{pv}} \\ S2 & 0 & S1 & \frac{S2-S1}{C1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S3-S2}{C2} \\ \frac{S3}{L} & \frac{S1-S2}{L} & \frac{S2-S3}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{pv} \\ V_{c1} \\ V_{c2} \\ I_{ch} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{I_{pv}}{C_{pv}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

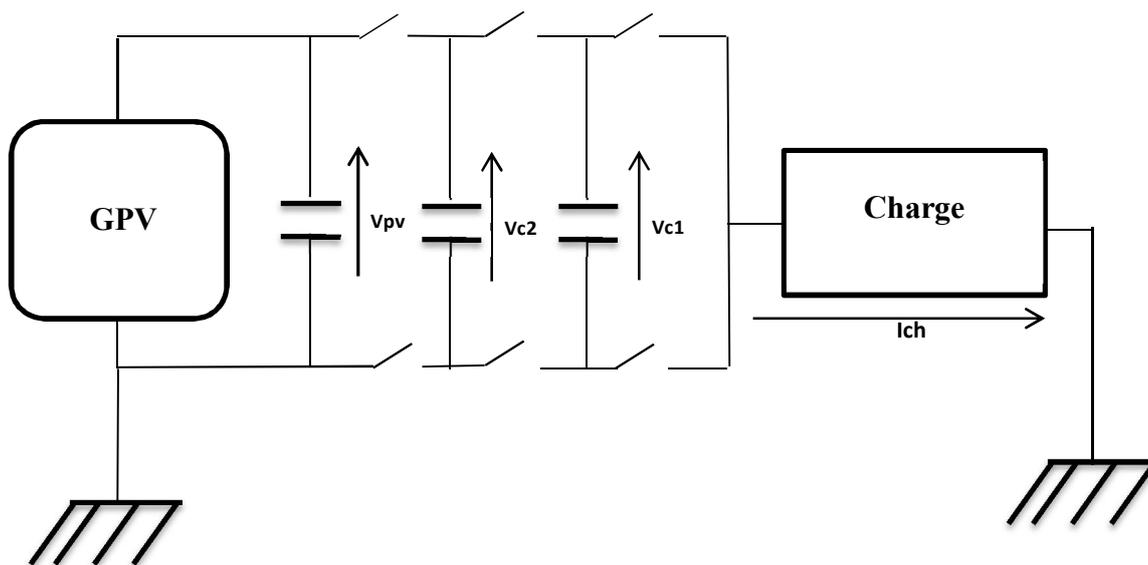


Fig. 4.25. Chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules

Ainsi avec un convertisseur à trois cellules nous distinguons huit modes opérants donnés par $Q = \{q1, q2, \dots, q8\}$. Chaque mode est défini sur l'espace de $X_{qi} = R^4, \forall q_i \in Q$ et de la même façon nous présentons la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à 3 cellules par le système hybride.

Nous validons le modèle hybride proposé et la commande des variables d'états du système avec Simulink – Stateflow. Le modèle de Stateflow avec ce type de convertisseur est illustré dans l'annexe C.

Les figures 4.26 et 4.27 montrent l'évolution des tensions flottantes, la tension photovoltaïque et la puissance délivrée par le GPV sous une température de 25°C et un éclairement de 1000W/m².

La figure 4.28 montrent l'évolution des transitions.

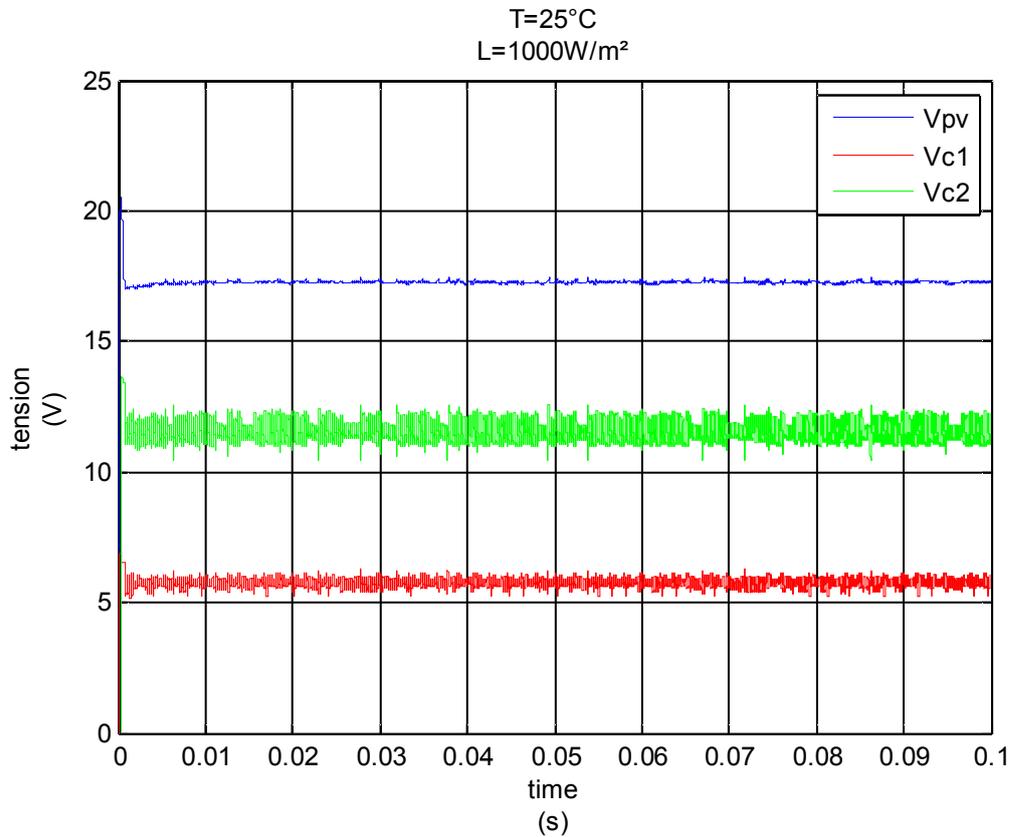


Fig. 4.26. Tension photovoltaïque et les tensions flottantes

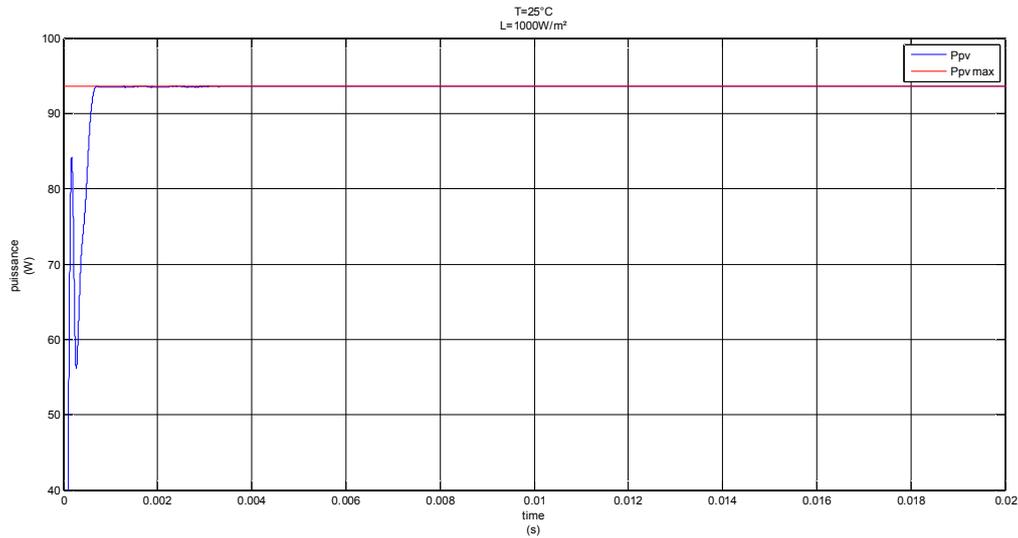


Fig. 4.27. Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque

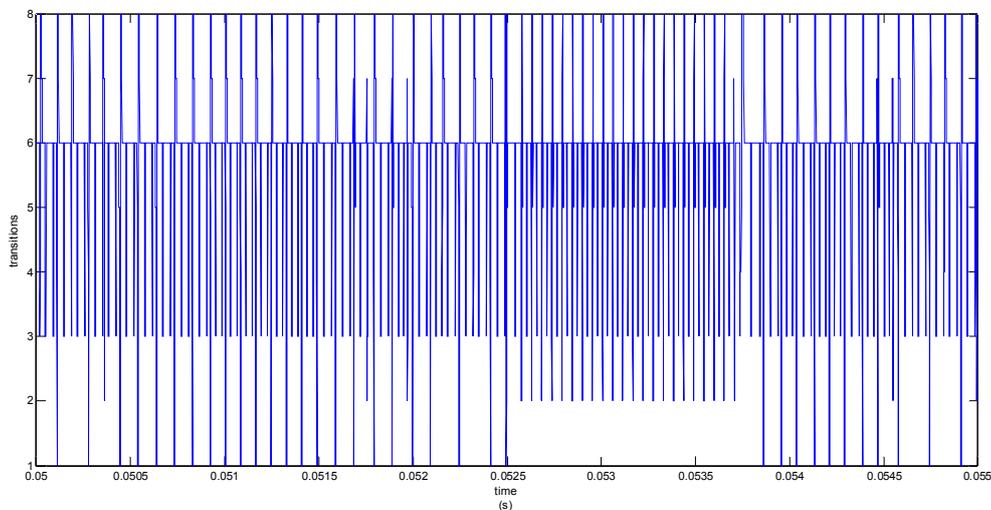


Fig. 4.28. Evolution des transitions entre les modes

4.4.5 Comparaison des résultats avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO

Le tableau suivant illustre une comparaison entre les résultats obtenus avec cette commande et ceux obtenus avec un convertisseur Buck-Boost et un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO.

	Temps de réponse	Ondulation autour du PPM	Nécessité de capteur	Quantité de calcul
Avec un convertisseur Buck-Boost	Moyen	Faible	Faible	Faible
Avec un convertisseur multicellulaire commandé en MLI-BO	Moyen	Haute	Faible	Moyenne
Avec un convertisseur multicellulaire commandé avec la commande hybride	Rapide	Moyenne	Moyenne	Moyenne

Tableau. 4.1. Comparaison des résultats obtenus avec ceux du Buck-Boost et du multicellulaire commandé en MLI-BO

4.5 Conclusion

Dans cette partie, on a modélisé par l'approche hybride une chaîne photovoltaïque. On a constaté que la structure du convertisseur constituant cette chaîne se prête naturellement au modèle hybride, à cause de la présence naturelle des variables discrètes et continues. Ce type de commande exige la connaissance à tout moment des mesures de la tension flottante aussi bien que la tension et le courant à la sortie du générateur PV.

Les résultats de simulation obtenus ont montré de bonnes performances dynamiques, une grande capacité de poursuite du MPP et un parfait équilibrage des tensions flottantes du convertisseur multicellulaire.

CONCLUSION GENERALE

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques, un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travaille avec une meilleure efficacité.

L'objectif de ce travail était de modéliser et commander par une approche non linéaire puis par une approche hybride une chaîne photovoltaïque avec un convertisseur à deux cellules afin d'assurer le fonctionnement optimal de la chaîne.

Nous avons tout d'abord commencé par une étude théorique des cellules solaires et du module photovoltaïque, on a élaboré le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque, et ensuite, on a exposé les différentes méthodes classiques et modernes de poursuite du point de puissance maximale.

Nous avons ensuite posé les différentes problématiques et l'état de l'art sur les convertisseurs de puissance et plus précisément sur le convertisseur multicellulaire. De plus, nous avons présenté l'ensemble des modèles qui sont nécessaires pour la commande d'un convertisseur tout seul ainsi que d'une chaîne photovoltaïque.

Enfin, nous avons procédé - pour une chaîne photovoltaïque avec un multicellulaire - au développement d'une commande basée sur la méthodologie de Backstepping et une autre basée sur les automates hybrides pour assurer le fonctionnement optimal de la chaîne.

Les résultats de simulation de la chaîne avec un convertisseur multicellulaire et avec un convertisseur Buck-Boost nous ont permis de voir l'intérêt de l'intégration du multicellulaire dans la poursuite du point de puissance maximale et l'optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque.

Pour terminer, nous pouvons suggérer comme perspectives pour ce travail :

- Elargir notre étude pour des convertisseurs à plus de quatre cellules.
- Tester le fonctionnement de la chaîne sur un banc d'essai expérimental pour valider les algorithmes proposés.
- Utiliser d'autres approches pour commander et optimiser ce type de chaîne photovoltaïque comme les commandes floues ou les réseaux de neurones.

- Elargir l'étude faite au cours de ce travail à un système photovoltaïque associé à un réseau électrique et utiliser un autre convertisseur multicellulaire pour assurer le fonctionnement d'onduleur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. PALZ, « *L'électricité Solaire* », Dunod Unesco, Paris, France, 1981.
- [2] K. BENMANSOUR, « *Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires : Approche Hybride* », Thèse de Doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2008.
- [3] M. ARROUF, « *Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque* », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constnatine, 2006.
- [4] J.M. KOO, « *Development of a flat-plat solar collector design program* », Master Thesis, University of Wisconsin, 1999.
- [5] H. HADI, « *Photovoltaic water pump system* », PhD thesis university of Kochi, 2003.
- [6] M. OUSAID, « *Optimisation d'un Générateur Photovoltaïques par Réseaux de Neurones Artificiels : Application au Pompage Photovoltaïques* », Mémoire de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [7] T. OBEIDI, « *Commande des hacheurs MPPT par logique floue* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [8] O. THAMEUR, « *Application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs MPPT* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [9] A. AZIZ, « *Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, conception et modélisation d'une chaine photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire* », thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [10] Z. ZIADI, « *Commande hybride d'une maison à une énergie positive* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.
- [11] S. KHALED, « *Etude et réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Novembre 2003.
- [12] T. ESRAM, « *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques* », IEEE Transactions On Energy Conversion, 2006.

- [13] A.M. LIENHARDT, « *Etude de la Commande et de l'Observation d'une Nouvelle Structure de Conversion d'Energie de type SMC (Convertisseur Multicellulaire Superposé)* », Rapport de thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [14] A. NABAE, I. TAKAHACHI, H. AKAGI, « *A new neutral-point-clamped PWM inverter* », IEEE Transactions On Industrial Application, 1981.
- [15] G. GATEAU, « *Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série* », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 1997.
- [16] R. BENSALD, « *Observateurs des tensions aux bornes des capacités flottantes pour les convertisseurs multicellulaires séries* », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.
- [17] K. HERIZI, « *Synthèse d'observateurs hybrides dédiés à la commande tolérante aux défauts : application au convertisseur multicellulaire* », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2009.
- [18] O. TACHON, « *Commande découplante linéaire des convertisseurs multicellulaires série* », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1998.
- [19] O. BETHOUX, « *Commande et Détection de défaillance d'un Convertisseur Multicellulaire Série* », Thèse de Doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2005.
- [20] C.S. CHIU, Member, IEEE, « *T-S Fuzzy Maximum Power Point Tracking Control of Solar Power Generation Systems* », IEEE Transactions On Energy Conversion, 2010.
- [21] M.F. BOUAZIZ, « *commande robuste et observateur hybride pour les convertisseurs multicellulaires* », Mémoire de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.

ANNEXE A

Généralités :

Stateflow est destiné à la représentation des systèmes à événements discrets et à la simulation de leur fonctionnement. Il communique parfaitement avec Simulink dont il renforce la capacité de prise en compte des séquences logiques. D'ailleurs, le bloc Stateflow n'est autre qu'un bloc Simulink masqué. Stateflow s'utilise de manière analogue à Simulink. On construit tout d'abord le schéma en plaçant, grâce à un éditeur, les différents éléments du diagramme (chart) à construire et qui sont essentiellement :

- Les états (states),
- leurs liaisons (transitions)
- ainsi que les libellés attribués aux événements (events) et aux actions.

Comme pour les schémas Simulink, cette représentation graphique recouvre en fait la construction d'une S-fonction. Le schéma Stateflow étant inclus dans un modèle Simulink, il faut lier donc les deux programmes sous-jacents. Cette opération est réalisée automatiquement par la commande start du menu simulation. Cette commande lance la construction préalable du programme globale (langage C) associé au modèle, sa compilation et enfin son exécution. Ce programme peut être téléchargé sur une cible temps réel et ainsi faire fonctionner un automate au toolbox Real Time Workshop.

La terminologie utilisée :

- Une conception hiérarchisée :

Un schéma Stateflow doit être conçu de manière hiérarchisée. Les objets graphiques et non graphiques vont s'emboîter selon la hiérarchie parent-enfant.

1. Le plus haut niveau de la hiérarchie Stateflow est appelé « Machine », il correspond au niveau « Modèle » dans Simulink. Ce vocable est issu de concept Machine à états finis qui a été développé pour rendre compte du fonctionnement des systèmes à événements discrets. La machine peut réunir plusieurs diagrammes Stateflow dont elle est le parent.
2. Le diagramme (chart) : c'est le deuxième niveau qui correspond au sous-système Simulink, décrit une partie de la machine. Il rassemble des états reliés par des transitions. Le diagramme décrit le fonctionnement logique d'un sous ensemble particulier de la machine.

3. L'état (state) : ce niveau correspond à l'état qu'on décrit par un vecteur d'état dans Simulink. Il représente l'état dans lequel se trouve la machine, en quelque sorte l'état actuel de son fonctionnement, par exemple l'état On dans l'exemple du thermostat. Un état peut contenir des sous-états, il devient alors super-état. Par exemple l'état marche d'une machine peut contenir deux sous-états, avant et arrière. L'état avant peut lui aussi avoir des enfants : rapide, lent, attente. Il n'y a pas de restrictions au nombre total de générations dans la descendance d'un parent.
4. L'événement (event) : cet objet Stateflow est un objet non graphique (il n'apparaît sur le diagramme que grâce à son libellé). L'événement joue un rôle majeur dans Stateflow. C'est lui qui active un diagramme qui « s'est endormi » en l'absence d'événements. C'est lui qui va déclencher le franchissement d'une transition particulière d'un état vers l'état suivant et assurer l'exécution des actions.

- Des objets spécifiques :

Les objets Stateflow se rangent en deux catégories : des objets graphiques, représentés par un dessin symbolique normalisé et des objets non graphiques accessibles par leur label. Les informations qui concernent tous ces objets sont recueillies dans un dictionnaire appelé data dictionary. Les objets dont nous avons besoin pour construire un diagramme sont :

- l'état, représenté par un rectangle aux coins arrondis ;
- la transition, représentée par un lien orienté entre deux états. La transition défaut est particulière, elle indique l'état qui devra être actif à l'initialisation du diagramme ;
- des objets non graphiques qui sont les libellés donnés aux états, aux transitions, aux actions, aux événements..., ces noms sont associés à des variables manipulées par le programme (S-fonction) sous-jacent et ne sont donc pas de simples étiquettes de reconnaissance.

- Les données :

Les datas sont des objets non graphiques intervenant dans un diagramme en tant que données (obligatoirement numériques). A la différence des événements dont le rôle est de déclencher l'évolution du diagramme, les datas peuvent être :

- le résultat de cette évolution quand ils sont fabriqués par des actions ;
- la cause de cette évolution quand ils interviennent dans les conditions.

Un bloc Stateflow communique bien avec les blocs Simulink par l'intermédiaire des objets datas. Il reçoit de Simulink des données et il fournit à Simulink un résultat.

Tout comme pour un événement, une donnée doit être déclarée dans le dictionnaire. Si data est déclarée local elle ne sera visible que dans le diagramme ou l'état ou le sous-état dans lequel elle a été déclarée. En pratique, on communique avec Simulink en déclarant des datas Input from ou Output to Simulink. Dans ce cas le bloc Stateflow est automatiquement pourvu d'un port (entrant ou sortant) qui sera relié au bloc Simulink approprié. Si data est déclarée Constant, elle prend et garde la valeur indiquée dans Initial Value. Si elle est déclarée Workspace on doit l'affecter depuis Command window avant de lancer la simulation.

ANNEXE B

Paramètres du module photovoltaïque :

Module photovoltaïque			
I_{scr}	[A]	Courant du court-circuit aux conditions de référence	4.8
k_I	[K ⁻¹]	Coefficient de température de la tension	$2.06 \cdot 10^{-3}$
T_r	[K]	Température de référence	298
L_{ref}	[W/m ²]	Eclairement de référence	1000
V_{ocr}	[V]	Tension de circuit-ouvert aux conditions de référence	21.7
k_v	[K ⁻¹]	Coefficient de température de la tension	0.077
C_1	[]	...	$1.056 \cdot 10^{-5}$
C_2	[]	...	0.0873

Paramètres du convertisseur multicellulaire :

Convertisseur multicellulaire			
C_{pv}	[μ F]	Capacité à la sortie du générateur photovoltaïque	40
C	[μ F]	Capacité flottante	40
R	[Ω]	Résistance de la charge	10
L	[mH]	Inductance de la charge	5

ANNEXE C

L'automate hybride de la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules en utilisant Stateflow

Le schéma de l'automate hybride de la chaîne photovoltaïque associant un convertisseur multicellulaire à trois cellules est illustré par le modèle Stateflow suivant :

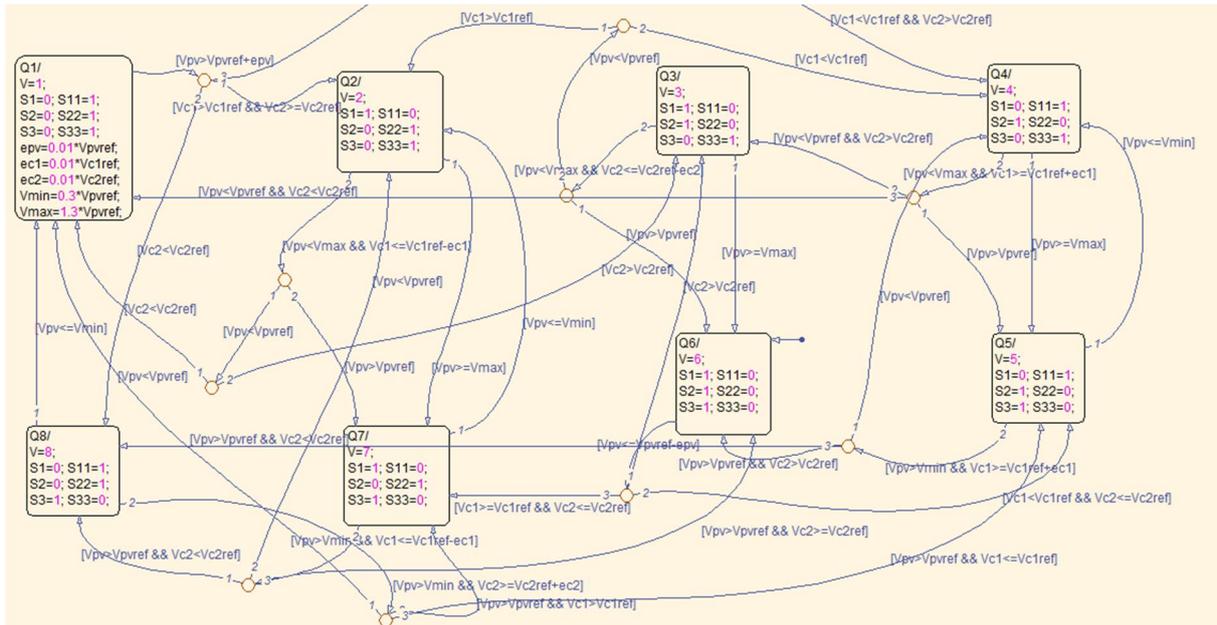


Fig. Schéma Stateflow de la chaîne photovoltaïque avec un convertisseur multicellulaire à trois cellules