

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

Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de la technologie
Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option : Commande des Systèmes Électrique

Thème

Commande d'un générateur Photovoltaïque
basé sur la technique du mode glissant
modifiée

Préparé par
M^{elle}: OUKACI LOUIZA
M^{elle}: ZAIDI NAWEL

Encadré par
Mr: A/Y. ACHOUR

Promotion 2011/2012

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné la chance et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons aussi à remercier nos parents pour leur soutien moral et financier.

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur **A/Y. Achour**, pour avoir proposé un sujet intéressant, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné, pour ses conseils précieux, ses remarques pertinentes et pour le bon déroulement de ce mémoire, nous remercions aussi tous nos enseignants qui nous ont accompagnés durant notre cursus universitaire.

Des remerciements vont également à M^{elle} **Kemcha Rebiha** pour sa précieuse aide, ses conseils et son encouragement.

S'il ya des personnes à ne pas oublier, c'est bien tous nos amis étudiants du Master II en électrotechnique, promotion 2011/2012.

Dédicaces

Je rends grâce, à mon Dieu de m'avoir donnée la force, la volonté d'être patiente dans mes études.

En signe de respect et de reconnaissance je dédie ce modeste travail :

A la personne devant laquelle tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection pour elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma douce **mère**.

A mon cher père qui a payé de vingt quatre années d'amour et de sacrifices le prix de ma façon de penser. Père, je te remercie d'avoir fait de moi une femme. Puisse ce modeste travail constitue une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que tu t'es imposé pour assurer mon éducation. Merci **papa**.

A mes sœurs que j'aime très fort « **Maya et Djidja** ».

A mes frères que j'aime énormément « **Hafid et Mabrouk** ».

A ma tante « **Zina** » que dieu la garde en bonne santé.

A mes cousins, cousines et tout la famille « **Oukaci** ».

A mes tentes et oncles et tout la famille « **Kherkhour** ».

A mon très cher fiancé « **Lyes** » qui a été à mes cotés, ma belle mère et tout la famille « **Chibout** ».

A ma meilleur amie est aussi binôme « **nawel** », et a toute a famille « **Zaidi** ».

A mes deux plus chères amies **Ghania** et **zahwa** et bien sûr sans oublier celle que j'ai partagé des bons moments : **thinhinane, sabiha, Ryma, fairouz, lila, karima, Sabrina,**

Sonia, lydia, Sassa, Hafida, Ryma, amel ainsi tous mes amis chacun son noms.

A tous les étudiants de ma promotion 2011/2012 Electrotechnique LMD.

A toutes personnes que j'aime sans exception.

*L***OUIZA**

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chère parents, mon adorable père qui ma soutenu financièrement et ma
tendre mère qui ma remplie d'affection, soutenu et encouragée.*

*Ma grande mère **yemma mina** que dieu la garde*

*Mon chère frère **Sofiane***

*Ma tendre sœur **Lydia***

*Mes tentes et oncles (**Kaci, Boubkeur, Rezki, Nouara, Ghania et Hassiba**) et
toute la famille « **yazi** »*

Mes cousins et cousines

*Ma binôme et toute sa famille « **oukaci** »*

*Mes deux plus chères amies louiza et Ghania et bien sûr sans oublier celles que j'ai
partagé des bon moments : Tinhinane, Zahwa, Sabiha, Fairouz, Lila,
Karima, Sabrina, Sonia, Sassa, Hafida et Ryma, ainsi tous mes
amis chacun son noms.*

Tous les étudiants de ma proromotion 2011/2012 Électrotechniques LMD.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à

L'aboutissement de ce mémoire.

NAWEL

Cellule photovoltaïque

- PV : photovoltaïque
- V_{oc} : tension de circuit ouvert [V]
- I_{sc} : courant de court-circuit [A]
- η : le rendement de la cellule
- FF : facteur de forme
- T_j : température de jonction [°K]
- T_{jref} : température de jonction de référence de la cellule PV [°K]
- R_s : résistance série [Ω]
- R_{sh} : résistance shunt [Ω]
- I_{ph} : le courant photogénéré [A]
- I_{sh} : courant circulant dans la résistance shunt [A]
- I : courant circulant dans la résistance série [A]
- I_{sat} : le courant de saturation [A]
- V : tension de sortie [V]
- V_d : tension aux bornes de la diode [V]
- I_d : courant circulant dans la diode [A]
- q : charge de l'électron ($q=1.6 \cdot 10^{-19}$)
- K : constante de Boltzmann ($K=1.38 \cdot 10^{-38}$ J/K)
- A : facteur d'idéalité [$A=1$]
- n_s : nombre de cellules en série
- n_p : nombre de cellules en parallèle
- n_c : nombre total de cellules
- I_{mpp} : courant au point de puissance maximale
- V_{mpp} : tension au point de puissance maximale

Générateur photovoltaïque

- GPV : générateur photovoltaïque
- S : la surface [m^2]
- E_s : éclairage ($E_s= 1000W/m^2$)
- E_{sref} : éclairage de référence [W/m^2]
- P_{max} : puissance maximale [W]
- V_{pv} : tension du panneau PV [V]

- I_{pv} : courant du panneau PV [A]
- I_{pvG} : courant photogénéré par le générateur photovoltaïque [A]
- I_G : courant à la sortie du générateur photovoltaïque [A]
- I_{RshG} : courant circulant dans la résistance shunt du GPV [A]
- I_{RsG} : courant circulant dans la résistance série du GPV [A]
- V_G : tension du générateur photovoltaïque [V]
- V_d : tension aux bornes de la diode du GPV [V]
- R_{sG} : résistance série du générateur photovoltaïque [Ω]
- R_{shG} : résistance shunt du générateur photovoltaïque [Ω]
- E_g : énergie du gap

Le hacheur buck-boost

- CS : convertisseur statique
- DC/DC : continu- continu
- L : inductance due lissage [Henry]
- C, C1 : capacités de filtrage [Farad]
- V_0 : tension de charge (sortie) du hacheur [V]
- V_{pv} : tension d'entrée du hacheur [V]
- V_L : tension aux bornes de l'inductance L [V]
- V_C : tension aux bornes de la capacité du hacheur [V]
- D : rapport cyclique du convertisseur DC/DC
- R : résistance du hacheur (la charge) [Ω]
- Th : thyristor du hacheur
- d : diode du hacheur

L'onduleur

- DC/DC : continu-alternatif
- V_a, V_b, V_c : tensions aux bornes alternatives de l'onduleur [V]
- i_1, i_2, i_3 : courants alternatifs de l'onduleur [A]
- I_0 : le courant modulé par l'onduleur [A]
- S'_a, S'_b, S'_c : les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur

La batterie

- V_b : La tension aux bornes de la batterie [V]
- I_b : Le courant de la batterie [A]

- R_b : La résistance de la batterie [Ω]
- E : La F.é.m. de la batterie.

Grandeurs liées à la commande

- X : vecteur d'état global de dimension n_s .
- $K_{1,2}^T$: Gains du retour d'état.
- MC : Mode de Convergence.
- $[X]$: vecteur d'état.
- $[U]$: vecteur de commande.
- $e(x)$: la variable à régler.
- λx : une constante positive qui interprète la bonde passante du contrôle désiré.
- r : degré relatif.
- $S(x)$: est une équation différentielle MPPT : point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)
- PPM : point de puissance maximale
- V_{opt} : tension optimale [V].
- I_{opt} : courant optimal [A].
- V_{ref} : tension de référence [V].
- P&O : Perturbation et observation.
- ε : est un paramètre de l'algorithme.
- C_a : largeur du pas d'ajustement.
- C_p : largeur du pas de perturbation.
- $\frac{I}{V}$: la conductance.
- $\frac{dI}{dV}$: dérivée de l'inductance.
- SSV : système à structure variable.
- S : système à commander.
- $S(X)$: surface de glissement.
- U : tension de commande.
- $S(X)$: équation différentielle linéaire autonome.
- $\hat{S}(x)$: la dérivée de l'équation différentielle linéaire autonome.
- $U_{eq}(t)$: la commande équivalente.
- $U_n(t)$: un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence.
- K_x : une constante.
- Sign : fonction qui prend 1 ou -1

Table des matières

Liste des Figures.....	X
Liste des Tableaux.....	XIII
Introduction générale.....	1
I. Généralités et description de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque	3
I.1. Introduction	3
I.2. Différentes sources d'énergies.....	3
I.3. Généralités sur l'énergie renouvelable	3
I.4. Les Cellules photovoltaïques	5
I.4.1. Historique	5
I.4.2. Structure physique d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.4.3. Différents paramètres de la cellule photovoltaïque.....	7
I.4.4. Différents types de cellules	9
I.5. Modules photovoltaïques :.....	10
I.5.1. Association des cellules	11
I.5.2. Caractéristiques physiques	12
I.6. Système photovoltaïque.....	13
I.6.1. La chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque	13
I.6.2. Les convertisseurs statiques	14
I.6.3. La batterie.....	14
I.6.4. La charge	15
I.7. Différents types de systèmes PV	15
I.7.1. Systèmes autonomes	15
I.7.2. Systèmes hybrides	15
I.7.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	16

I.8.	Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	17
I.8.1.	Avantages	17
I.8.2.	Inconvénients	17
I.9.	Conclusion	18
II-	Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque	19
II.1.	Introduction	19
II.2.	Modélisations.....	19
II.2.1.	Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une diode	19
II.2.2.	Modélisation d'un module photovoltaïque	21
II.2.3.	Modélisation d'un générateur photovoltaïque	21
II.3.	Simulation d'un panneau photovoltaïque	22
II.3.1.	Influence des paramètres météorologiques sur le générateur photovoltaïque....	25
II.3.2.	Influence des paramètres internes de la cellule sur le générateur photovoltaïque :	29
II.3.3.	Modélisation d'un champ photovoltaïque.....	34
II.4.	Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost »	36
II.4.1.	Première phase : ($K=1, d=0$)	37
II.4.2.	Deuxième phase : ($K=0, d=1$)	38
II.5.	Modèle mathématique de l'onduleur	38
II.6.	Batteries	40
II.6.1.	Batterie plomb- acide	40
II.6.2.	Principe de fonctionnement :	41
II.6.3.	Caractéristiques de fonctionnement photovoltaïque de la batterie :.....	41
II.6.4.	Modèle mathématique de la batterie	41
II.7.	Conclusion	42
III-	Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale.....	43
III.1.	Introduction.....	43

III.2.	Philosophie du la MPPT	43
III.3.	Principe de la MPPT	44
III.4.	Classification des commandes MPPT	45
III.4.1.	Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique CS	45
III.4.2.	Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du CS	45
III.5.	Critères de qualité d'une commande MPPT	45
III.6.	Différentes commandes MPPT	46
III.6.1.	Commande par perturbation et observation (P&O)	46
III.6.2.	Algorithme de conductance incrémentale (IncCond).....	49
III.7.	Commande par mode glissant	52
III.7.1.	Principe de fonctionnement.....	52
III.7.2.	Système à structure variables	52
III.7.3.	Principe de la commande par mode glissant	54
III.7.4.	Conception de l'algorithme de commande par mode glissant	55
III.8.	Modification de la commande par mode glissant :	64
III.9.	Conclusion	65
IV-	Validation des lois de commande MPPT	67
IV.1.	Introduction.....	67
IV.2.	Les tests de robustesse du contrôleur par mode glissant vis-à-vis des paramètres météorologiques.....	68
IV.2.1.	Robustesse du contrôleur MPPT-MG dans les conditions standards.....	69
IV.2.2.	Robustesse de contrôleur MPPT-MG vis-à-vis des variations de l'éclairement.....	71
IV.2.3.	Robustesse du contrôleur MPPT-MG vis-à-vis des variations de la température	74
IV.3.	Influence du gain de réglage K_x sur les performances du contrôleur MPPT-MG	77
IV.3.1.	Variation de K_x dans les conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$)	78

IV.3.2. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux Variations de la température	79
IV.3.3. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux Variations de l'éclairement	81
IV.4. Les essais de simulation du contrôleur MPPT-MG modifiée par rapport aux variations des paramètres météorologiques	83
IV.4.1. Variation de K_x dans les conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$)	83
IV.4.2. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de la température	85
IV.4.3. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de l'éclairement	87
IV.5. Conclusion	89
V- Conclusion Générale	90

Liste des Figures

Figure I.1. Réponse spectrale d'une cellule (PV).....	5
Figure I.2. Représentation schématique d'une jonction P-N de la cellule solaire standard	6
Figure I.3. Caractéristique I-V	7
Figure I.4. Différents types de cellules	10
Figure I.5. Association en série.....	11
Figure I.6. Association en parallèle.....	12
Figure I.7. Schémas représentant les composants d'un système photovoltaïque	14
Figure I.8. Schéma Synoptique d'une Installation photovoltaïque autonome	15
Figure I.9. Schéma d'Installation hybride (PV-GE)	16
Figure I.10. Schéma d'installation hybride (PV-RE)	17
Figure II.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	20
Figure II.2. Caractéristique courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$	24
Figure II.3. Caractéristique puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$	24
Figure II.4. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs de température dans un ensoleillement de 1000 w/m^2	25
Figure II.5. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs de température dans un ensoleillement de 1000 w/m^2	26
Figure II.6. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement dans une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$	27
Figure II.7. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement dans une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$	27
Figure II.8. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement et température.....	28
Figure II.9. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement et température.....	29
Figure II.10. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance série.	30
Figure II.11. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance série.	31

Figure II.12. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance shunt.	32
Figure II.13. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance shunt.	32
Figure II.14. Influence de la variation simultanée de R_s et R_{sh} sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	33
Figure II.15. Influence de la variation simultanée de R_s et R_{sh} sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	34
Figure II.16. Champ de deux générateurs photovoltaïque associé en série.	35
Figure II.17. Champ de six générateurs photovoltaïque associé en parallèle.	36
Figure II.18. Circuit équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur	36
Figure II.19. Le circuit équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur au temps de fermeture du commutateur.	37
Figure II.20. Circuit équivalent du convertisseur dévolteur-survolteur au temps d'ouverture du commutateur	38
Figure II.21. Schéma électrique équivalent de l'onduleur MLI de tension.	39
Figure II.22. Modèle simplifié de la batterie plomb-acide.	42
Figure III.1. Principe de la MPPT	44
Figure III.2. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.	47
Figure III.3. Organigramme d'algorithme P&O pour le MPPT	48
Figure III.4. Principe de la méthode de l'IncCond	50
Figure III.5. Organigramme d'algorithme IncCond pour le MPPT	51
Figure III.6. Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation d'une contre réaction d'état variable	53
Figure III.7. Configuration avec changement de structure par commutation de l'organe de commande	54
Figure III.8. Modes de fonctionnement dans le plan de phase	55
Figure III.9. Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement.	57
Figure III.10. La valeur continue $U_{eq}(t)$ prise par la commande lors de la commutation entre U_{max} et U_{min}	58
Figure III.11. Représentation de la fonction « sign »	60
Figure III.12. Phénomène de réticence	61
Figure III.13. Représentation de la fonction « sat(x) ».	65
Figure IV.1. Schéma fonctionnel du système PV commandé par MPPT-MG.	68

Figure IV.2. Les réponses $V_{pv}(t)$, $I_{pv}(t)$, $P_{pv}(t)$ du contrôleur mode glissant dans les conditions standards avec $K_x=0.45$.	70
Figure IV.3. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG lors d'une augmentation de l'éclairement (de $500W/m^2$ à $1000W/m^2$) avec $K_x=0.45$.	72
Figure IV.4. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG pour une diminution de l'éclairement (de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$) avec $K_x=0.45$.	73
Figure IV.5. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG pour une augmentation de température (de $25^\circ C$ à $45^\circ C$) avec $K_x=0.45$.	75
Figure IV.6. Comportement du contrôleur CMG lors d'une diminution de la température	76
Figure IV.7. Les effets de la variation de K_x (0.6 à 0.01), sur les performances du contrôleur MPPT-MG avec $T=25^\circ C$ et $E=1000W/m^2$:	79
Figure IV.8. Influence du gain K_x (0.6 à 0.01), sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux variations de T ($25^\circ C$ à $45^\circ C$).	81
Figure IV.9. Influence du gain K_x (0.45 à 0.05), sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux variations de l'éclairement ($1000W/m^2$ à $850W/m^2$).	82
Figure IV.10. Les effets de la variation de K_x (0.6 à 0.25), sur les performances du contrôleur MPPT-MG modifiée avec $T=25^\circ C$ et $E=1000W/m^2$.	84
Figure IV.11. Influence du gain K_x (0.6 à 0.25), sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de T ($25^\circ C$ à $45^\circ C$).	86
Figure IV.12. Influence du gain K_x (0.6 à 0.25), sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de E de ($1000W/m^2$ à $850W/m^2$).	88

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Paramètres électriques des panneaux SIEMENS	23
Tableau II.2. Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110	23

Introduction générale

La demande mondiale en énergie est en croissance rapide dont la grande partie de production est assurée par des sources fossiles, l'utilisation de ces dernières est la responsable majeure des gaz à effet de serre, la consommation excessive réduit les réserves d'une manière excessive mettant en péril l'avenir. Cependant, la seule alternance qui existe c'est d'exploiter les énergies renouvelables en particulier l'énergie solaire.

Le rayonnement solaire est la ressource énergétique la plus partagée et la plus abondante sur terre, le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace.

Une énergie est nommée renouvelable car elle se régénère naturellement et indéfiniment à l'échelle de notre civilisation. Actuellement l'énergie solaire photovoltaïque Répond mieux à ces critères.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible [1].

Les avantages de la technologie photovoltaïque sont nombreux [2]. La source d'énergie (le soleil) est propre et renouvelable, elle ne produit ni gaz ni déchets toxiques par son utilisation. En plus, le système photovoltaïque est complètement à semi conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériaux n'est consommé ou émis.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit bien connue depuis de nombreuses années comme une source d'énergie électrique ayant de grandes possibilités qui peuvent aller de quelques milliwatts aux mégawatts néanmoins, elle ne se développe pas en grandes

proportions et son problème reste son optimisation. Plusieurs techniques d'optimisations sont développées dans ce sens afin d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation PV et la détection du point de puissance maximale (MPPT).

L'objectif de notre travail est d'optimiser un système PV pour poursuivre le point de puissance maximale (MPPT) en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur PV, quelques soient les variations de l'éclairement et de la température, parmi les techniques utilisées on a choisie la commande par mode glissant.

Ce mémoire est présenté comme suit :

Après une introduction générale

Le chapitre I présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants. Il donne également les avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque.

Le chapitre II est consacré à la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

Le chapitre III est consacré à la présentation des différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale et on s'est intéressé à la commande par mode glissant, ou on présente une variante modifiée par rapport au mode glissant standard.

La validation par simulation du système d'alimentation PV commandé par le mode glissant standard et modifié est donnée au chapitre IV.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

I. Généralités et description de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot "photovoltaïque" vient du grec "photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [3].

I.2. Différentes sources d'énergies

Il existe plusieurs sources d'énergie de nature différente qui sont :

- 1) **Énergie fossile** : pétrole, charbon et gaz naturel.
- 2) **Énergie terrestre** : l'énergie marémotrice et l'énergie géothermie.
- 3) **Énergie nucléaire** : par fission et par fusion d'atome.
- 4) **Énergie renouvelable** : énergie hydraulique, l'énergie verte (la biomasse), les éoliennes et l'énergie solaire.

I.3. Généralités sur l'énergie renouvelable

Les sources d'énergies disponibles dans notre environnement qui produisent de l'électricité sont : l'eau, le soleil et le vent et elles sont renouvelables :

- L'énergie hydroélectrique utilise l'énergie de l'eau vive pour générer de l'électricité.
- La production de l'énergie solaire par effet photovoltaïque basée sur la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. Cette énergie est soit injectée dans le réseau par l'intermédiaire d'un onduleur, soit stockée dans des batteries.

- Enfin, la production d'électricité à partir du vent, utilisant des aérogénérateurs (éoliennes).

❖ **Définition de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule nommée photovoltaïque (PV) basée sur l'effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule

❖ **Rayonnement solaire [4] :**

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche Terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie Solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne de 1367 W/m^2 . Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

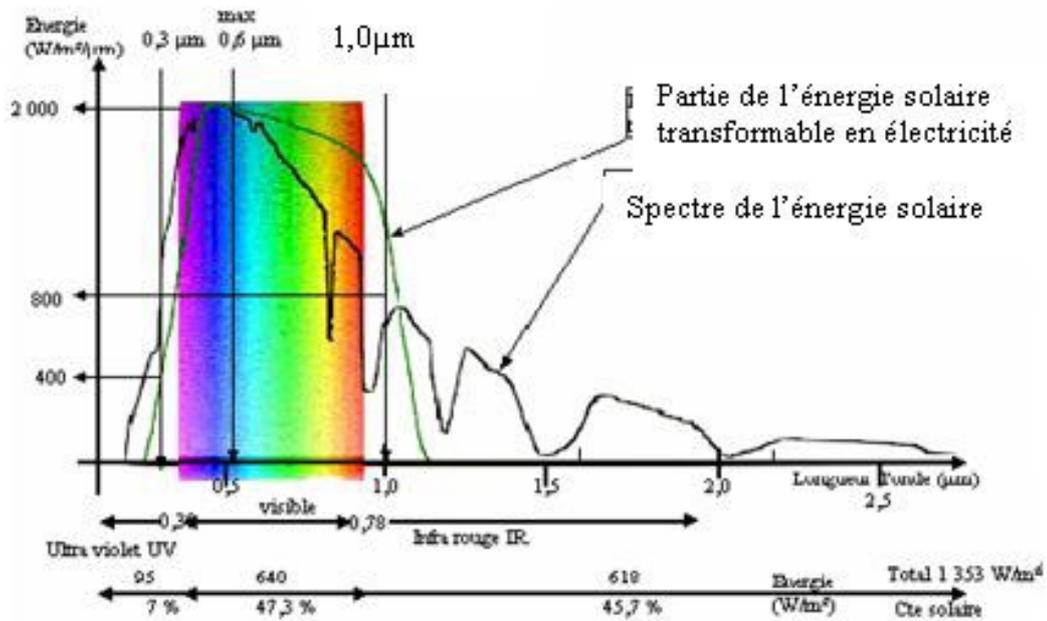


Figure I.1. Réponse spectrale d'une cellule (PV), [4]

Au cours de ces dix dernières années ce spectre à été homologués par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m².

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.)

I.4. Les Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont les constituants des panneaux solaires. On s'intéressera au fonctionnement de ces cellules ainsi qu'à leur rendement afin de découvrir l'efficacité de ce système.

I.4.1. Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. En 1930 sont apparues les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO), puis en sélénium (Se). En 1954, les premières cellules au silicium (Si) ont été réalisés dans les l'laboratoire de la compagnie de BELL Téléphone aux États-Unis [5].

Actuellement des recherches sont effectuées afin d'inventer de nouvelles cellules avec un bon rendement et ayant une certaine stabilité de leurs caractéristiques, tout en minimisant leurs cout de fabrication.

I.4.2. Structure physique d'une cellule photovoltaïque

Une pile solaire est un dispositif semi-conducteur qui absorbe la lumière du soleil et la convertit en énergie électrique. La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple du silicium (Si) construite par une masse jonction PN avec une efficacité d'environ à 17% [6].

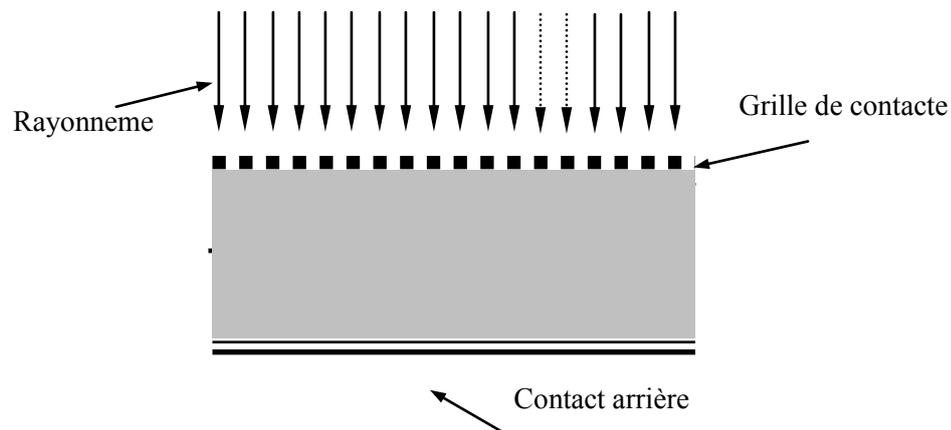


Figure I.2. Représentation schématique d'une jonction P-N de la cellule solaire standard [6]

Les porteurs de charge créés dans la région d'épuisement sont séparés à l'aide d'existence d'un champ électrique. Ceci mène à polariser en direct la jonction P-N et générer une tension. Quand une charge est reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé photo-courant) traversant la charge. Dans les systèmes photovoltaïques, les cellules sont combinées dans les modules, et par conséquent sont nommées "les modules photovoltaïques".

Beaucoup d'efforts sont faits d'augmenter l'efficacité des piles solaires en utilisant des techniques multicouches et de divers matériaux semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium (InP), le séléniure de cuivre d'indium (CuInSe₂), le tellure de cadmium (CdTe), le séléniure de cuivre (Cu₂Se), et

le phosphore de zinc (Zn_3P_2). Ceci a augmenté l'efficacité de cellules à plus de 21% pour le silicium et à 25% pour les piles solaires de GaAs ces dernières années [7].

1.4.3. Différents paramètres de la cellule photovoltaïque

La Figure I.3 montre la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule PV à une température fixée T et à une certaine ambiante irradiation E.

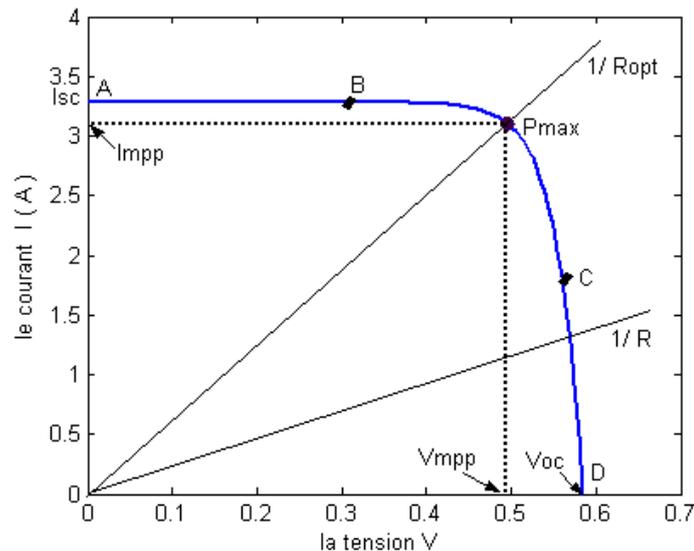


Figure I.3. Caractéristique I-V [8]

Si une résistance série variable R connectée à la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la courbe I-V et la caractéristique I-V de la charge. La caractéristique de la charge résistive est une droite avec $I/V=1/R$. si la résistance est petite la cellule fonctionne dans la région A et B seulement (comme une source de courant constant) et si la résistance est large, la cellule fonctionne dans la région C vers D de la courbe (comme une source de tension constant).

1.4.3.1. Le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert

Les deux importants paramètres d'une cellule PV sont : le courant de court-circuit I_{sc} et la tension de circuit ouvert V_{oc} .

- **Le courant de court-circuit** : $I_{sc} \approx I_{ph}$. il est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où $V=0$.

- **La tension à circuit ouvert (Voc)** : Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage sans circuit de charge, V_{OC} est donnée par la relation suivante :

$$V = V_{oc} = \left(\frac{A \cdot K \cdot T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (I. 1)$$

Avec V_{th} : la tension thermique

Ou encore : l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc ;

$$I = I_{sc} \left(1 - \exp \left[- \frac{V - V_{oc} + I R_s}{V_{th}} \right] \right) \quad (I. 2)$$

D'autres paramètres importants sont :

1.4.3.2. Le point de puissance maximal

C'est le point sur la courbe I-V de la cellule où la puissance est maximale, ceci peut être vu sur la **Figure I.3** où une condition de puissance maximum est réunie (vérifié) à l'intersection d' I_{mpp} et V_{mpp} .

1.4.3.3. Le facteur de forme FF

Est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge et le produit d' I_{sc} et V_{oc} .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (I. 3)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension [8].

1.4.3.4. Rendement d'une cellule photovoltaïque

Parmi les paramètres les plus significatifs d'un système est son rendement. Dans la gamme des capteurs, dont fait partie la cellule PV, c'est aussi un critère de qualité.

Le rendement d'une cellule est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface. Toute l'énergie de la lumière solaire n'est pas transformée en électricité, car :

- Certains photons sont réfléchis sur la surface avant des cellules,
- Certains ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron,
- Seuls les photons d'énergie suffisantes, où l'énergie du photon est supérieur à l'énergie de gap sont absorbées et créent des paires électrons-trous,

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule. Parmi les matériaux les plus utilisées et en raison de son faible coût, on trouve le Silicium sous ses différentes formes cristallines (monocristallin, poly cristallin ou bien amorphe). Les rendements les plus courants des modules PV actuellement commercialisés sont de l'ordre de : 12,7% pour le Silicium amorphe hydrogéné, 15% pour le Silicium multi cristallin et 23% pour le Silicium monocristallin [9].

1.4.4. Différents types de cellules

Les cellules solaires photovoltaïques à base du Silicium sont les plus reconnues et commercialisées à travers le monde. Les différents types de cellules sont [9] :

1.4.4.1. Les cellules monocristallines

C'est la première génération de photopile caractérisées par :

- ❖ Un taux de rendement excellent;
- ❖ Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ;
- ❖ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

1.4.4.2. Les cellules poly-cristallines

Elles ont les caractéristiques suivantes :

- ❖ Coût de production moins élevé ;
- ❖ Procédé nécessitant moins d'énergie ;
- ❖ Rendement moyen.

1.4.4.3. Les cellules amorphes (cellules de la calculatrice par exemple) :

Leurs caractéristiques sont :

- ❖ Cout de production bien plus bas ;
- ❖ Rendement plus bas ;
- ❖ Durée de vie plus faible.

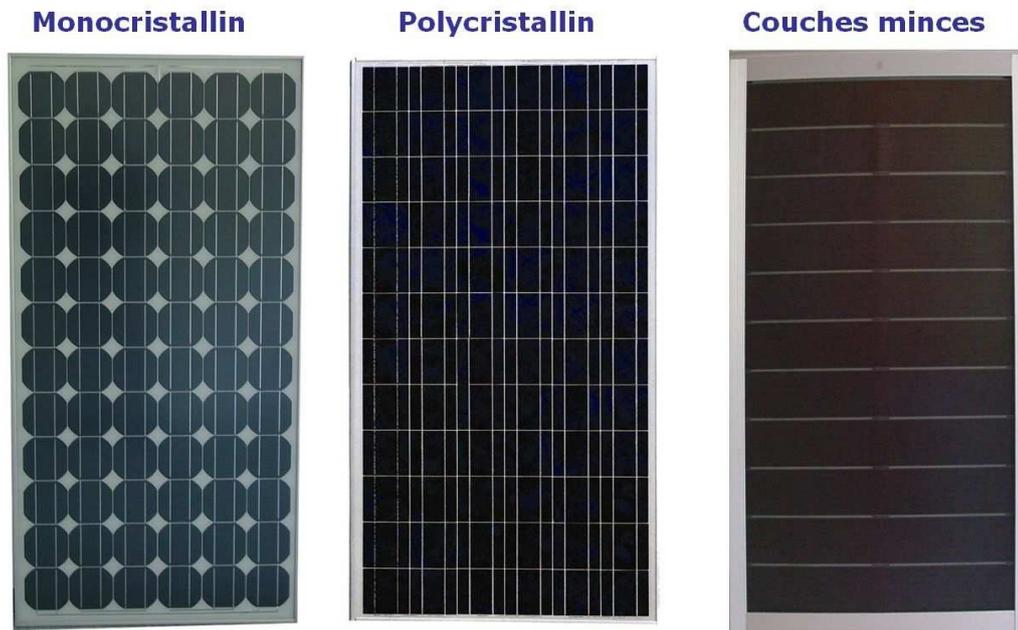


Figure I.4. Différents types de cellules [8].

I.5. Modules photovoltaïques :

Le module solaire PV est un élément standard directement utilisable et il assure une double fonction :

- La première est l'association des cellules (36 cellules) pour l'obtention d'une caractéristique courant-tension intéressante pour l'application.
- La deuxième est la protection contre des agents atmosphériques extérieurs afin d'augmenter leur durée de vie.

Les modules peuvent également être connectés soit en série ou en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant utilisé.

I.5.1. Association des cellules

Un générateur électrique est constitué de cellules de très faibles puissances qui sont insuffisantes pour les majorités des applications et afin d'augmenter la puissance, on associe plusieurs cellules photovoltaïques en série et en parallèle [10].

➤ Mise en série

Les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

Dans ce cas, la tension du circuit ouvert (série) V_{soc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{soc} = n_s \cdot V_{oc} \quad (I.4)$$

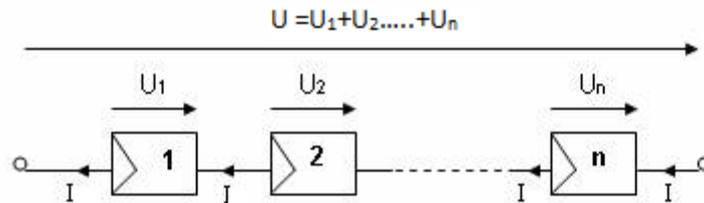


Figure I.5. Association en série.

➤ Mise en parallèle

Ce genre de regroupement permet l'augmentation du courant du générateur.

La tension générée par les cellules est la même. Le courant passant par la charge est la somme des courants de chaque branche et il est donné par la relation suivante :

$$I = \sum_{i=1}^{m_p} I_i \quad (I.5)$$

m_p : Nombre de cellules en parallèle.

I_i : Courant débité par chaque cellule.

Dans ce cas, le courant de court-circuit est donné par la formule suivante :

$$I_{psc} = m_p \cdot I_{sc} \quad (I.6)$$

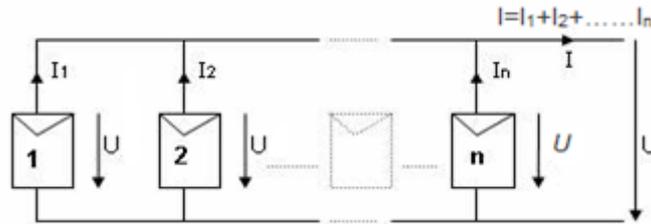


Figure I.6. Association en parallèle

I.5.2. Caractéristiques physiques

Le rôle de groupement électrique de cellules solaires consiste à assurer la protection de ces cellules vis-à-vis des agressions extérieures et le contrôle de leur température.

- **Protection contre les agressions extérieures**

La durée de vie d'un module sera essentiellement liée à la bonne encapsulation qui doit résister aux agents atmosphériques les plus durs, tels que : température, humidité, vent, sable... etc.

- **Problèmes thermiques**

L'énergie solaire reçue sur le module n'est pas entièrement convertie en électricité, dans la plus grande partie est transformée sous forme d'énergie calorifique (chaleur).

C'est l'aptitude du matériau d'encapsulation à évacuer les calories qui déterminera la température d'équilibre (de fonctionnement). Le rendement de la cellule étant d'autant meilleur que la température de jonction est plus basse. L'encapsulation devra donc permettre un meilleur contacte thermique possible avec l'extérieur.

- **Type d'encapsulation**

Les caractéristiques des deux principaux procédés d'encapsulation sont les suivantes [10].

1. Procèdes bi-verre : Les cellules sont placées entre deux plaques de verre trempé. L'étanchéité est assurée par un joint maintenu par un cadre en aluminium anodisé. Les avantages de cette technologie se résument dans la

bonne protection contre les agents extérieurs, donc le produit est rigide et compact. En revanche, les inconvénients sont :

- Le poids élevé du module, se traduisant sur le terrain, lors des installations par la contrainte de manipulation.
- Le coefficient de température entre deux plaques de verre, se traduisant par des craquages spontanés (frais additionnels pour remplacer les modules brisées).
- Une température nominale de fonctionnement des cellules (NOCT) élevée (phénomène de serre), par conséquent, un rendement faible.

2. Procédés mono-verre : La face avant est constituée d'un verre trempé et l'étanchéité est assurée, la phase arrière est remplacée par des composites multicouches étanches. Le choix du procédé est souvent le résultat d'un compromis entre le coût de fabrication et la fiabilité. En effet, sur le plan technico-économique, le procédé de mono-verre est le plus utilisé à travers le monde selon le rapport d'expertise de Jet Propulsion Laboratory (organisme certificateur) et Canadien Coast Guard (assurance qualité) [10].

I.6. Système photovoltaïque

I.6.1. La chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

Le système photovoltaïque est composé de trois parties essentielles qui sont :

- **Partie production d'énergie :** Cette partie est composée d'un ou plusieurs modules qui se comporte comme un générateur à courant continu.
- **Partie contrôle de l'énergie :** Le courant que fournissent les modules dépend, de l'ensoleillement et leurs position par rapport au soleil, d'où une régulation dans la fourniture d'énergie. Alors il est nécessaire de contrôler l'approvisionnement en électricité à l'aide d'un système de stockage de l'énergie, avec ou sans régulation de ce stock.
- **Partie utilisant l'énergie produite :** Elle se compose d'un ou plusieurs récepteurs qui utilisent l'énergie produite et qui est contrôlée.

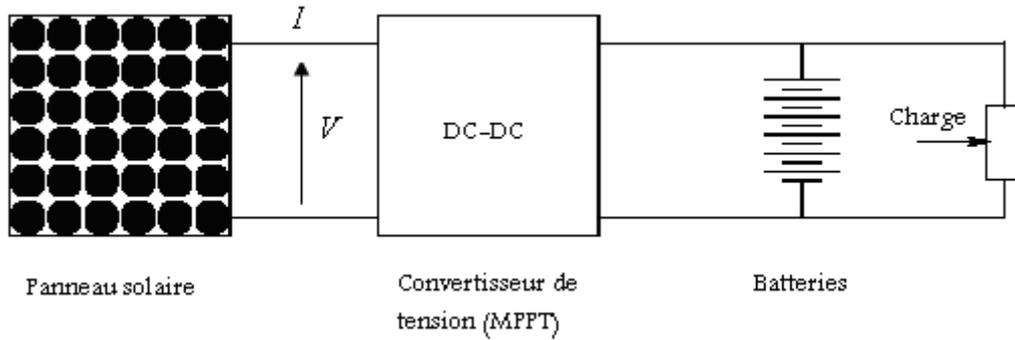


Figure I.7. Schémas représentant les composants d'un système photovoltaïque [8]

I.6.2. Les convertisseurs statiques

I.6.2.1. Le convertisseur DC/DC (le Hacheur)

Afin de mieux exploiter le générateur PV à une large bande de variation des paramètres météorologiques (éclairage et température) et des paramètres à l'intérieure de la cellule (résistance série et shunt), le convertisseur statique (DC/DC) est l'élément essentiel pour avoir un bon rendement énergétique. Il existe plusieurs types d'hacheur (élevateur, abaisseur élevateur-abaisseur).

I.6.2.2. Le convertisseur DC/AC (onduleur)

L'onduleur est un convertisseur qui permet d'échanger l'énergie entre une source de tension continue et une charge résistive. Ils sont généralement utilisés pour alimenter des charges à courant alternatif (CA).

I.6.3. La batterie

La batterie d'accumulateur électrochimique est la plus utilisée pour les systèmes photovoltaïque. Il existe deux types de batteries : batteries avec accumulateur au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateur au nickel-cadmium (Ni-Cd). Le rôle de la batterie consiste à remplacer le manque d'énergie du à l'absence d'ensoleillement.

I.6.4. La charge

C'est un élément destiné à consommer l'énergie ou l'électricité produite par les générateurs photovoltaïques.

I.7. Différents types de systèmes PV

On distingue trois type de système photovoltaïque savoir : Autonomes, hybrides et reliés au réseau [12].

I.7.1. Systèmes autonomes

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

Dans la majorité des cas, un système autonome exige des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter des utilisations en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

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

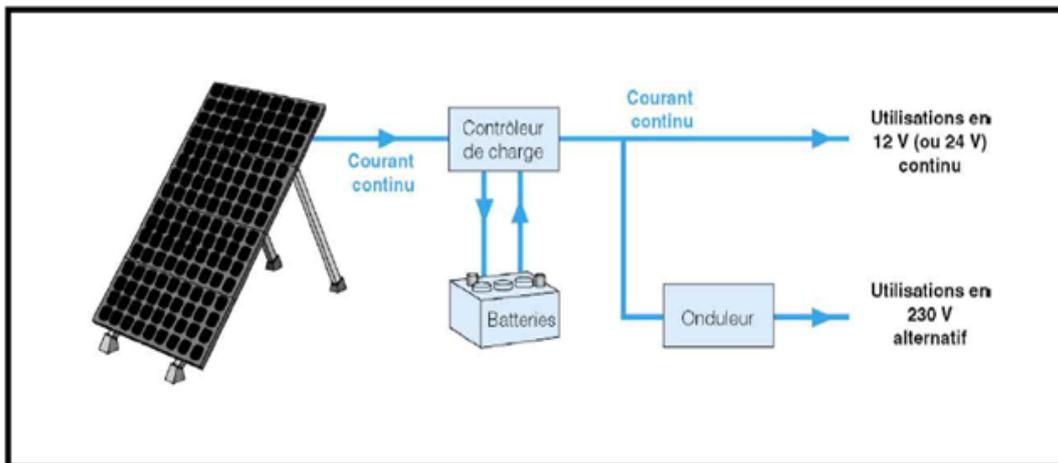


Figure I.8. Schéma Synoptique d'une Installation photovoltaïque autonome [12]

I.7.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à

un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

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

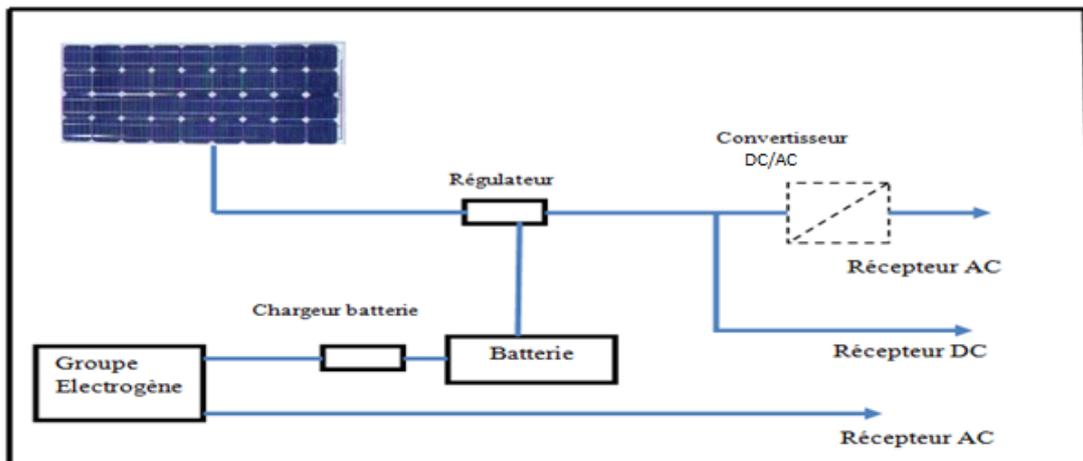


Figure I.9. Schéma d'Installation hybride (PV-GE) [12]

I.7.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif (CC-CA).

Étant donné que l'énergie est normalement injectée dans le réseau, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que la nécessité d'avoir une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

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

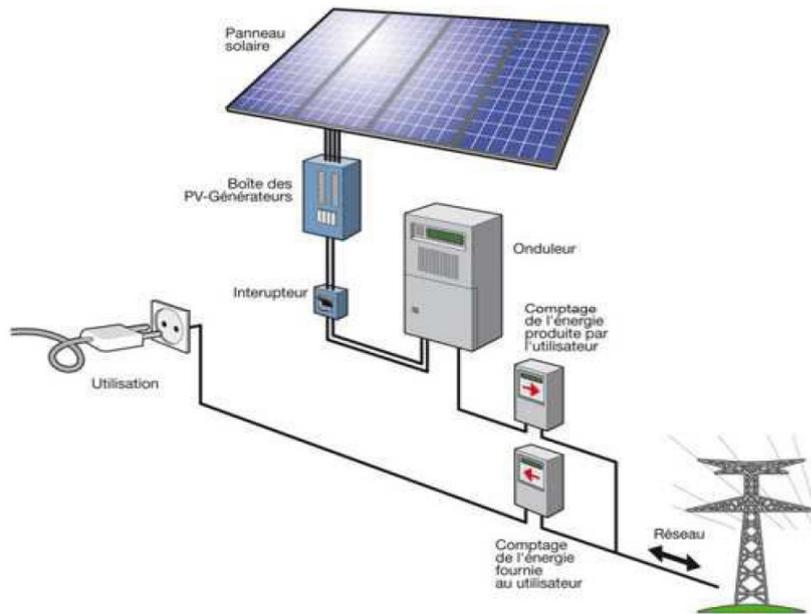


Figure I.10. Schéma d'installation hybride (PV-RE) [12]

I.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

I.8.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- Une grande fiabilité car elle ne comporte aucune pièces mobiles et cela la rend la plus appropriée aux régions isolées.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Le dimensionnement des systèmes est applicable pour des puissances allant de milliwatt à des mégawatts.
- Le cout de fonctionnement est très bas.
- Sur le plan écologiques elle présente plusieurs qualités car cette énergie est non polluante, silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

I.8.2. Inconvénients

Malgré les nombreux avantages que représente le système photovoltaïque néanmoins il a quelques inconvénients, qui sont :

- Le rendement réel d'un module est faible (28% pour les cellules au cristallin).

- La fabrication d'un module photovoltaïque nécessite une haute technologie et cela implique des coûts très élevés.
- Les générateurs photovoltaïques sont compétitifs aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergies.
- Le coût du générateur photovoltaïque est accru.

I.9. Conclusion

Ce premier chapitre est consacré à donner un rappel général sur l'énergie renouvelable et ces différentes sources ainsi que ces différentes cellules PV utilisés. Puis on a présenté la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque et les différents types de systèmes PV. En dernier, on a cité quelques avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

II- Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, compris dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée Cellule PV).

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension I-V non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM).

La modélisation d'un système physique donnée consiste à établir son modèle mathématique afin de le simuler sous un logiciel mathématique pour mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son dimensionnement. Les modélisations obtenues doivent être à la fois précises pour rendre compte des transferts énergétiques, et suffisamment rapides pour permettre des simulations sur de longues périodes dans le temps de calculs raisonnables.

L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet à étudier.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de modéliser les différents composants de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

II.2. Modélisations

II.2.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une diode [13]

La structure simple d'une cellule solaire est la jonction PN ou NP. En fonctionnement, la cellule solaire s'identifierait à un générateur de courant de lumière (I_{ph}) auquel il faut soustraire le courant de la diode en polarisation directe (I_d). En pratique, on introduit une résistance parallèle R_{sh} qui rend compte de certains effets,

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

tels que le courant de fuite par les bords de la cellule et une résistance série R_s traduisant les phénomènes de contact (métallisation de grille et de face arrière) entre la couche de base et la zone avant de la cellule solaire.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est le suivant :

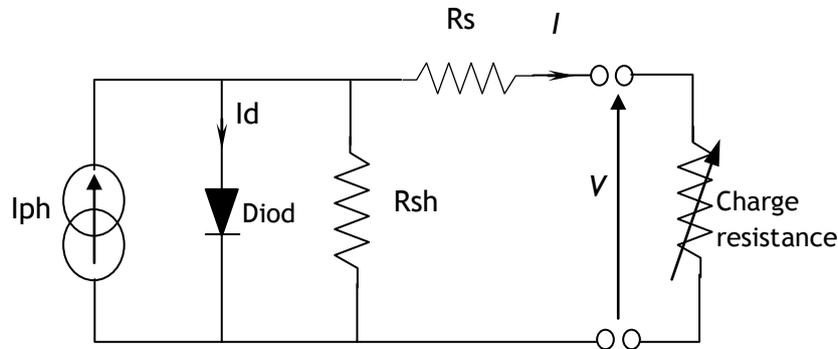


Figure II.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [13]

En fonctionnement sur charge, la caractéristique principale de courant-tension (I-V) d'une cellule solaire est définie par l'équation suivant :

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

D'où

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

On remplace I_d et I_{sh} par leurs expressions, l'expression (II.1) devient comme suite :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right] \quad (\text{II.4})$$

Où :

V: tension de sortie de la cellule,

I: courant de sortie de la cellule,

I_{ph} : courant photogénéré ou photo courant (A),

I_{sat} : courant de saturation de la diode (A),

q : charge d'électron ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C),

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

K : constant de Boltzmann ($K=1.38 \cdot 10^{-38} \text{JK}^{-1}$),

T : température absolue de fonctionnement de la jonction (K°),

A : facteur d'idéalité de la diode ($A \in [1, 2]$),

La valeur typique de A est 1.3 [Walker 01]

R_s : résistance série,

R_{sh} : résistance parallèle,

Dans la pratique, l'équation (II.1) peut être simplifiée. Pour le cas d'une cellule solaire bonne qualité, on admet que :

La résistance parallèle R_{sh} a une valeur assez élevée. Donc le terme $(V+I \cdot R_s)/R_{sh} \approx 0$.

- L'expression $[\exp(q \cdot \frac{(V+R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}) - 1] \gg 1$

Par conséquent, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$I = I_{ph} - I_{sat} [\exp(q \cdot \frac{(V+R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}) - 1] \quad (\text{II.5})$$

II.2.2. Modélisation d'un module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est l'assemblage en série ou/et en parallèle de photopile.

$$V_{\text{module}} = n_s \cdot V_{ph} \quad (\text{II.6})$$

$$I_{\text{module}} = n_p \cdot I_{ph}$$

II.2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque [14]

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques ont été développés, dont le but d'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Nous avons choisi un modèle simplifié.

L'équation principale qui donne la caractéristique ($I_{pv}-V_{pv}$) du générateur photovoltaïque est :

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.7)$$

Avec:

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{E_s}{1000} \right) \quad (II.8)$$

Le courant photovoltaïque, I_{pv} est directement dépendant de l'ensoleillement et de température de la cellule, et il peut s'écrire sous la forme suivante [14] :

$$I_{ph} = p_1 \cdot E_s \cdot [1 + p_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + p_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (II.9)$$

Le courant de polarisation de la jonction PN, dénote par l'expression suivante :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V_{ph} + R_s \cdot I_{ph})}{A \cdot K \cdot T_j \cdot n_c} \right) - 1 \right] \quad (II.10)$$

Le courant de saturation s'écrit sous la forme :

$$I_{sat} = p_4 \cdot (T_j^3) \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{K \cdot T_j} \right) \quad (II.11)$$

Et on a le courant de la résistance shunt :

$$I_{sh} = \frac{V_{ph} + R_s \cdot I_{ph}}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

D'où l'équation (II.7) devient comme suit [14] :

$$I_{pv} = p_1 \cdot E_s \cdot [1 + p_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + p_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - p_4 \cdot (T_j^3) \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{K \cdot T_j} \right) \cdot \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V_{ph} + R_s \cdot I_{ph})}{A \cdot K \cdot T_j \cdot n_c} \right) - 1 \right] - \frac{V_{ph} + R_s \cdot I_{ph}}{R_{sh}} \quad (II.13)$$

II.3. Simulation d'un panneau photovoltaïque

Dans ce travail, nous avons utilisé le panneau PV de type SIEMENS SM 110 de 72 cellules de 110 W à éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de jonction $T = 25^\circ \text{C}$.

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

Le tableau (II. 1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisés dans les conditions standards:

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110W
Puissance nominale P_n	110W
Courant au point de puissance max I_m	3.15A
Tension au point de puissance max V_m	35V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5V

Tableau II.1. Paramètres électriques des panneaux SIEMENS

Les valeurs des paramètres du modèle à une diode sont données dans le tableau (II.2):

P1	P2	P3	P4	A	Rsh	Rs
0.00345	$0.58 \cdot 10^{-5}$	$-0.33 \cdot 10^{-4}$	31.2367	1	0.614	151.16

Tableau II.2. Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110

➤ **Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de ce panneau.**

Les figures (II.2 et II.3) représentent successivement les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de ce panneau.

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

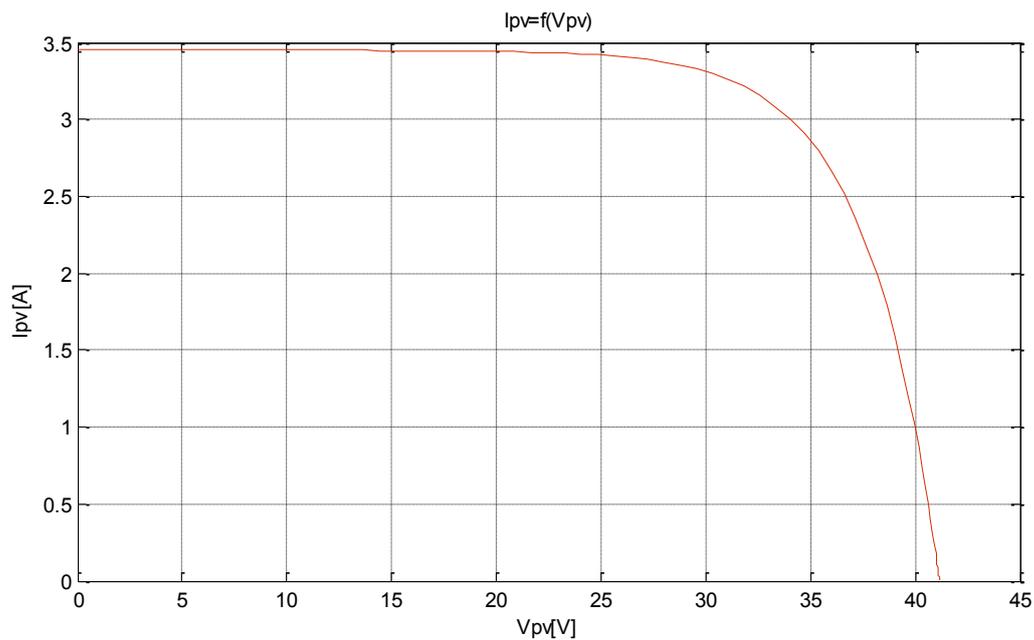


Figure II.11. Caractéristique courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$

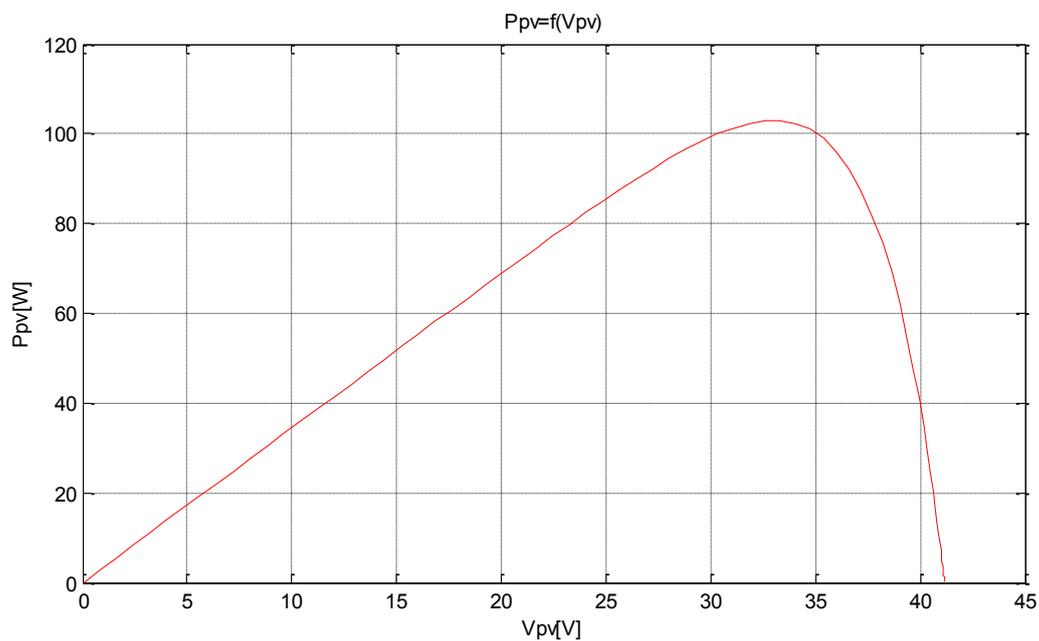


Figure II.3. Caractéristique puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$

II.3.1. Influence des paramètres météorologiques sur le générateur photovoltaïque

II.3.1.1. Influence de la variation de la température à un éclairement constant sur le fonctionnement d'une cellule PV

Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque dépendent de la température, la **Figure II.4** présente la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque pour différents

Valeurs de température à un ensoleillement fixe (1000w/m^2). Comme on peut voir sur la figure, lorsque la température augmente, le courant du module augmente très peu, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement, ce qui nous mène à une variation du point de puissance maximale **Figure II.5**

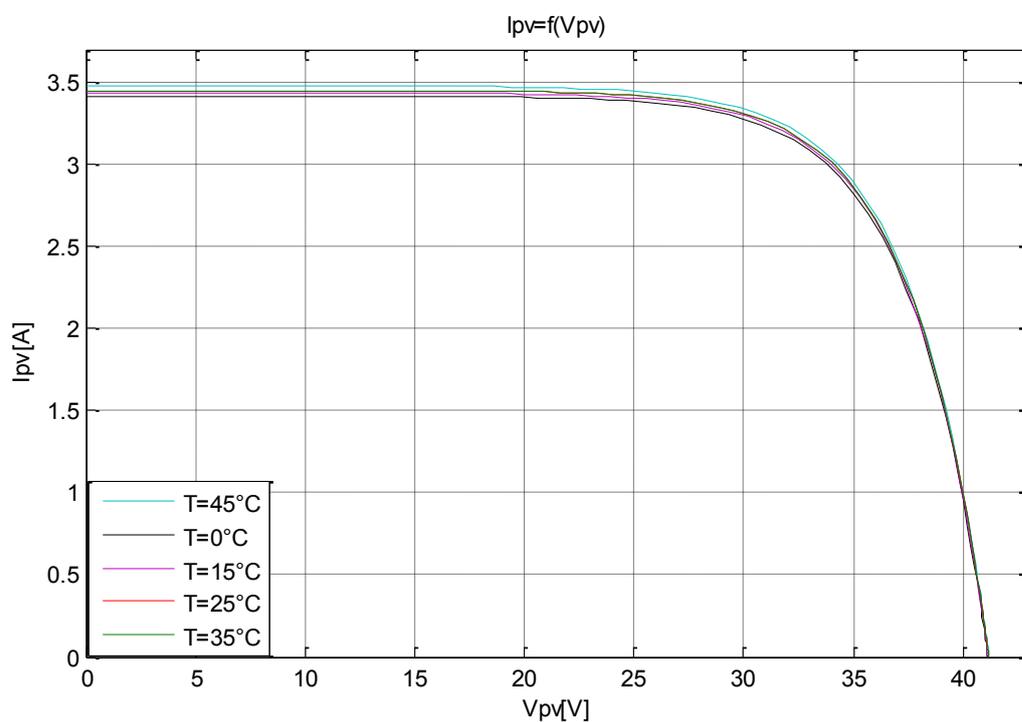


Figure II.4. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs de température dans un ensoleillement de 1000w/m^2 .

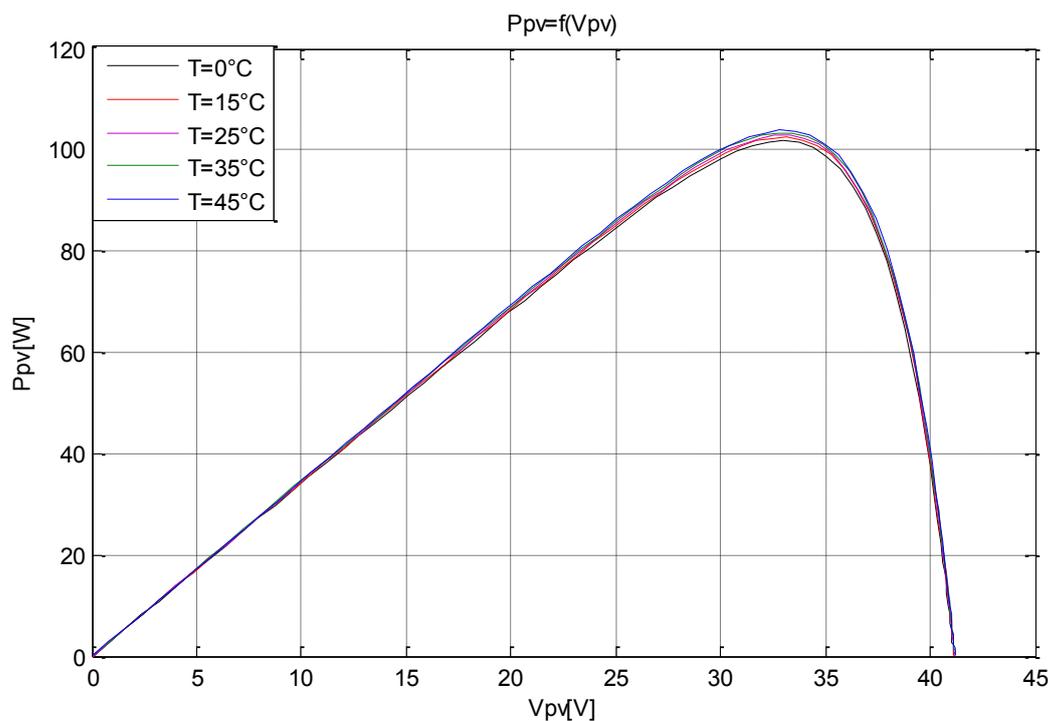


Figure II.5. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs de température dans un ensoleillement de 1000 W/m^2 .

II.3.1.2. L'influence de la variation de l'éclairement à une température constante sur le fonctionnement d'une cellule PV :

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

Les figures (II.6 et II.7) représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension successivement, à une température constante (25°C). On constate que pour des fortes variations du niveau d'éclairement provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Contrairement à la tension, qui varie très peu en fonction de l'éclairement figure(II.6) par conséquent la variation du point de puissance maximale (PPM) est proportionnelle à l'éclairement figure(II.7).

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

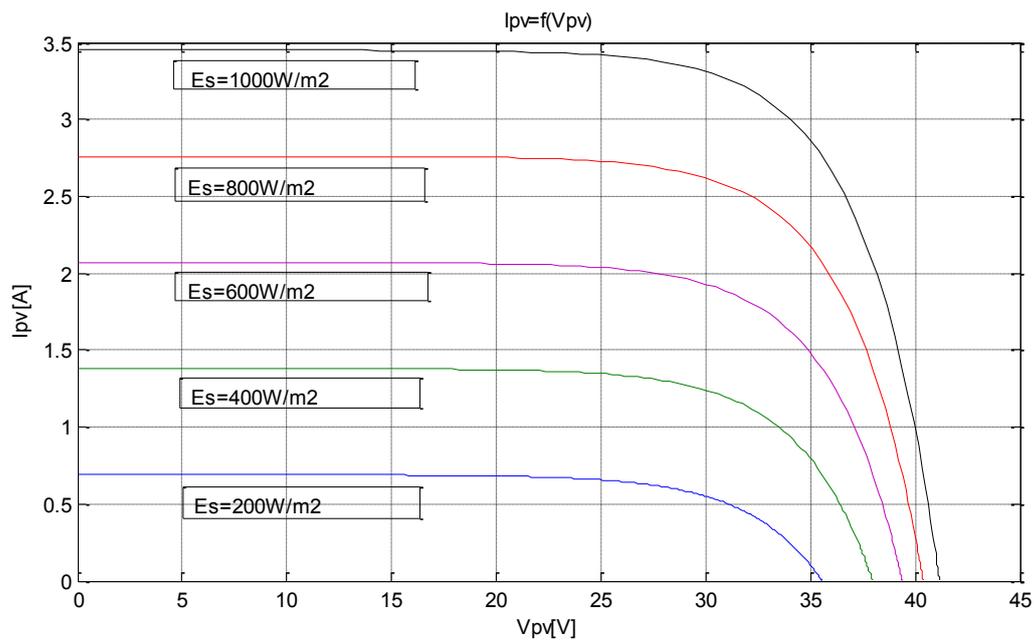


Figure II.6. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'insolation dans une température de 25 °C.

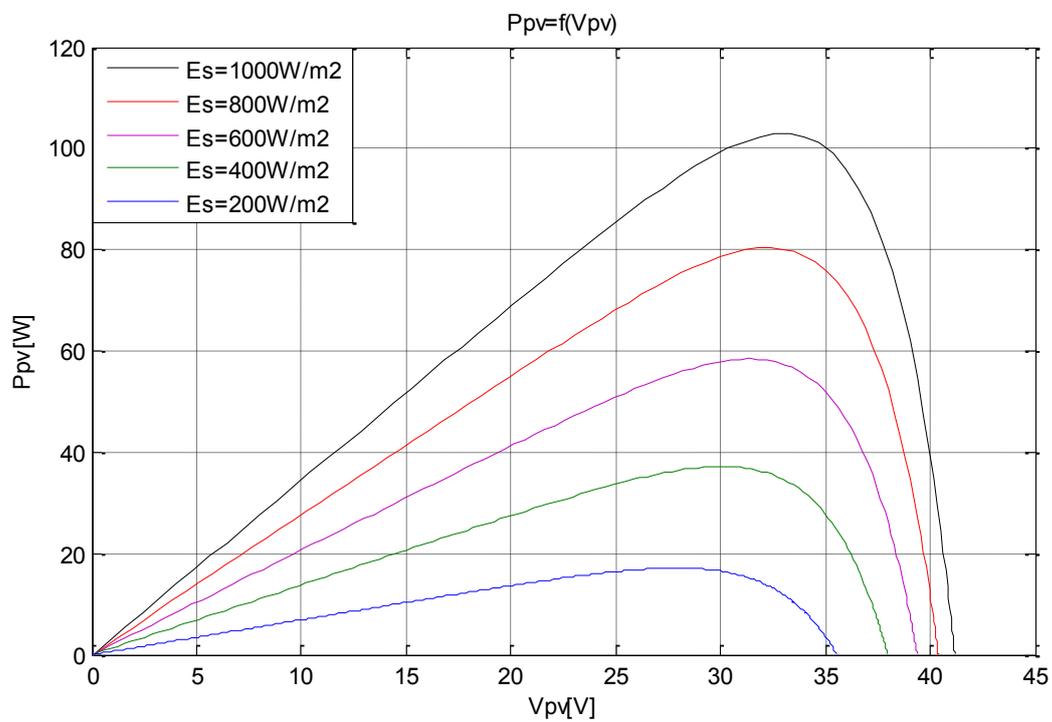


Figure II.7. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'insolation dans une température de 25 °C.

II.3.1.3. L'influence de la variation simultanément de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV :

Les figures (II.8) et (II.9) représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) successivement. On fait varier simultanément l'éclairement et la température, on observe que : la variation simultanée des paramètres météorologiques induit une variation simultanée de la tension de circuit ouvert et du courant de court circuit, se qui mène à une variation aléatoire du point de puissance maximale (PPM).

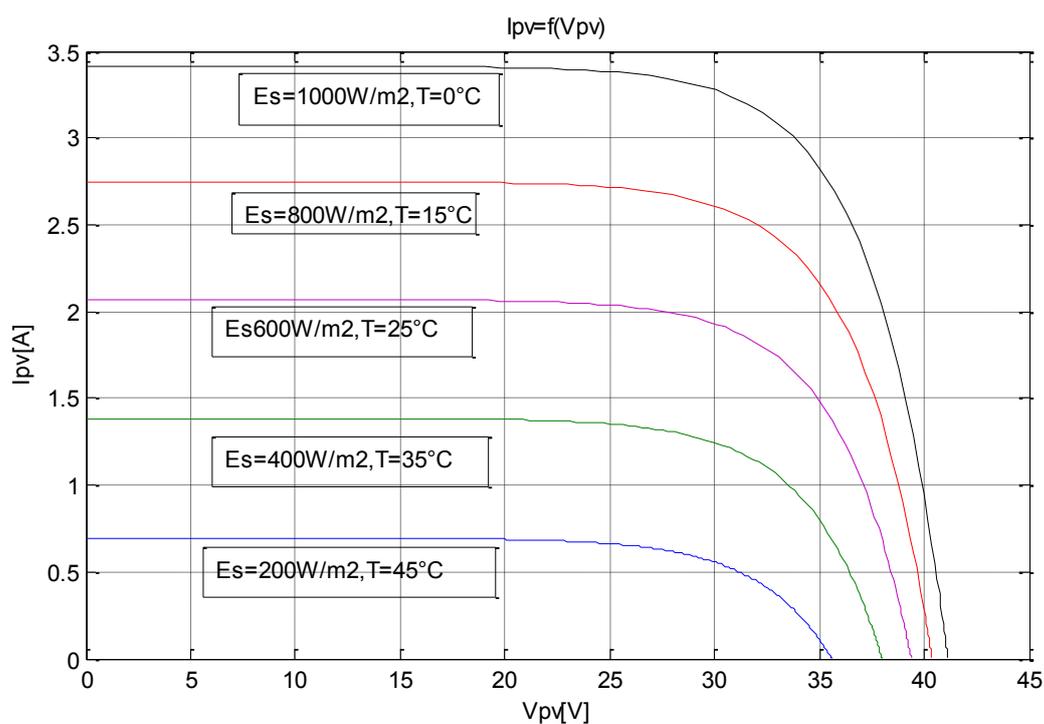


Figure II.8. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température.

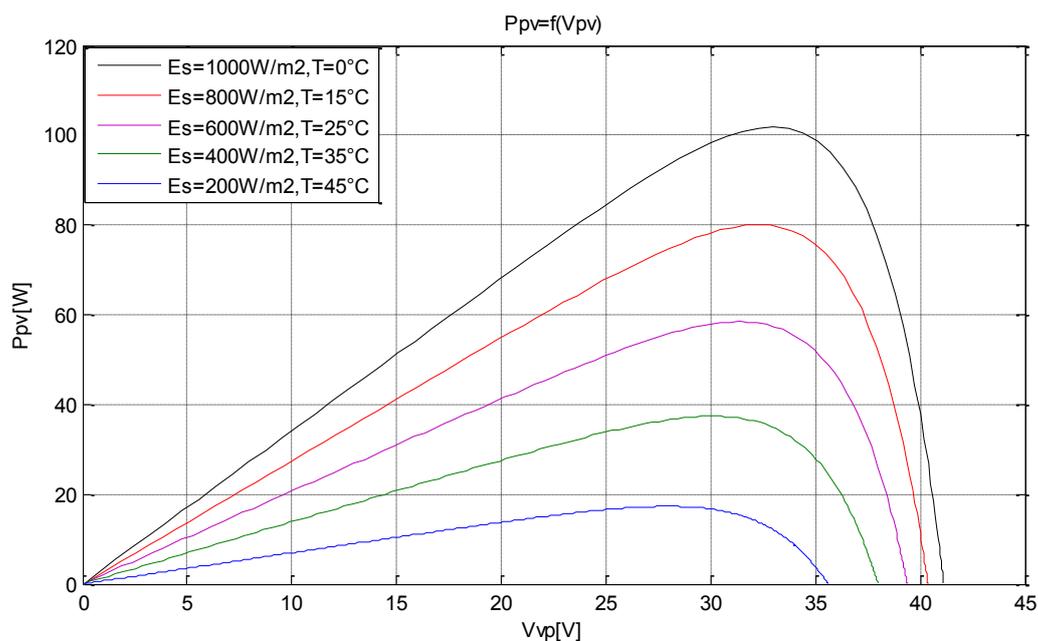


Figure II.9. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs d'ensoleillement et température.

On constate que l'éclairement influence beaucoup plus par rapport à la température.

II.3.2. Influence des paramètres internes de la cellule sur le générateur photovoltaïque :

La température et l'éclairement ne sont pas les seuls paramètres qui ont de l'influence sur le générateur photovoltaïque GPV, il existe d'autres paramètres qui sont liés à la cellule (résistance série et shunt).

II.3.2.1. Influence de la résistance série :

Les figures (II.10) et (II.11) représentent successivement l'effet de la résistance série sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque (GPV) et on a constaté que :

- Avec l'augmentation de la résistance R_s , les performances du générateur photovoltaïque diminuent, ce qui est défavorable au rendement, donc il faut minimiser au maximum la valeur de R_s , afin d'avoir un courant maximal du générateur photovoltaïque figure(II.10), le point de puissance maximale est aussi

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

influencé par cette variation de R_s , et la tension est presque constante figure(II.11).

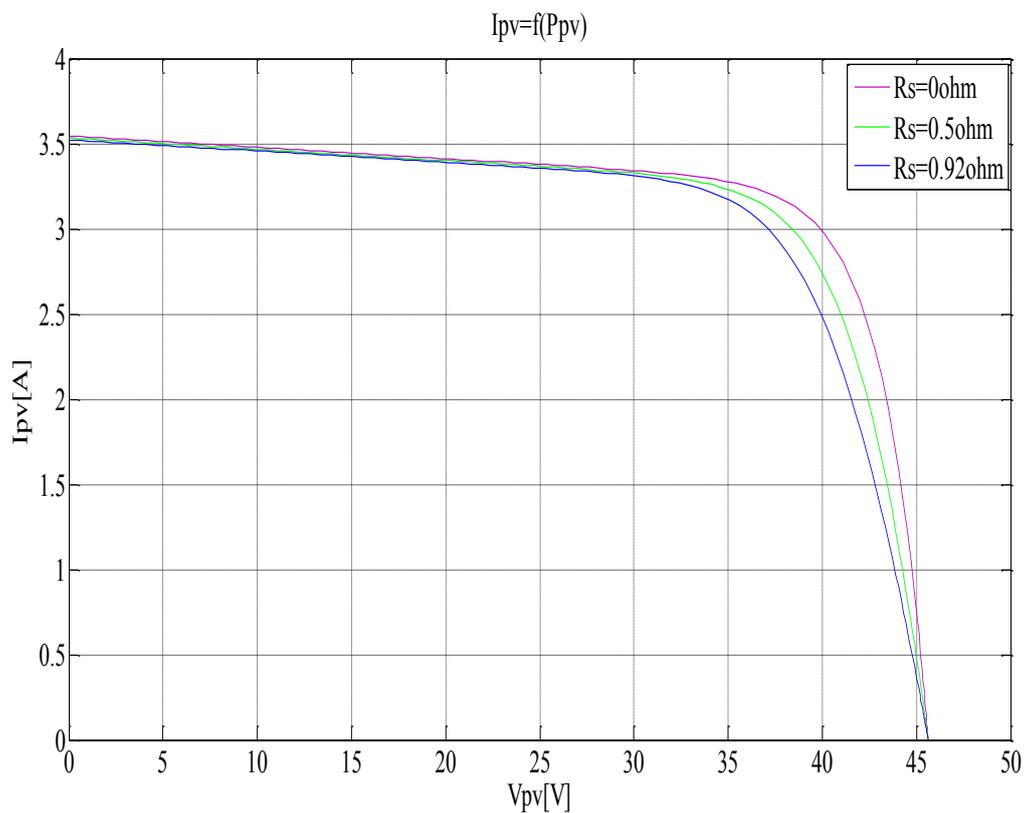


Figure II.10. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance série.

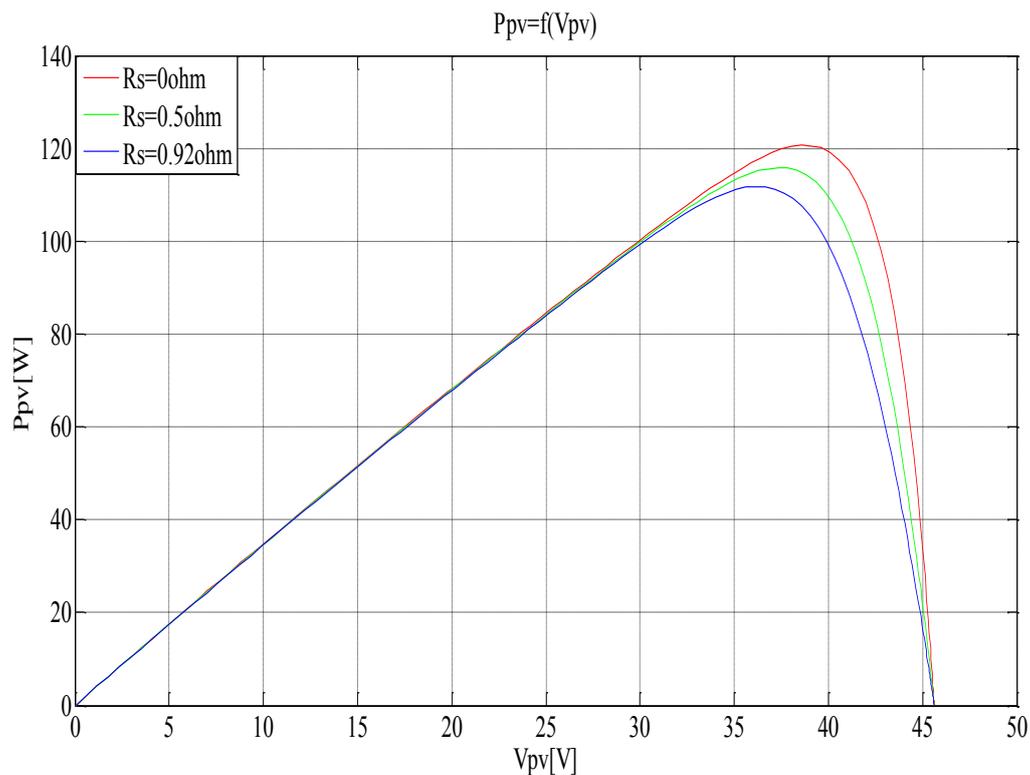


Figure II.11. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance série.

II.3.2.2. Influence de la résistance shunt :

Maintenant, on fait varier la résistance shunt (R_{sh}), on laissant la résistance série constante, on obtient les figure(II.12) et (II.13), d'après ces dernières on remarque que :

Lorsque la résistance shunt diminue, la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit sont diminués. Lorsque la résistance shunt est très petite son influence est très remarquable, comme le montre la figure (II.12), et la puissance diminue dans la figure(II.13).

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

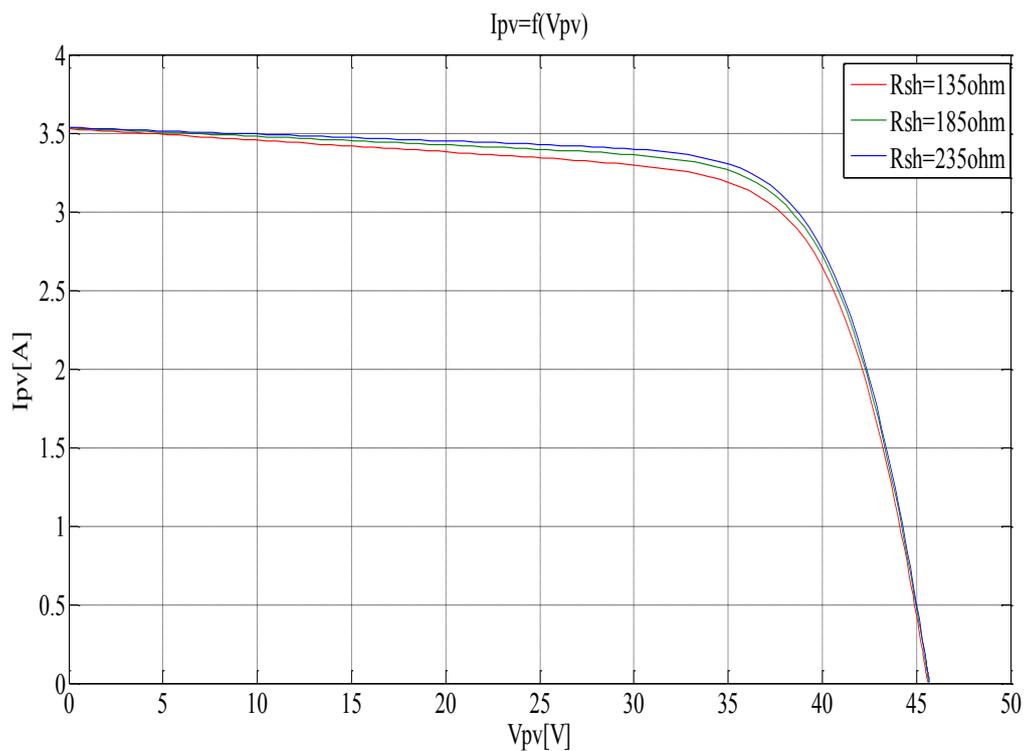


Figure II.12. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance shunt.

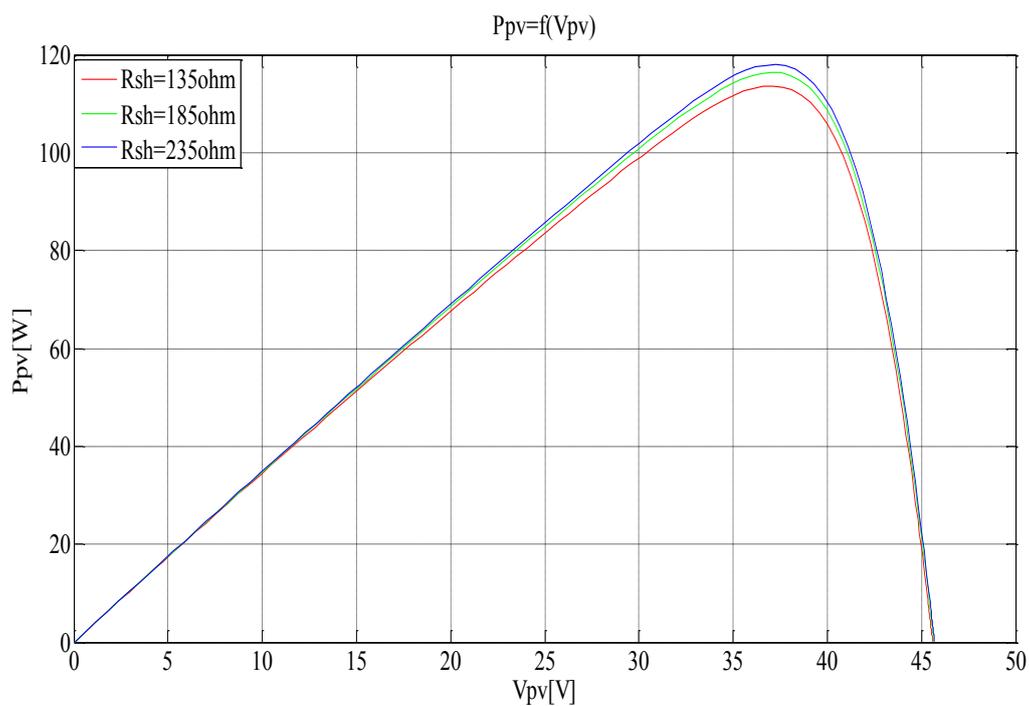


Figure II.13. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module de cellules PV pour différentes valeurs la résistance shunt.

II.3.2.3. Influence de la variation simultanée de R_s et R_{sh} :

Pour mieux étudier l'influence des paramètres internes de la cellule (résistance série et shunt), il est nécessaire d'analyser les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de notre GPV par la variation simultanée de la résistance série et shunt, comme ci montrer sur les figures (II.14 et II.15). On observe que :

La variation simultanée des paramètres internes de la cellule PV est moins importante que celle des paramètres météorologiques.

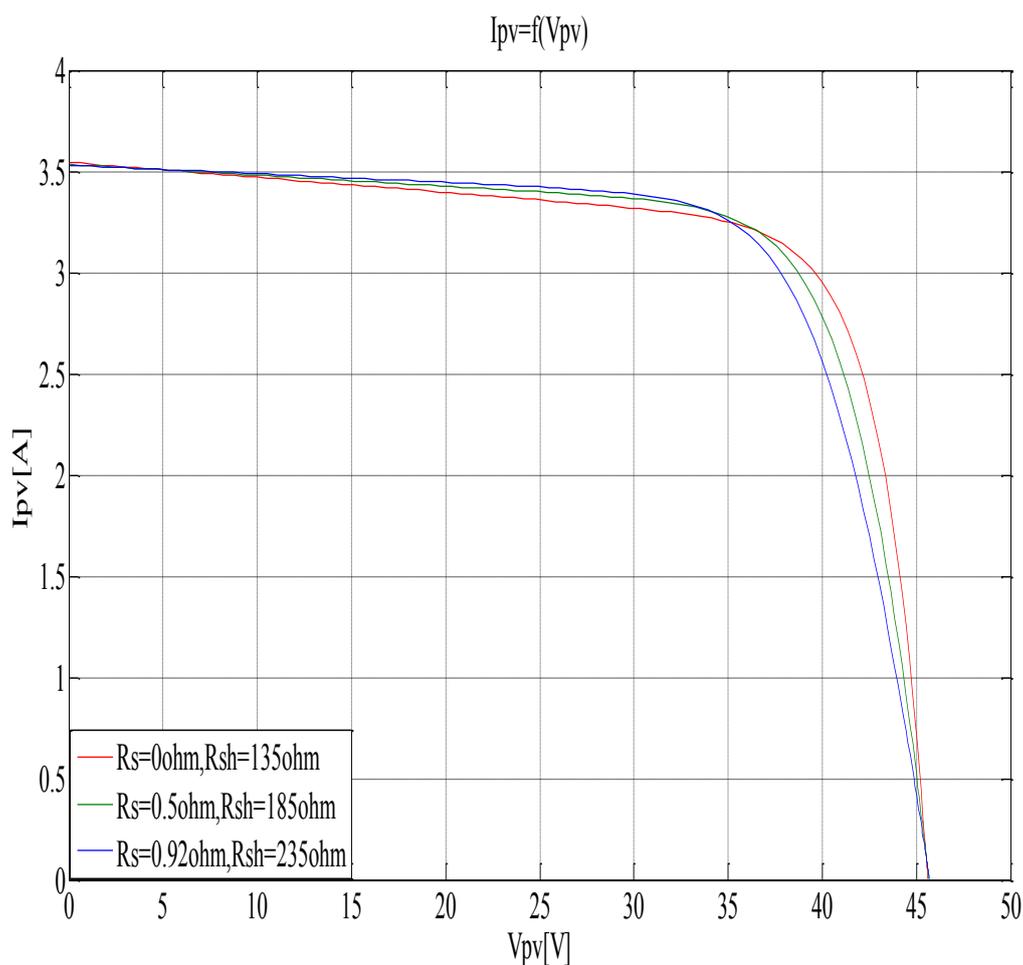


Figure II.14. Influence de la variation simultanée de R_s et R_{sh} sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

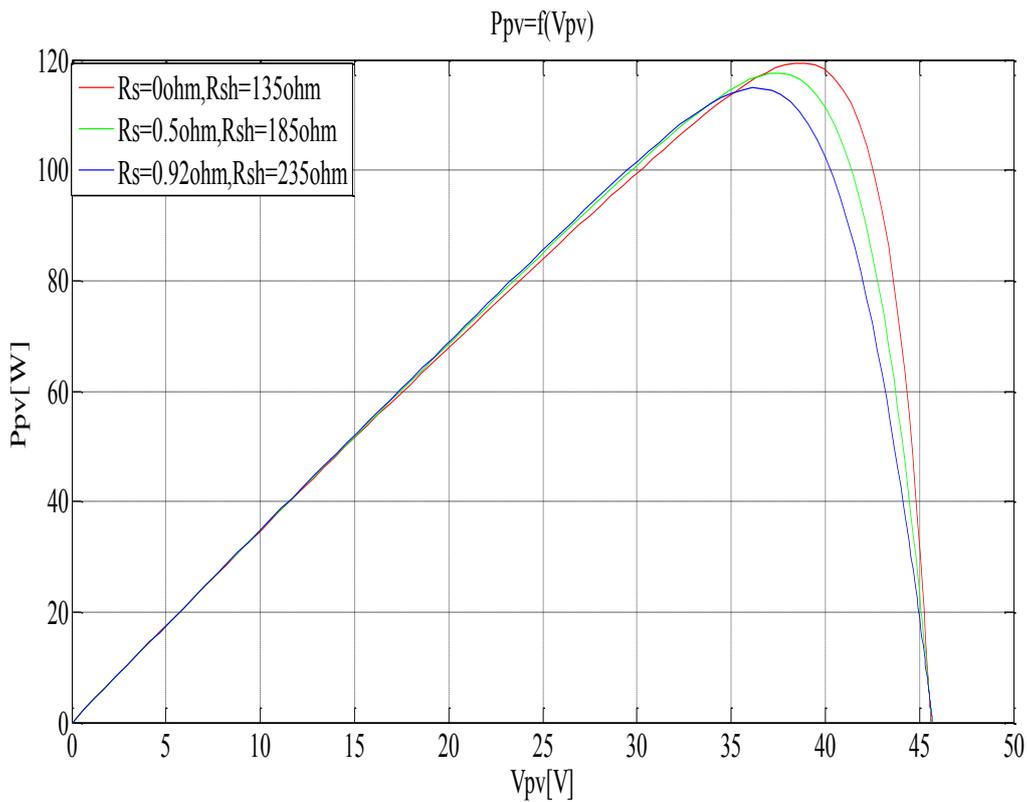


Figure II.15. Influence de la variation simultanée de R_s et R_{sh} sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

II.3.3. Modélisation d'un champ photovoltaïque

Les modules PV sont les éléments de base d'un système photovoltaïque, et afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le **champ de modules PV**. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu.

Le courant et la tension en sortie du champ de modules PV utilisant le modèle à une diode sont liés par la relation suivante [24].

$$I_{ph} = n_p \cdot P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - n_p \cdot P_4 \cdot (T_j^3) \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{(V_{ph} + R_s \cdot I_{ph})}{A \cdot K \cdot T \cdot n_c}\right) - 1 \right] - \left[\frac{n_p \cdot (V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \right] \quad (II.14)$$

II.3.3.1. Association en série

En additionnant des modules identique en série, le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement au nombre de modules montés en série comme le montre la figure (II.16).

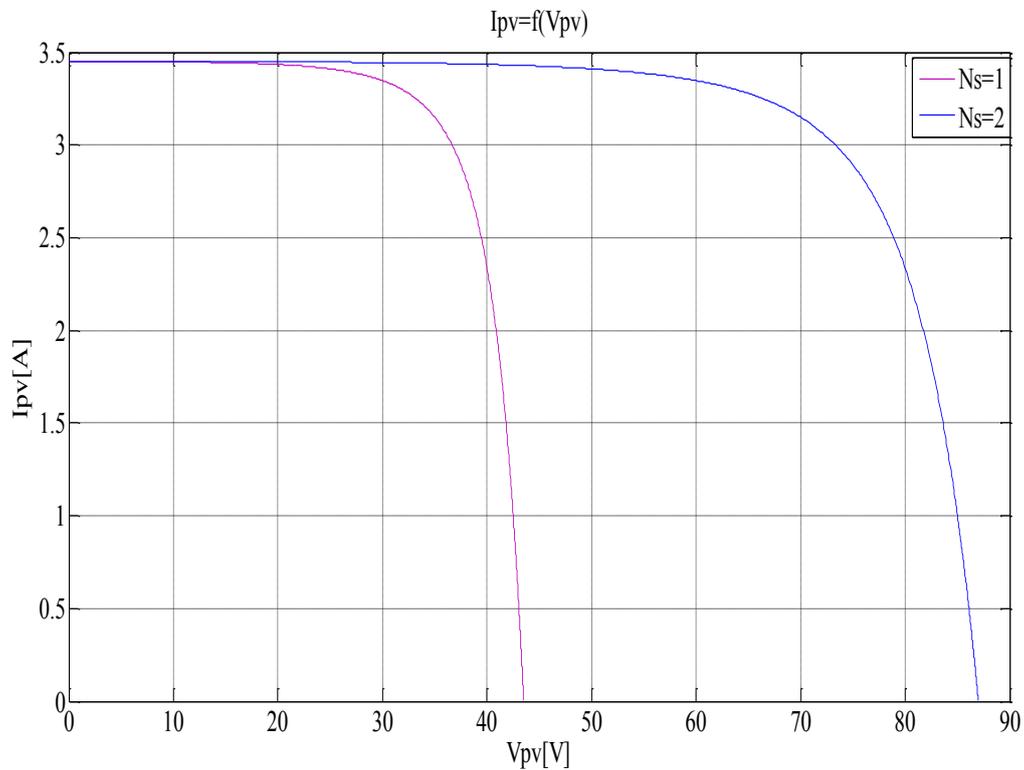


Figure II.16. Champ de deux générateurs photovoltaïque associé en série.

II.3.3.2. Association en parallèle

En additionnant des modules identique en parallèle, la tension de la branche reste la même, mais l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules montés en parallèle comme le montre la figure (II.17).

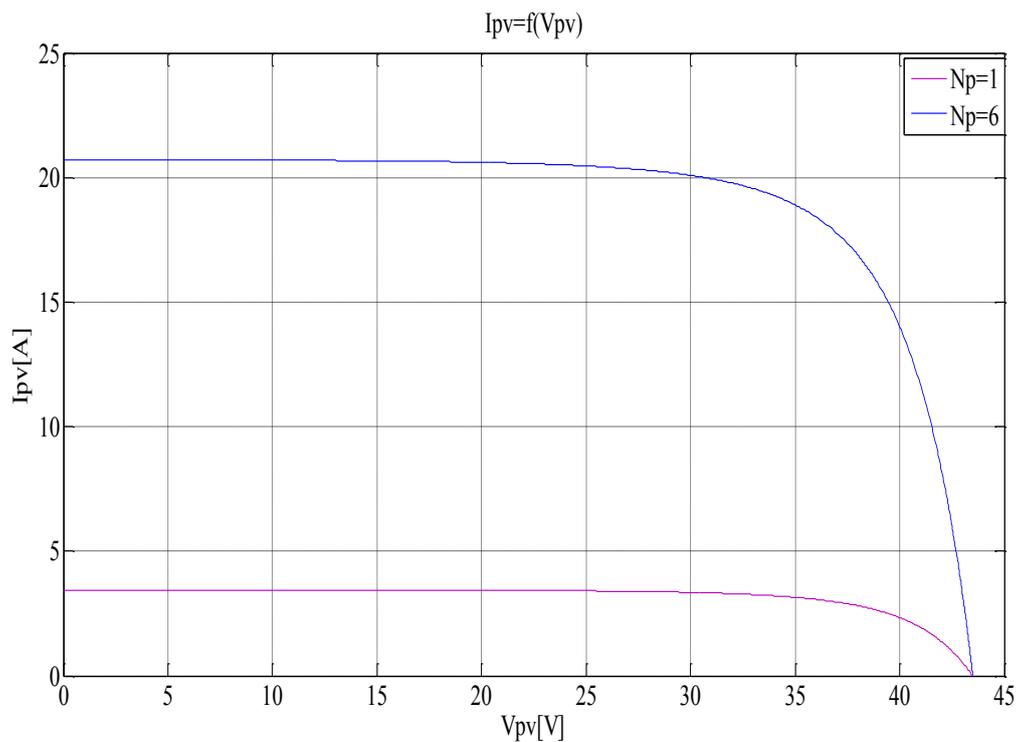


Figure II.17. Champ de six générateurs photovoltaïque associé en parallèle.

II.4. Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost » [15]

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des convertisseurs dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement : fermé ($K=1$), ouvert ($K=0$), ensuite on donne son modèle qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur.

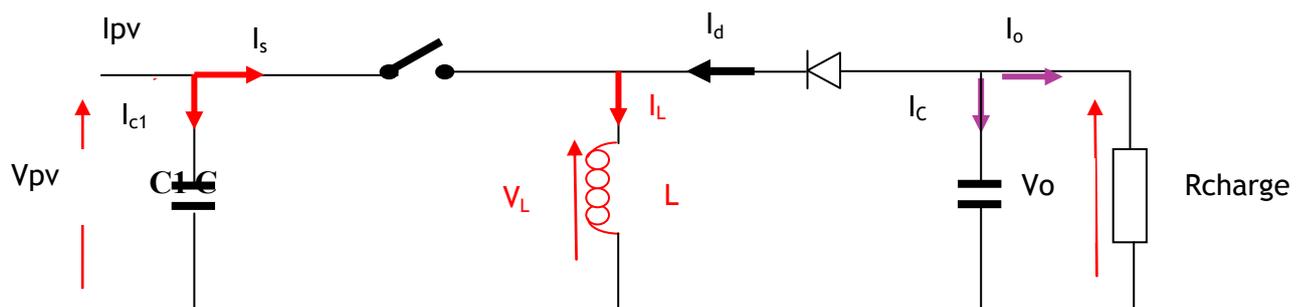


Figure II.18. Circuit équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur

II.4.1. Première phase : (K=1, d=0)

Lors de la première phase du cycle de fonctionnement, de 0 à DT, l'interrupteur commandé est fermé, la diode est ouverte, le générateur de tension fait croître le courant I_L dans l'inductance L qui accumule de l'énergie [15]

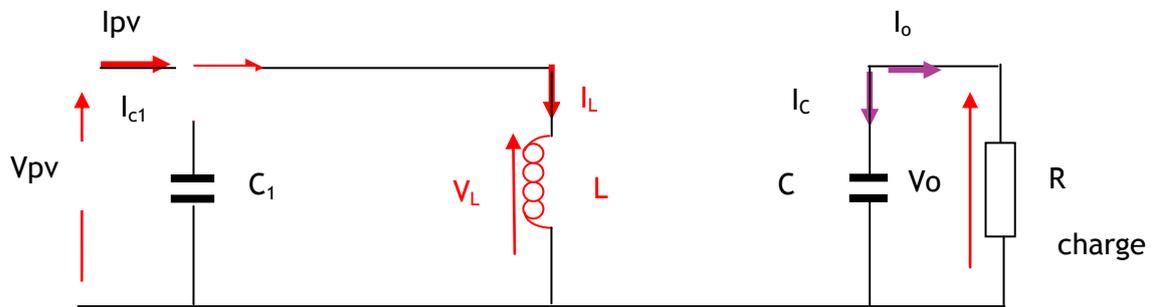


Figure II.19. Le circuit équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur au temps de fermeture du commutateur

Par application de la loi de Kirchhoff sur la première phase de fonctionnement on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \\
 I_C(t) &= C \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{pv}(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.15}$$

II.4.2. Deuxième phase : ($K=0$, $d=1$)

Lors de la seconde phase du cycle, de DT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance L se décharge dans le récepteur de tension (résistance) en lui fournissant du courant [15]

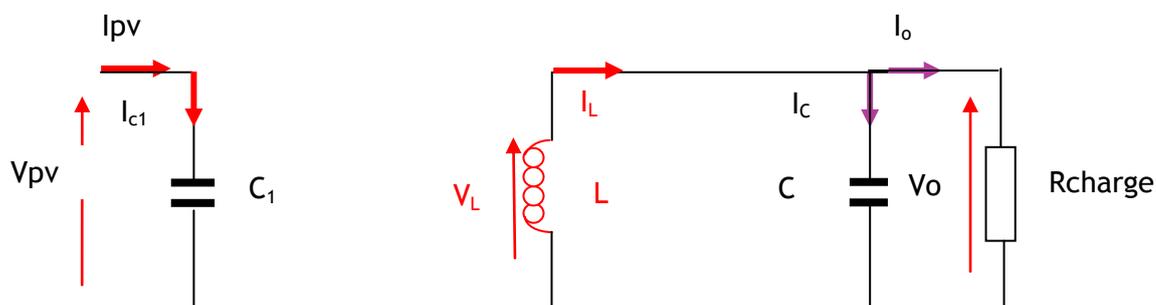


Figure II.20. Circuit équivalent du convertisseur dévolteur-survolteur au temps d'ouverture du commutateur

Par application de la loi de Kirchhoff sur la seconde phase de fonctionnement on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) \\
 I_C(t) &= C \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.16}$$

II.5. Modèle mathématique de l'onduleur [16]

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui permettent d'obtenir une tension alternative de valeur efficace fixe ou variable, et ils sont formés de trois branches composées chacune de deux cellules de commutation. Chaque cellule de commutation est

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

composée d'un élément semi-conducteur, commandé à l'allumage et au blocage, et une diode antiparallèle.

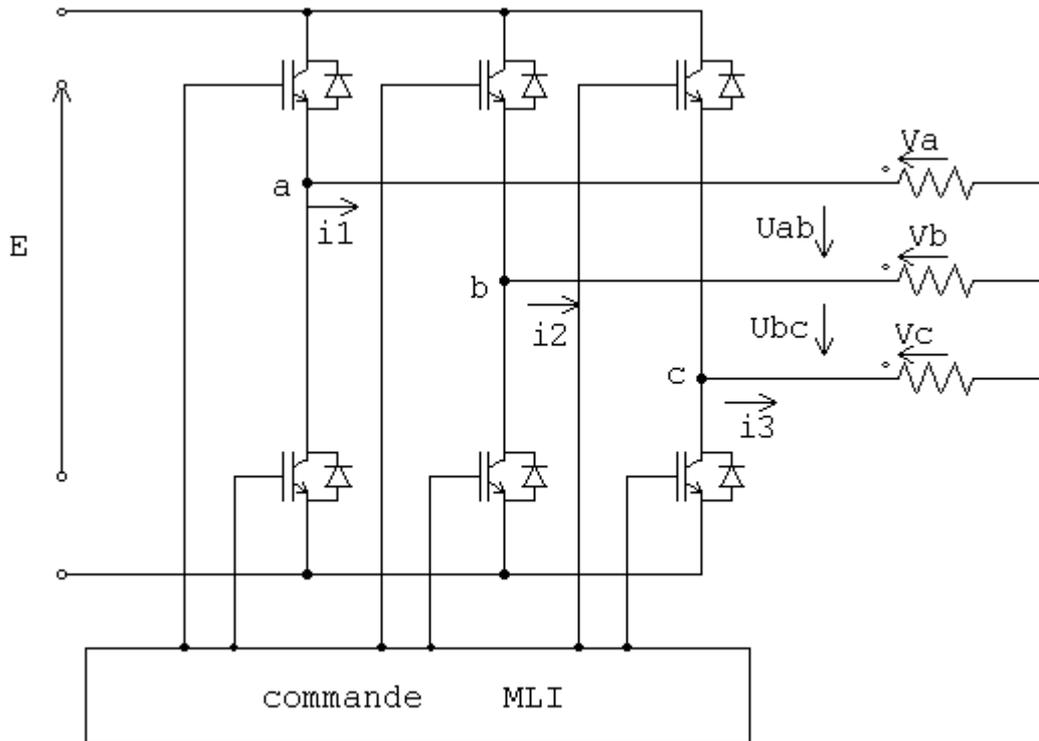


Figure II.21. Schéma électrique équivalent de l'onduleur MLI de tension.

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

$$U_{bc} = V_b - V_c \quad (\text{II.17})$$

$$U_{ca} = V_c - V_a$$

$$U_{ab} - U_{ca} = V_a - V_b - V_c + V_a = 2V_a - V_b - V_c \quad (\text{II.18})$$

Si le récepteur est équilibré, on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_a V_b V_c à la sortie de l'onduleur quelle que soit leur forme d'onde les trois courants i_1 , i_2 , i_3 ont une somme nulle, il faut donc que les trois fondamentaux aient une somme nulle.

A cause de l'équilibre du récepteur la somme instantanée des courants est nulle.

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0, \quad \text{Entraîne } V_a + V_b + V_c = 0$$

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

On peut donc écrire :

$$U_{ab} - U_{ca} = V_a - V_b - V_c + V_a = 3V_a \quad (\text{II.19})$$

De même pour V_b et V_c , on obtiendra après remplacement les trois tensions suivantes :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) = \frac{1}{3}(2V_a - V_b - V_c) \\ V_b &= \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) = \frac{1}{3}(-V_a + 2V_b - V_c) \\ V_c &= \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) = \frac{1}{3}(-V_a - V_b + 2V_c) \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'a \\ S'b \\ S'c \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$I_0 = S'a \cdot i_1 + S'b \cdot i_2 + S'c \cdot i_3 \quad (\text{II.22})$$

Avec:

I_0 : le courant module par l'onduleur.

$S'a$, $S'b$, $S'c$: sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égal à 1 si l'interrupteur est fermé et 0 si il est ouvert).

II.6. Batteries [17], [18]

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques, est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. Les deux types de batteries, utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques, sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb / Pb SO₄) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd).

On a utilisé les batteries de type (Plomb-acide).

II.6.1. Batterie plomb- acide

La batterie au plomb-acide a été et toujours actuellement la source d'énergie la plus répondu. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique ou électrique permettant de reproduire assez précisément et dans divers cas de figure son fonctionnement. Les seuls modèles disponibles sont soit assez imprécis, soit seulement utilisables dans certaines conditions d'utilisation bien précises.

II.6.2. Principe de fonctionnement :

L'électrode positive est une plaque en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des oxydes de plomb. L'électrode négative est une plaque de plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.

II.6.3. Caractéristiques de fonctionnement photovoltaïque de la batterie :

- ✓ **Décharge journalière** : Dans le cas de besoins journaliers constants, cette décharge est constante. Pour une autonomie du système compris entre 4 et 8 jours, cette décharge sera de l'ordre de 10 à 20 % ;
- ✓ **Décharge profonde** : Il s'agit de la décharge maximale de l'accumulateur qui n'est tolérable que quelques jours par an (1 à 3 jours par an).

II.6.4. Modèle mathématique de la batterie

C'est une batterie de stockage d'énergie son modèle est donnée par les deux équations suivante :

La tension V_b mesurée aux bornes de la batterie d'accumulateur pendant la charge et égale :

$$V_b = E + R_b \cdot I_b \quad (\text{II.23})$$

Pendant la décharge la tension mesurée aux bornes de la batterie d'accumulateur est égale à :

$$V_b = E - R_b \cdot I_b' \quad (\text{II.24})$$

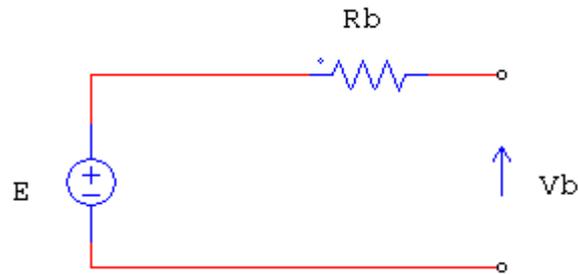


Figure II.22. Modèle simplifié de la batterie plomb-acide.

V_b : La tension aux bornes de la batterie.

I_b : Le courant de la batterie.

R_b : La résistance de la batterie.

E : La F.é.m. de la batterie.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation de chaque élément de la conversion d'énergie photovoltaïque, ou on a présenté les différentes caractéristiques du module solaire pour des variations des conditions météorologiques.

Les résultats de simulation obtenus, nous a montré que les caractéristiques du générateur photovoltaïque dépendent de ces paramètres (température et éclairement), par contre les paramètres internes de la cellule (R_s et R_{sh}) n'influent pas sur le GPV.

Donc il est nécessaire d'étudier l'influence de ces paramètres météorologiques sur les caractéristiques de sortie du générateur photovoltaïque. Et il est nécessaire d'introduire un convertisseur statique DC/DC, en associant à ce dernier des contrôleurs MPPT afin d'avoir le courant et la tension désirés.

Le prochain chapitre est consacré à présenter quelques commandes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) en passant sur la commande par mode glissant.

III- Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

III.1. Introduction

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique courant en fonction de la tension ($I = f(U)$) est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), (poursuite du point de puissance maximale), permet donc de piloter le convertisseur statique, reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres:

- Le rendement global du système désiré par le constructeur ;
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique ;
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux, ...) ;
- Le type d'implémentation choisi (analogique, numérique, hybride).

III.2. Philosophie du la MPPT

Le terme MPPT (Maximum Power Point Tracking) ou « Poursuite du Point de Puissance Maximale », est de trouver un moyen a fin de se placer sur le point maximum de la caractéristique puissance-tension et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre. Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire le maximum de puissance (puissance optimale).

Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

III.3. Principe de la MPPT

Les générateurs photovoltaïques (GPV) sont utilisés pour fournir de l'énergie à certaines charges électriques. Pour obtenir la puissance maximale du GPV, la MPPT est utilisée pour contrôler les variations des caractéristiques courant-tension des cellules solaires. Le principe de la MPPT est d'ajuster la tension (ou le courant) réelle de fonctionnement du GPV de façon à ce que la puissance réelle s'approche le plus possible, de la valeur optimale P_{\max} (**figure III.1**).

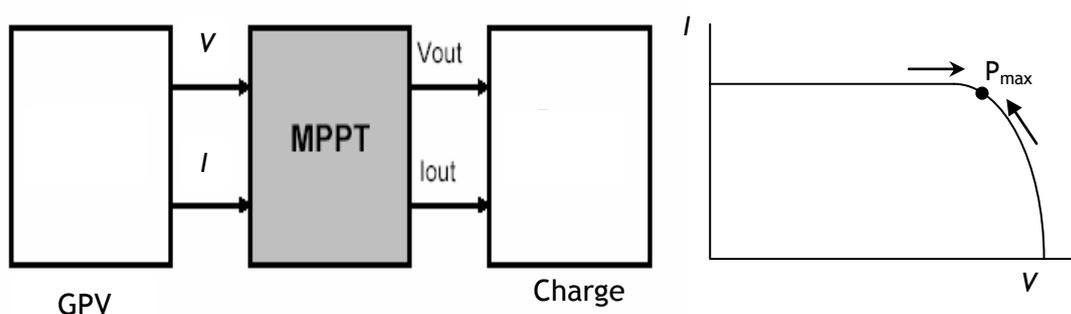


Figure III.1. Principe de la MPPT [8].

- La caractéristique (I-V) d'une cellule solaire change selon la température et l'ensoleillement.
- Le courant et la tension de fonctionnement exigent d'être contrôlés légèrement. On peut donc obtenir la puissance maximale à partir du GPV.
- Le MPP est rarement obtenu à la même tension de fonctionnement du système car ce point change rapidement avec l'ensoleillement et la température.

Le problème est l'obtention du MPP et l'adaptation de la tension du GPV à celle de la charge. La MPPT est donc utilisée pour les objectifs suivants :

- Forcer le système à fonctionner au voisinage du MPP malgré les changements de l'environnement
- Fournir un bon rendement de conversion.
- Maintenir la poursuite dans une large gamme de variation des conditions de l'environnement
- Fournir une interface en sortie compatible avec le besoin de chargement de la batterie.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

III.4. Classification des commandes MPPT

Les commandes MPPT peuvent se classer selon le type d'implémentation électronique en : Analogique, Numérique ou hybride.

Mais, il est intéressant de les classer selon le type d'algorithme qu'elles utilisent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

Le choix de classification est basé selon les paramètres d'entrée et de sortie du convertisseur statique.

III.4.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique CS

- ❖ Méthode perturbation et observation.
- ❖ Méthode d'incrément de conductance.
- ❖ Méthode de courant de court-circuit.
- ❖ Méthode de tension de circuit ouvert.
- ❖ Méthode MPPT basée sur le réseau de neurones.

III.4.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du CS

- ❖ Méthode MPPT basées sur la logique floue.
- ❖ Méthode basée sur la maximisation du courant de charge d'une batterie.
- ❖ Méthode basée sur le contrôle du courant à la sortie de l'onduleur.

III.5. Critères de qualité d'une commande MPPT

Il existe plusieurs types de commandes MPPT dans la littérature. Par contre, dans la plupart des cas, les performances de ces commandes ne sont pas fournies ou bien, elles le sont simplement pour un certain point d'opération avec une puissance donnée et non pour une journée complète de mesures. Sans ces critères d'évaluation, il est difficile de savoir si un gain est réellement apporté en raison de l'utilisation d'une commande MPPT d'un type ou d'un autre. Pour ces raisons, nous avons défini certains critères de qualité qualifiant une commande MPPT en régime établi et en régime dynamique, et parmi ces critères on peut citer :

- ✚ **Simplicité et coût :**

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

La commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable. En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surcoût économique. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit, n'est pas recevable pour l'utilisation.

Réponse dynamique :

La commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour piloter l'étage d'adaptation auquel elle est associée et pour assurer que l'adaptation aux changements d'éclairement soit faite le plus rapidement possible. En même temps, elle doit pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du PPM (point de puissance maximale) dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge DC alimentée par l'étage d'adaptation.

Flexibilité :

La commande MPPT doit être conçue pour fonctionner pour tous type de panneaux ayant différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

III.6. Différentes commandes MPPT

III.6.1. Commande par perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est une approche largement répandue dans les MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement la mesure de V_{pv} et I_{pv} . Cette méthode peut dépister le point de puissance maximale avec exactitude, malgré les variations d'éclairement et de température.

La commande P&O impose toujours une oscillation autour du point de puissance maximale. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur PV et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur statique en faisant en sorte que le point de fonctionnement du générateur PV oscille le plus près possible du point de puissance maximale, même si les conditions

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

de fonctionnement sont inchangées, cela entraîne des pertes en régime établi mais qui sont largement rattrapées en fonctionnement dynamique (lors de transitoires).

La méthode de P&O (comme son nom l'indique), le processus fonctionne en perturbant le système à augmenter ou à diminuer la tension de fonctionnement du module et en observant son impact (effet) sur la puissance de sortie du module [8].

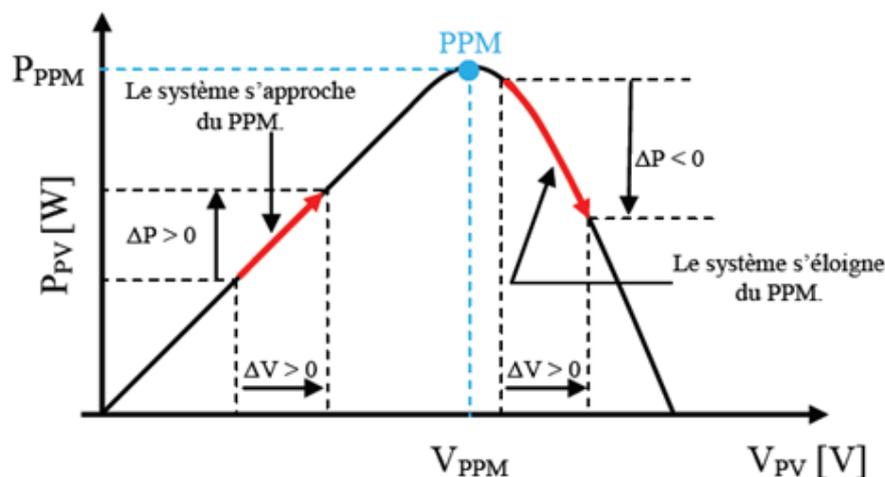


Figure III.2. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

La **figure (III.3)** montre un diagramme d'organigramme de l'algorithme de P&O. Comme on peut le voir sur la figure (III.3), V et I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$ de sortie de module. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur obtenue à partir de la dernière mesure $P(k-1)$.

Si la puissance a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que dans le dernier cycle. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera inversée à la direction opposée du dernier cycle.

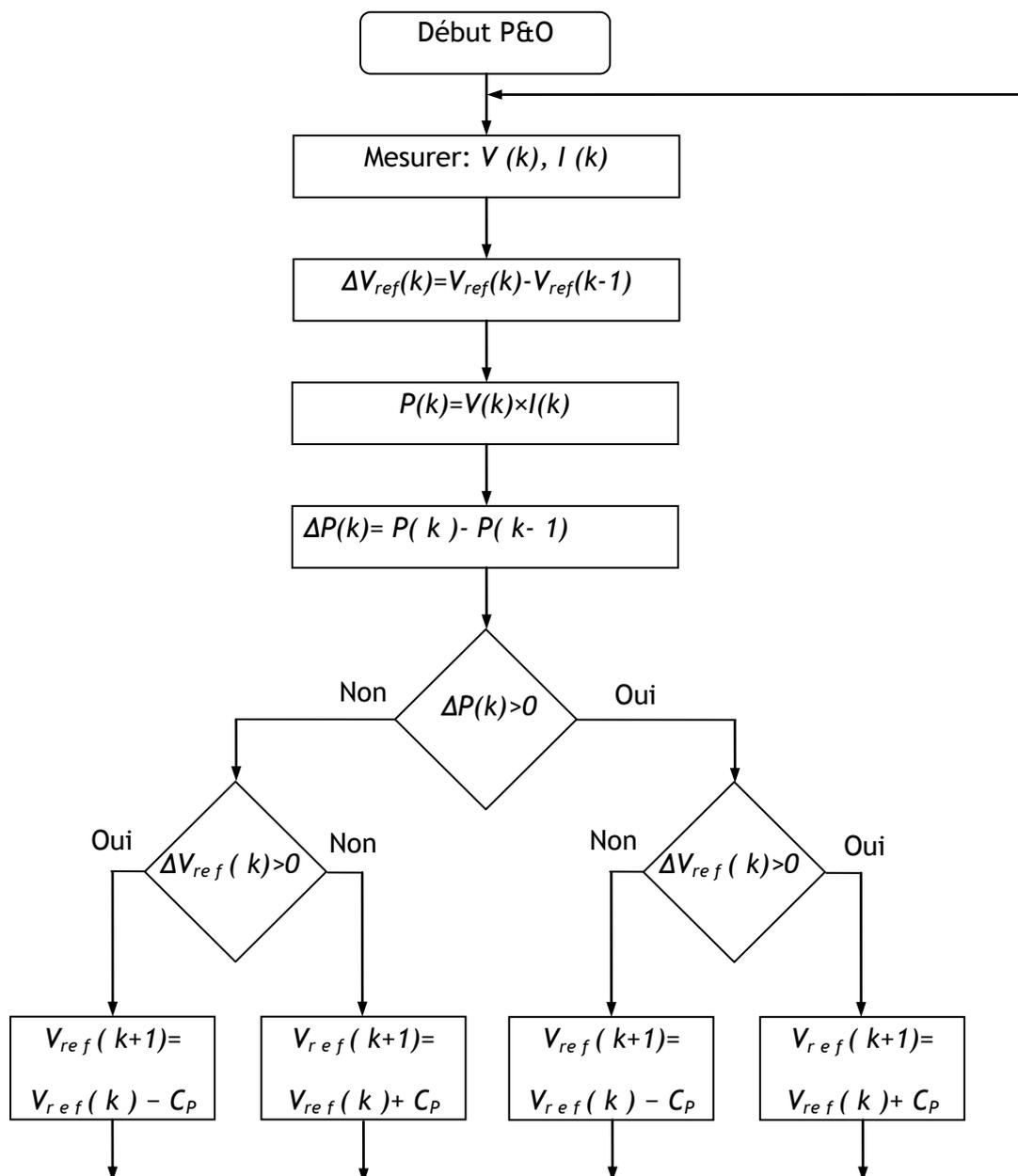


Figure III.3. Organigramme d'algorithme P&O pour le MPPT [8].

Un inconvénient de technique de P&O est que, à l'état stable (d'équilibre), le point de fonctionnement oscille autour du MPP provoquant la perte d'une certaine quantité d'énergie disponible. Plusieurs améliorations de l'algorithme de P&O ont été proposées afin de réduire le nombre d'oscillations autour du MPP dans l'état d'équilibre, mais elles

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

ralentissent la vitesse de la réponse de l'algorithme lorsque les conditions atmosphériques changent et elles abaissent l'efficacité d'algorithme pendant les jours nuageux [19], [20].

III.6.2. Algorithme de conductance incrémentale (IncCond)

Cet algorithme utilise la méthode d'une source de conductance (incrémenté) comme leurs algorithmes de recherche du MPP. Elle est plus efficace que la méthode O&P et elle est indépendante de la physique de dispositif.

On surveille la tension et le courant de sortie de la source sur laquelle le contrôleur MPPT compte pour calculer la conductance et la conductance incrémenté, et pour prendre sa décision (à augmenter ou diminuer le rapport cyclique de sortie).

Principe de l'algorithme IncCond :

La puissance de sortie de la source peut être exprimée comme suit :

$$P=V \times I \quad \text{(III.1)}$$

La dérivée du produit donne :

$$\begin{aligned} dP/dV &= d(V I) / dV \\ &= I dV / dV + V dI / dV \\ &= I/V + dI/dV \end{aligned} \quad \text{(III.2)}$$

La conductance de la source est définie comme :

$$G=I/V \quad \text{(III.3)}$$

L'incrément de la conductance est défini comme :

$$\Delta G = dI/dV \quad \text{(III.4)}$$

En général, la tension de sortie est positive, l'équation (III.2) nous montre que la tension de fonctionnement est au dessous de la tension du MPP si la conductance est supérieure à l'incrément de la conductance et vice versa. Le travail de cet algorithme est cependant de chercher la tension pour laquelle $G=\Delta G$. Ce concept est exprimé par les équations (III.5)- (III.7), et illustré graphiquement sur la figure (III.4).

$$dP/dV=0 \quad \text{si} \quad G=\Delta G \quad \text{(III.5)}$$

$$dP/dV>0 \quad \text{si} \quad G>\Delta G \quad \text{(III.6)}$$

$$dP/dV<0 \quad \text{si} \quad G<\Delta G \quad \text{(III.7)}$$

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

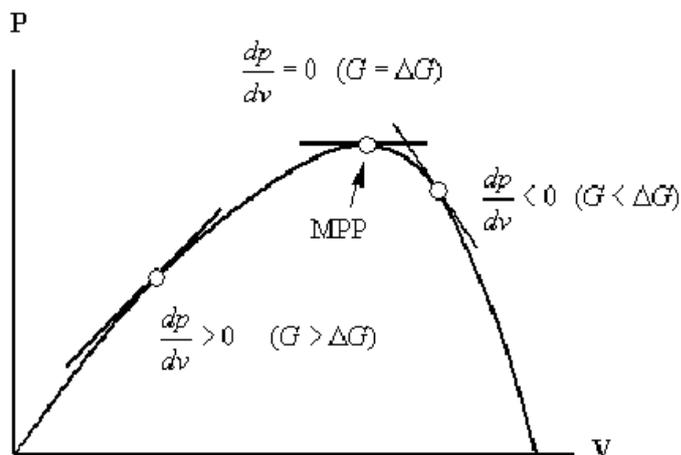


Figure III.4. Principe de la méthode de l'IncCond [8].

Comme il est montré par la figure(III.4), la méthode d'IncCond travaille avec deux sondes (capteurs), mesurant la tension V et le courant I du panneau PV.

Les changements nécessaires incrémentés dV et dI sont approximés en comparant les valeurs mesurées les plus récentes de V et I à ceux mesurés dans le cycle précédent :

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (\text{III.8})$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1), \quad (\text{III.9})$$

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

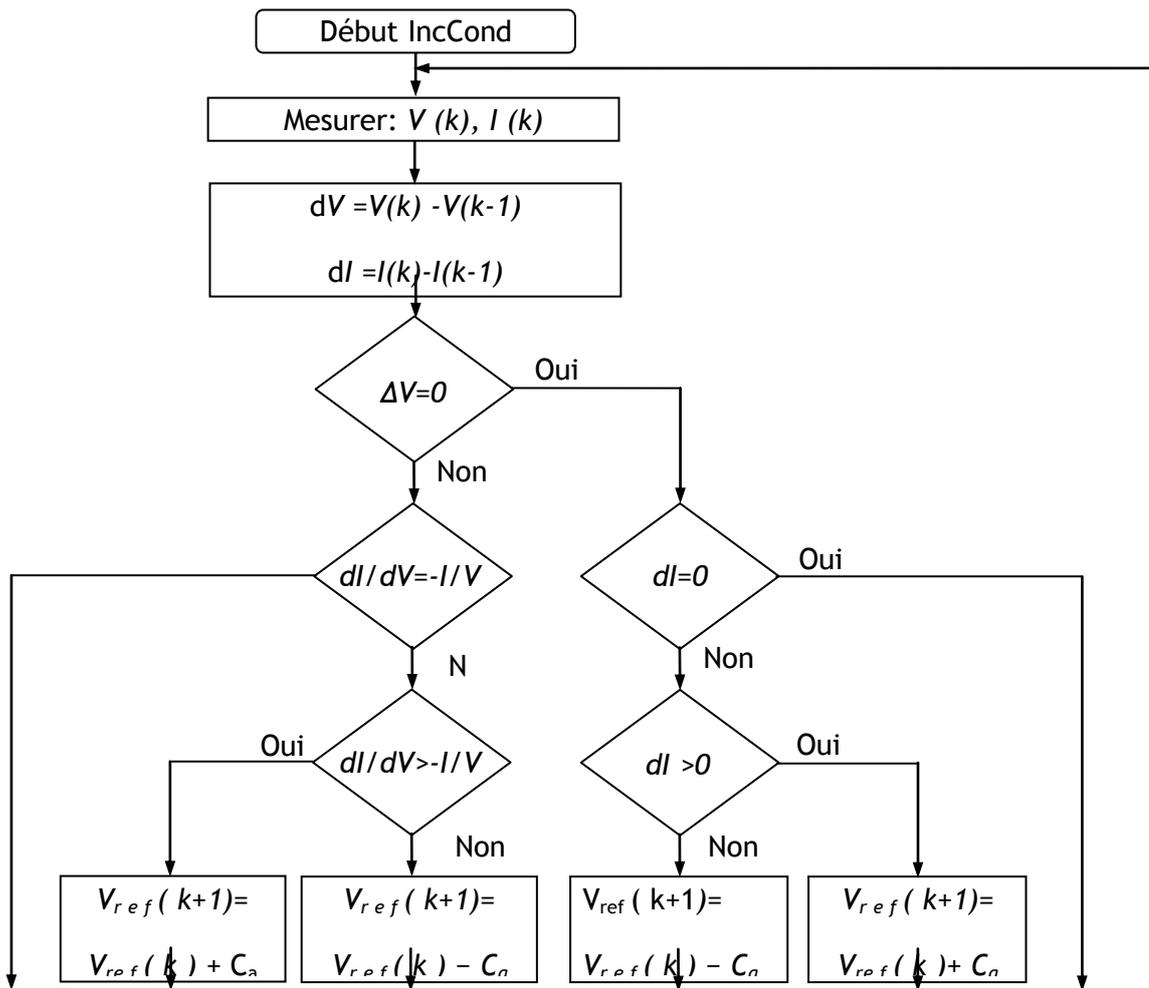


Figure III.5. Organigramme d'algorithme IncCond pour le MPPT [8].

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP, à cause du test de $dI = 0$.

L'algorithme se stabilise une fois le PPM atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour le tracking du PPM une fois le système stable, ce qui conduit à une réponse rapide du système pour des changements brusques des conditions atmosphériques.

Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constant, la condition $1/V = -dI/dV$ est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour du PPM. Pour remédier à ce problème une erreur marginale ε est ajoutée aux conditions du MPP, c'est à dire que le MPP est atteint si $|1/V + dI/dV| \leq \varepsilon$, la valeur de ε est limitée entre le problème de non fonctionnement dans le MPP exact et le problème de l'amplitude des oscillations [5].

III.7. Commande par mode glissant

La commande par mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable (SSV). Les premiers travaux sur ce type de commande ont été menés dans l'ancienne U.R.S.S à partir des années soixante. Elle est basée essentiellement sur la résolution des équations différentielles à second membre discontinu, initiée par le mathématicien soviétique A. G. Filippov [12].

Le véritable essor de l'utilisation de cette technique date de la parution des livres d'Iktis [21] et d'Utkin [22].

L'intérêt de cette commande ne cesse d'augmenter en raison de sa simplicité d'élaboration et ces multiples applications dans l'automatique ou de l'électronique de puissance.

III.7.1. Principe de fonctionnement

Le principe de cette technique de commande est de contraindre le système à atteindre une surface prédéfinie et d'y rester par la suite malgré d'éventuelles perturbations. La surface choisie est la surface de glissement ou de commutation.

III.7.2. Système à structure variables

C'est un système pouvant changer de structure en faisant commuter sa commande entre deux valeurs, suivant le signe d'une fonction des coordonnées du système dans l'espace de phase.

Dans les SSV, on peut distinguer deux configurations de base différentes. La première configuration change la structure au niveau de la contre réaction d'état et la seconde par la commutation au niveau de l'organe de commande.

❖ Configuration avec changement de la structure par commutation d'une contre réaction d'état variable :

L'organe de commande reçoit dans ce cas une tension de commande U_{cm} qui commute rapidement entre deux variables U_{cm1} et U_{cm2} , voire la figure III.6, ce qui peut provoquer des fortes sollicitations de l'organe de commande, cet inconvénient empêche très souvent une réalisation pratique de cette configuration.

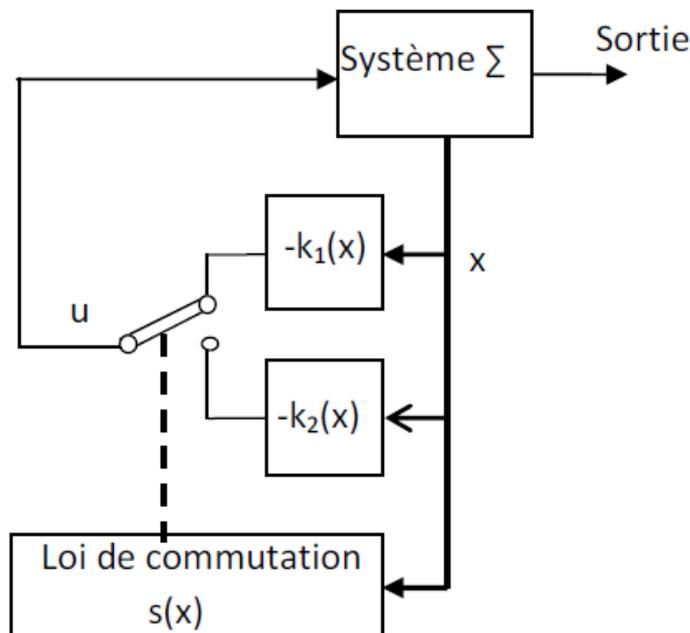


Figure III.6. Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation d'une contre réaction d'état variable [23].

Σ : système à commander,

$S(x)$: surface de glissement,

U : signal de commande,

X : vecteur d'état global de dimension ns.

On partant que $S(x)$ est positif ou négatif, la commande U est donnée par :

$$U = \begin{cases} U_1 = -K_1^T x & \text{Pour } S(x) > 0 \\ U_2 = -K_2^T x & \text{Pour } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III .10})$$

$K_{1,2}^T$: Gains du retour d'état.

- ❖ **Configuration avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande :**

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

Dans ce cas l'organe de commande (O.CM) doit être conçu de sorte que la grandeur de commande U ne prenne que deux valeurs U_{max} et U_{min} . La commutation entre ces deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon :

$$U = \begin{cases} U_{max} \\ U_{min} \end{cases} \quad \text{si } \begin{cases} s(x) > 0 \\ s(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

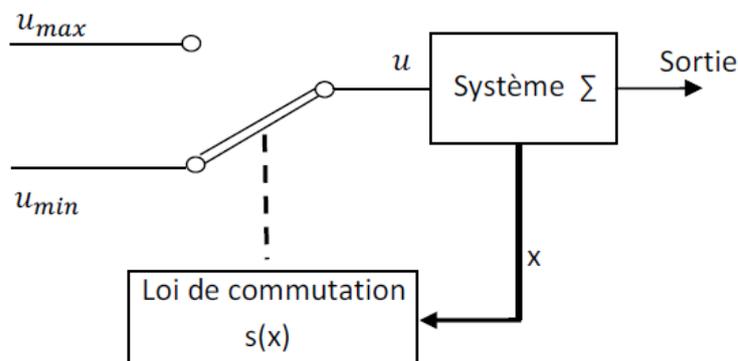


Figure III.7. Configuration avec changement de structure par commutation de l'organe de commande [23]

III.7.3. Principe de la commande par mode glissant

La commande de tels systèmes par mode de glissant a en général deux modes de fonctionnement **figure (III.8)** :

- Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).
- Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant.

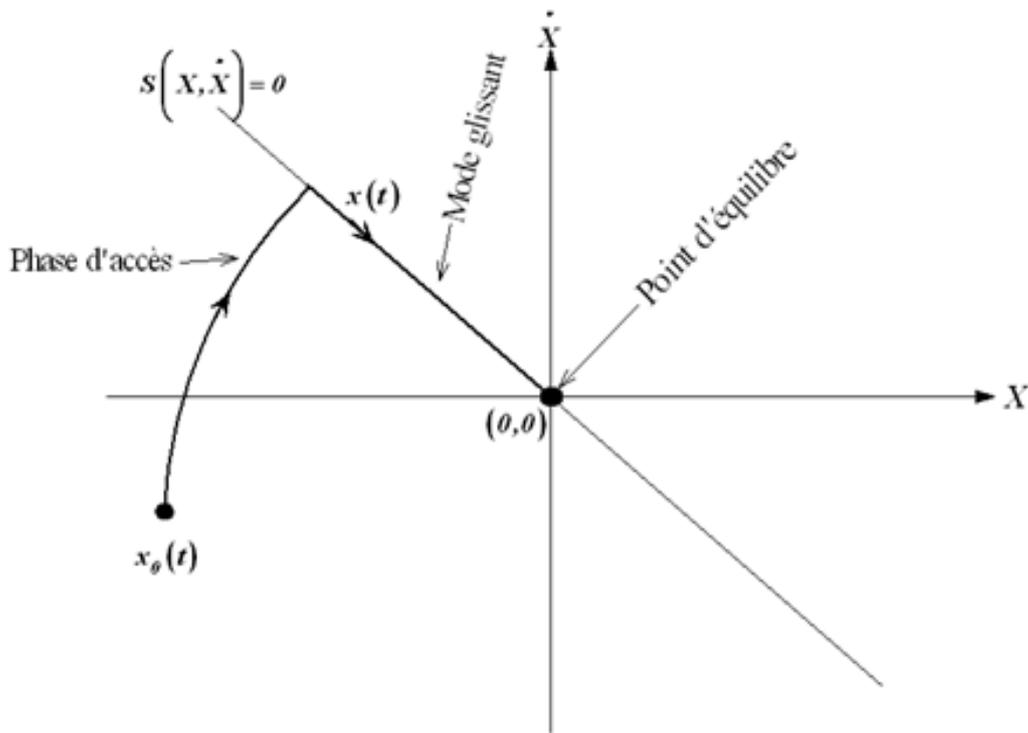


Figure III.8. Modes de fonctionnement dans le plan de phase [23]

III.7.4. Conception de l'algorithme de commande par mode glissant

La conception de la commande par mode de glissant prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par :

- Choix des surfaces de glissement ;
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant ;
- Détermination de la loi de commande.

III.7.4.1. Choix des surfaces de glissement :

Cette surface peut être linéaire ou non linéaire. Elle est construite de façon que le système ait toujours une dynamique désirée, et généralement choisie avec un degré relatif égal à un.

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.12})$$

Où $[X] \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in \mathbb{R}^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande [U].

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.13})$$

Avec:

$e(x)$: la variable à régler;

λ_x : une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'on fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$S(x)$: est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ_x et c'est l'objectif de la commande.

III.7.4.2. Condition de convergence et d'existence du mode glissant :

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation externes et des variations paramétriques. On présente deux types de conditions qui sont :

✚ Approche directe :

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme :

$$S(X) \dot{S}(X) < 0 \quad (\text{III.14})$$

✚ Approche de Lyapunov :

Il s'agit de choisir une fonction de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction ($\dot{V}(X) < 0$).

Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaire. En définissant par exemple une fonction de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.15})$$

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = s(x) \dot{s}(x) \quad (\text{III.16})$$

Pour que la fonction de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.17})$$

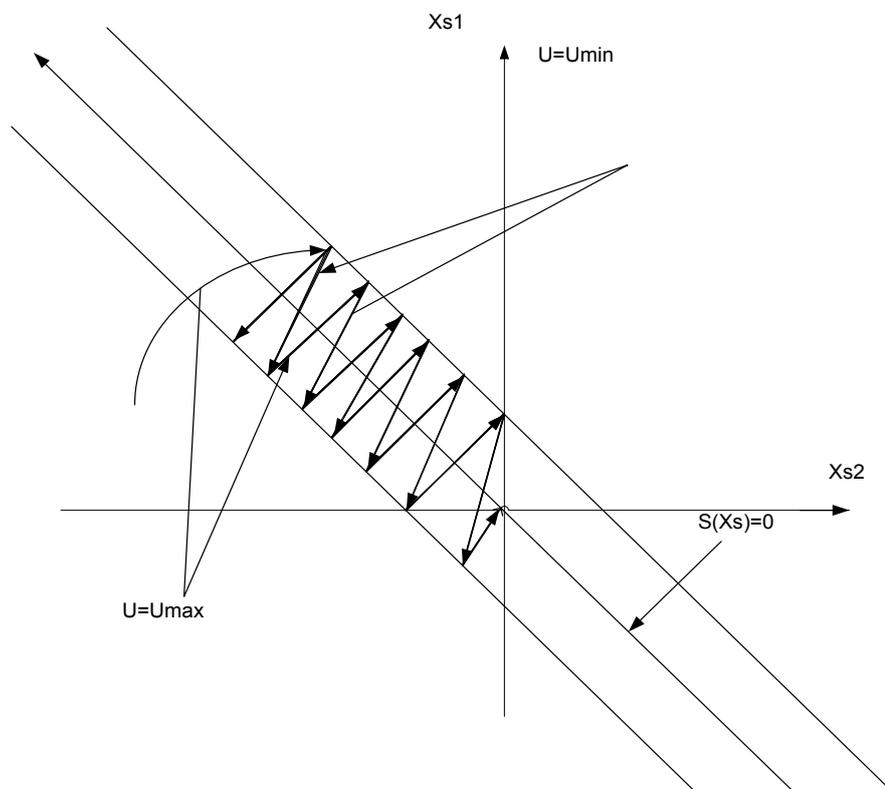


Figure III.9. Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement.

III.7.4.3. Détermination de la loi de commande :

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande.

De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée pour diminuer l'amplitude de la discontinuité.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et une deuxième stabilisante (U_n), cette dernière est importante dans la technique de la commande par mode glissant, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations.

Donc, on a :

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_n(t) \quad (\text{III.18})$$

Tel que :

$U_{eq}(t)$: est la commande équivalente, elle est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x)=0$.

$U_n(t)$: est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $\dot{S}(x)S(x) < 0$. Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement.

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne modulée de grandeur continue que prend la commande lors de la commutation rapide entre U_{max} et U_{min} .

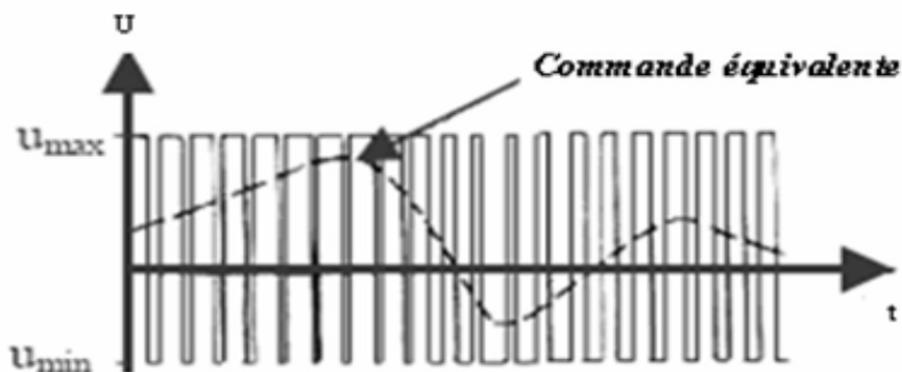


Figure III.10. La valeur continue $U_{eq}(t)$ prise par la commande lors de la commutation entre U_{max} et U_{min} .

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

Pour mettre en évidence le développement précédent, on considère le modèle d'état (III.12) on cherche à déterminer l'expression de la commande U.

La dérivée de la surface S(x) est :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.19})$$

En remplaçant (III.12) et (III.18) dans (III.19), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \quad (\text{III.20})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit

L'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] \right\} / \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [B] \right\} \quad (\text{III.21})$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial S}{\partial X} [B] \neq 0 \quad (\text{III.22})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.20), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B] U_n \quad (\text{III.23})$$

Et la condition d'attractivité $S(x)\dot{S}(x) < 0$ devient :

$$S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B] U_n < 0 \quad (\text{III.24})$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité, le signe de 'U_n' doit être opposé celui de $S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B]$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction sign (figure III.11).

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

$$U_n = K_x \text{Sign}S(x) \quad (\text{III.25})$$

Tel que :

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ -1 & x > 0 \\ \infty & x = 0 \end{cases}$$

Avec, K_x un gain positif.

Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de chattering).

Le signe de K_x doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} [B]$.

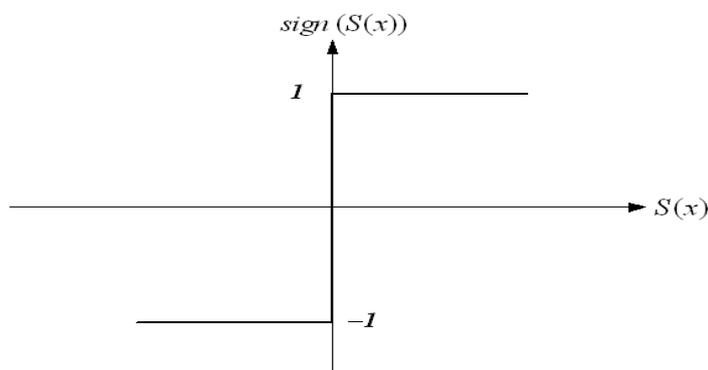


Figure III.11. Représentation de la fonction « sign »

Néanmoins, cette dernière génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé réticence (ou « chattering » en anglais), qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes hautes fréquences. La figure(III.12) représente le phénomène réticence.

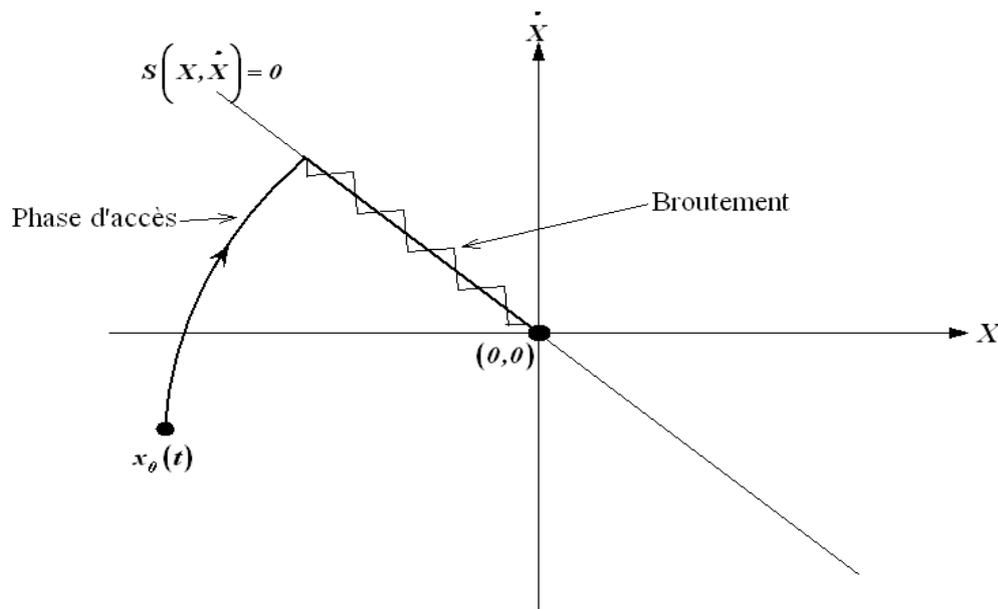


Figure III.12. Phénomène de réticence

III.7.4.4. Domaine d'application du réglage par mode glissant [23]

Le réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : ou complètement ouvertes ou fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de 10 Hz.

Les entraînements électriques pour les machines électriques, ou robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation).

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimiques, où il y a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages qui sont :

- Robustesse et rejet de la perturbation.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est atténuée par la présence de la commande équivalente.
- On peut étendre la technique à des surfaces autres que des droites, de dimension quelconque.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

III.7.4.5. Application de la commande par mode glissant au système (PV) [25] :

D'après le chapitre II, le modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost est donné par le système d'équation suivant :

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{I_{pv}}{C1} - \frac{iL}{C1} u \quad (III.26)$$

$$\frac{diL}{dt} = -\frac{V_0}{L} + \frac{u}{L} (V_{PV} + V_0) \quad (III.27)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{iL}{C} - \frac{V_0}{R * C} - \frac{U \cdot iL}{C} \quad (III.28)$$

Les équations (III.26-III .28) peuvent être représentées sous forme d'état suivant :

$$\dot{X} = ([A1][X] + [\delta]) + (U[B1][X] + [\gamma]) = [A][X] + [B][U] \quad (III.29)$$

Avec :

$$A1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L \\ 0 & 1/C & -1/RC \end{bmatrix} ; \quad \delta = \begin{bmatrix} I_{pv} \\ C1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad B1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{c1} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & \frac{-1}{c} & 0 \end{bmatrix} ; \quad \gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } X = [V_{pv} \quad iL \quad V_0]$$

Et pour réaliser le contrôleur MPPT par le mode glissant on suit les étapes citées précédemment.

➤ **Surface de glissement :**

A partir de la courbe caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ figure(II.3) la condition du point de puissance maximale est donnée par :

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0 \quad (III.30)$$

Où la puissance photovoltaïque de sortie P_{pv} est définie comme :

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (III.31)$$

L'équation (III.30) peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial V_{pv}} [I_{pv} \cdot V_{pv}] = I_{pv} + \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \cdot V_{pv} \quad (III.32)$$

Considérant la condition du MPP équation (III.30), la surface du glissement $S(x)$ proposée est :

$$S(x) = I_{pv} + \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \cdot V_{pv} \quad (III.33)$$

➤ Calcul de la commande:

Utilisant l'équation d'état de notre système, la commande équivalente donnée par l'équation (III.21) peut être exprimée comme suit :

$$U_{eq} = -\frac{\partial S}{\partial x} [AX + \delta] / \frac{\partial S}{\partial x} [Bx + \gamma] \quad (III.34)$$

Tel que :

$$X = \begin{bmatrix} V_{pv} \\ iL \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (III.35)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \left[2 \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{\partial^2 I_{pv}}{\partial^2 V_{pv}} V_{pv}, 0, 0 \right]^T \quad (III.36)$$

$$[AX + \delta] = \left[\frac{iL}{C_1}, \frac{1}{L} (V_0 + V_{pv}), -\frac{iL}{C} \right]^T \quad (III.37)$$

$$[Bx + \gamma] = \left[\frac{-iL}{C_1}, \frac{1}{L} (V_0 + V_{pv}), \frac{-iL}{C} \right]^T \quad (III.38)$$

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

En remplaçant les expressions III (36 ,37 et 38) dans (III.34), on trouve :

$$U_{eq} = \frac{I_{pv}}{iL} \quad (III.38)$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(x)\dot{S}(x) < 0$ doit être vérifiée.

Et pour cela, on choisit le deuxième terme de la commande comme suit :

$$U_n = K_x \text{sign}(S(x)) \quad (III.39)$$

Avec, $K_x > 0$.

$$U = \frac{I_{pv}}{iL} + K_x \text{sign}(S(x)) \quad (III.40)$$

Remarque :

Le terme discontinu U_n cause des réticences dans les signaux du système, en particulier le signal de commande et qui peuvent déstabilisés le système. Ils augmentent avec l'augmentation du gain « K_x » qui est nécessaire pour augmenter la robustesse et diminuer le temps de réponse du système.

III.8. Modification de la commande par mode glissant :

Les réticences (chattering en anglais) est l'inconvénient majeur de la technique de commande par mode glissant. Ce phénomène n'est autre que des oscillations à haute fréquence est très néfaste pour le système, en particulier pour les éléments d'électronique de puissance.

Puisque, le problème des réticences est dû au terme discontinu (U_n) de la commande, précisément la fonction discontinue « $\text{sign}(x)$ ». Afin de remédier à ce problème, on remplace cette fonction par une autre « $\text{sat}(x)$ », continue est qui l'approxime et elle est définit comme suit :

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

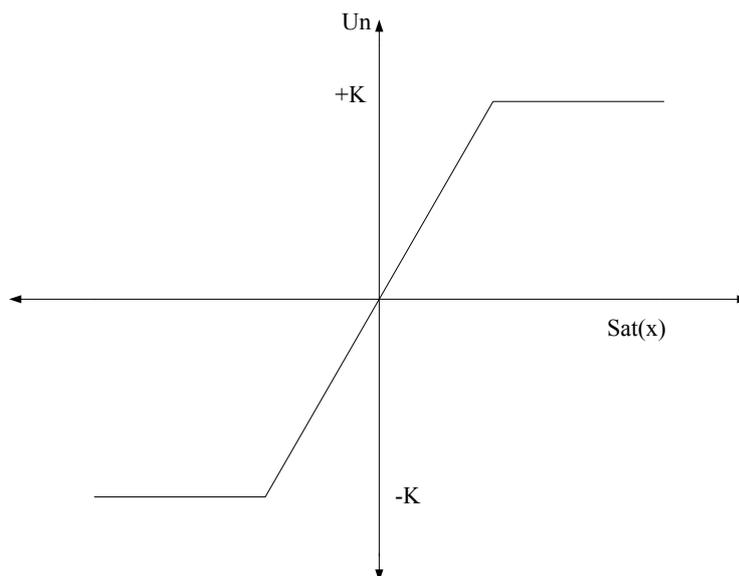


Figure III.13. Représentation de la fonction « sat(x) ».

La fonction « sat(.) » est définie par l'expression suivante :

$$\text{Sat}(x) = \begin{cases} -a & x < -a \\ 1 & -a \leq x \leq a \\ a & x > a \end{cases}, \text{ avec } a > 0$$

A partir de l'expression de U_N et de la surface choisie et des essais de simulation sur le système PV, La nouvelle expression du terme U_n^* est :

$$U_N^* = \begin{cases} -K_x & S(X) \leq -k \\ K_x S(X) & -a \leq S(X) \leq a \\ K_x & S(X) \geq k \end{cases}, \text{ avec } K_x > 0 \text{ et } k > 0.$$

III.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter quelques types de commandes MPPT existants dans la littérature.

Parmi c'est méthode, nous avons développé une commande MPPT robuste basée sur le mode glissant et on l'a appliquée sur un générateur photovoltaïque afin de trouver le point de puissance maximale sous les variations des conditions environnementales.

Chapitre III : Différentes commandes de poursuite du point de puissance maximale

La commande par mode glissant du générateur PV permet d'assurer un fonctionnement avec MPPT et une robustesse de l'algorithme de commande vis-à-vis des perturbations externes et des variations paramétriques.

Le problème majeur de la commande par mode glissant qui est la réticence est atténué en utilisant une version modifiée de la commande par MG et qui nécessite un compromis avec le temps de réponse. Au chapitre suivant les deux commandes sont testées sur le générateur PV.

IV- Validation des lois de commande MPPT

IV.1. Introduction

La simulation est un outil puissant pour évaluer les performances théoriques des différents systèmes PV. Ces derniers peuvent évoluer dans des conditions facilement contrôlables et leur fonctionnement peut être suivi avec précision. Le processus de simulation comprend les deux parties essentielles d'une conception du système : l'aspect théorique et la réalisation d'un prototype. Puisque des modifications dans la conception peuvent être facilement opérées dans un système simulé, il est possible de procéder avec un grand ensemble de variantes afin de trouver la solution optimale.

Le logiciel Math Works Matlab comprend l'outil de simulation Simulink. Il fournit la possibilité de simuler des systèmes continus ou discrets. Ceci le rend convenable pour implémenter, observer, et évaluer les systèmes MPPT numériques présentés au chapitre III.

Simulink tient compte de la décomposition d'un système simulé en un certain nombre de sous-systèmes. Ces derniers peuvent être modélisés, testés individuellement et ensuite interconnectés. Ceci permet de définir les systèmes physiques tels que le GPV, le convertisseur *DC-DC*, et la commande MPPT en tant qu'unités indépendantes pour vérifier leur fonctionnalité de façon appropriée. Enfin, ces sous-systèmes peuvent être connectés pour former un système PV complet commandé par MPPT comme il est représenté à la figure (IV.1).

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation de la commande MPPT avec les modes mode glissant (MPPT-MG) et MPPT-MG modifié. On a effectué plusieurs tests dans le but d'examiner les performances de la MPPT-MG et MPPT-MG modifiée.

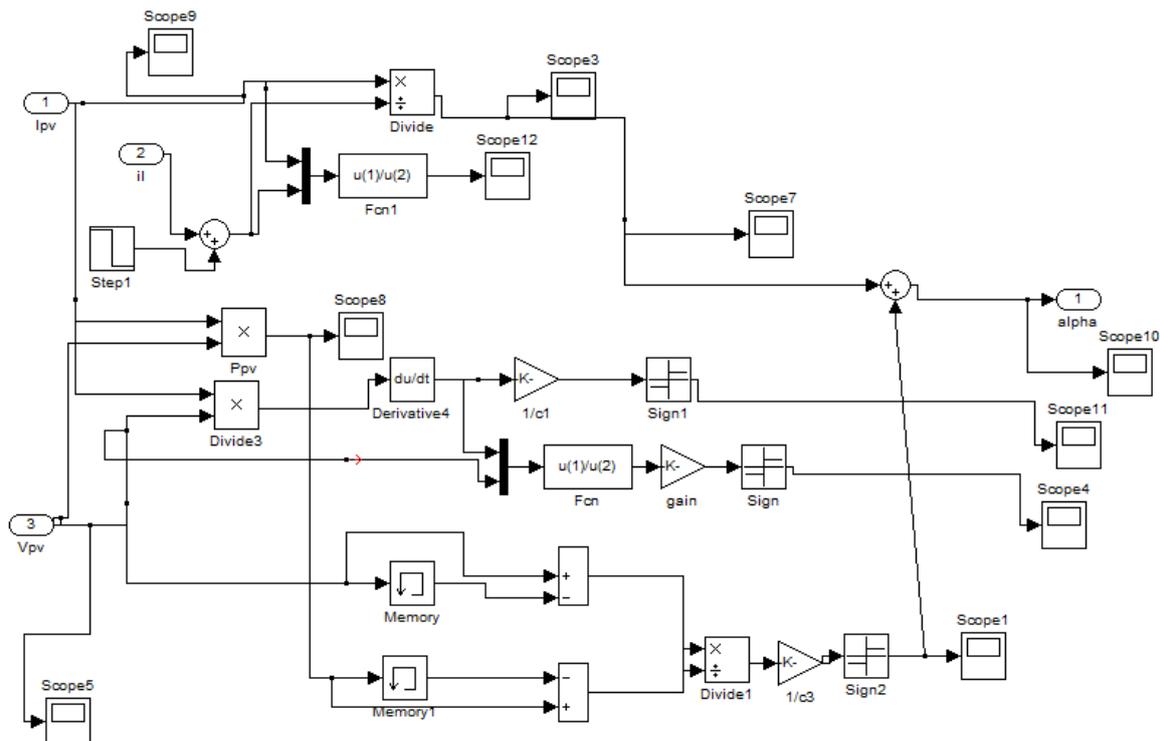


Figure IV.1. Schéma bloc de la commande MPPT-MG.

IV.2. Les tests de robustesse du contrôleur par mode glissant vis-à-vis des paramètres météorologiques

Pour faire une étude de la robustesse du contrôleur vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

Nous soumettons le système contrôlé à différentes conditions environnementales :

- ✓ D'abord on maintient une température et un éclairement constants (conditions standards : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$).
- ✓ Après, on maintient une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et on varie l'éclairement solaire (une augmentation ou une diminution).
- ✓ Ensuite, on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe (1000 W/m^2) et on varie la valeur de la température (une augmentation ou une diminution).

IV.2.1. Robustesse du contrôleur MPPT-MG dans les conditions standards

Afin d'évaluer les performances de la MPPT basée sur la technique des MG, nous utilisons dans un premier lieu, les conditions standard ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$), par la suite, on teste l'effet des variations des paramètres météorologiques (éclairage et température). La figure (IV.2) présente les réponses (V_{pv} , I_{pv} , P_{pv}) de l'algorithme MPPT-MG lors du fonctionnement du générateur photovoltaïque avec les conditions standards.

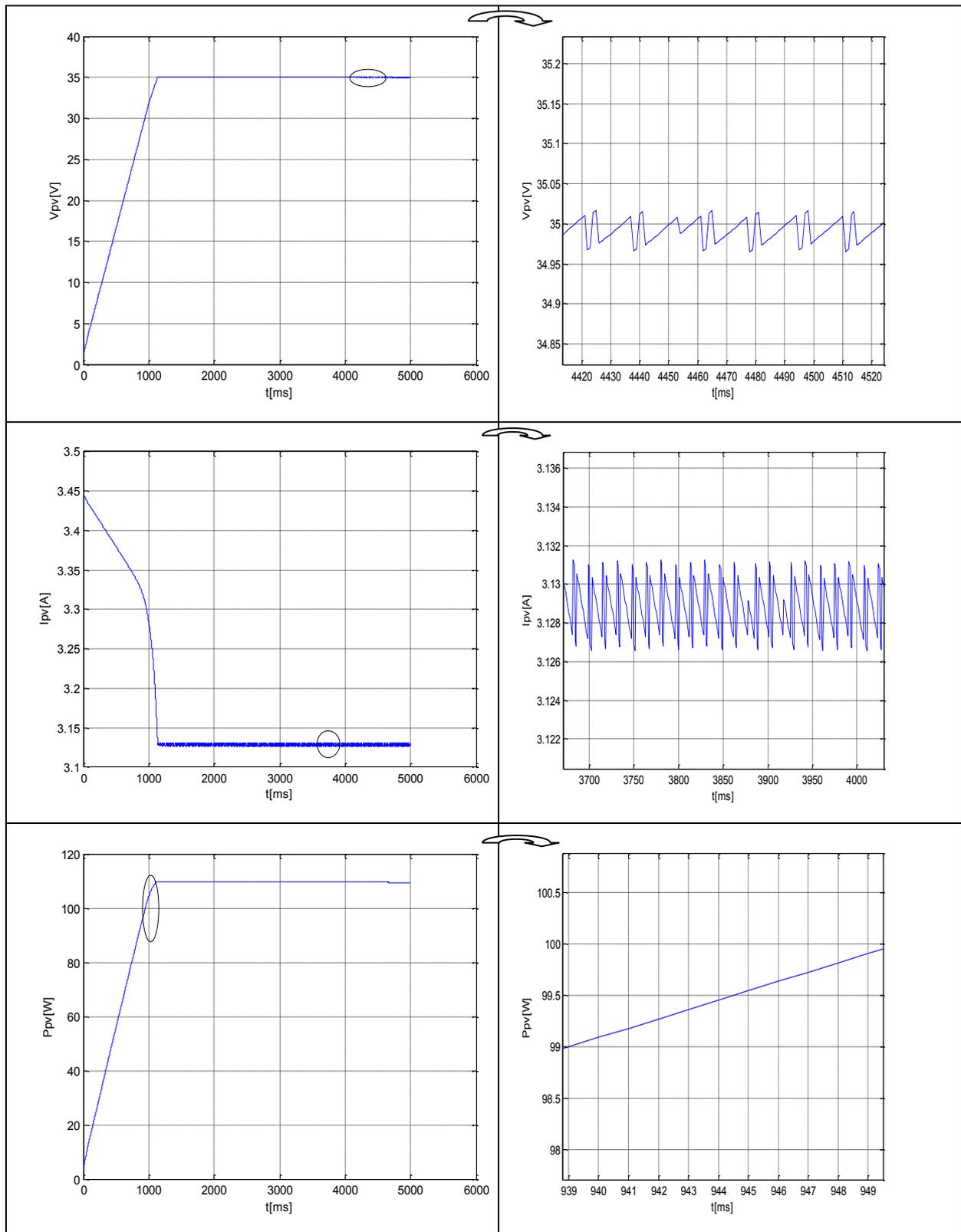


Figure IV.2. Les réponses $V_{pv}(t)$, $I_{pv}(t)$, $P_{pv}(t)$ du contrôleur mode glissant dans les conditions standards avec $K_x=0.45$.

Cette figure nous montre la réponse des différents paramètres du panneau PV tels que le courant, la tension et la puissance du système PV. On remarque que le point de puissance maximale est atteint après 1.1s, où tous les signaux sont stables au régime permanent. Comme on constate la présence de faibles oscillations (réticences) au régime établi (mode glissant).

IV.2.2. Robustesse de contrôleur MPPT-MG vis-à-vis des variations de l'éclairement

Sous une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$, on effectue deux tests : on augmente l'éclairement (de $500\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$) pendant 10 secondes (figures (IV.3)), puis on le diminue (de $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $500\text{W}/\text{m}^2$), (figures (IV.4)).

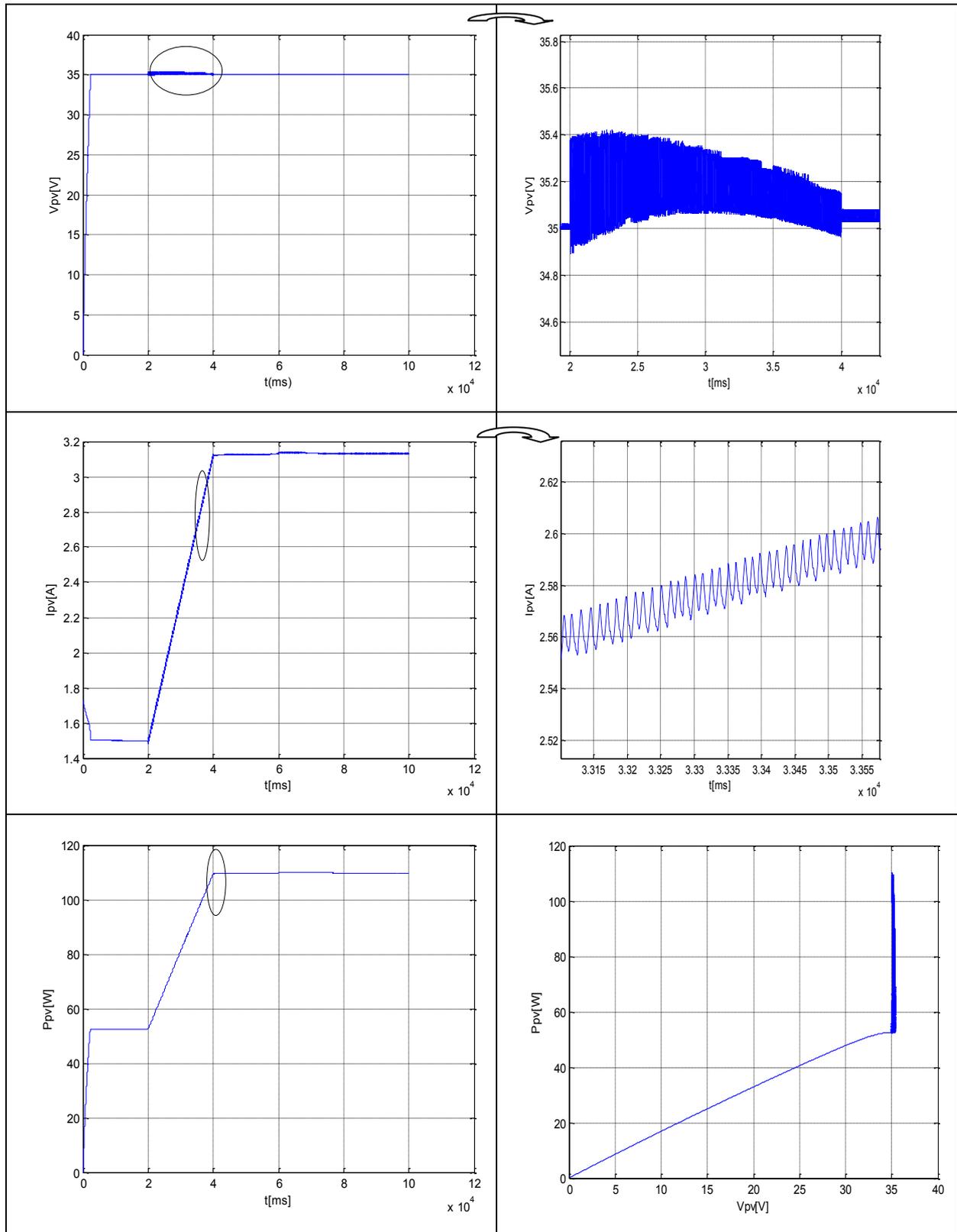


Figure IV.3. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG lors d'une augmentation de l'éclairement (de 500W/m^2 à 1000W/m^2) avec $K_x = 0.45$.

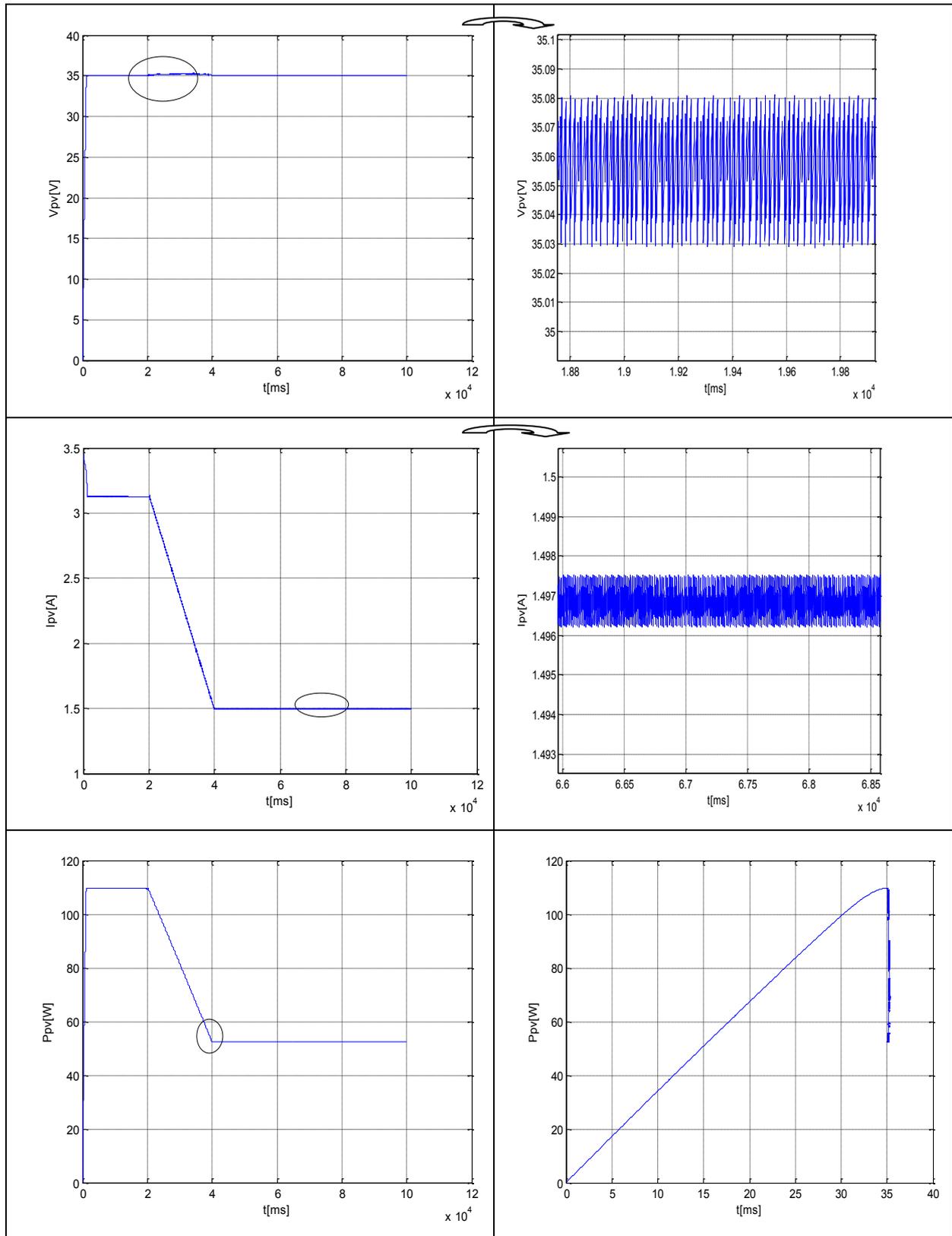


Figure IV.4. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG pour une diminution de l'éclairement (de 1000W/m^2 à 500W/m^2) avec $K_x=0.45$.

IV.2.3. Robustesse du contrôleur MPPT-MG vis-à-vis des variations de la température

Dans cette partie, nous étudions l'effet du changement de la température sur le fonctionnement du générateur photovoltaïque commandé par l'algorithme MPPT-MG. Pour un éclairement de $E = 1000 \text{W/m}^2$, on augmente la température de 298°K à 318°K (25°C à 45°C), (**Figure IV.5**) puis on refait un deuxième test, en diminuant la température de 318°K à 298°K , (**Figure IV.6**).

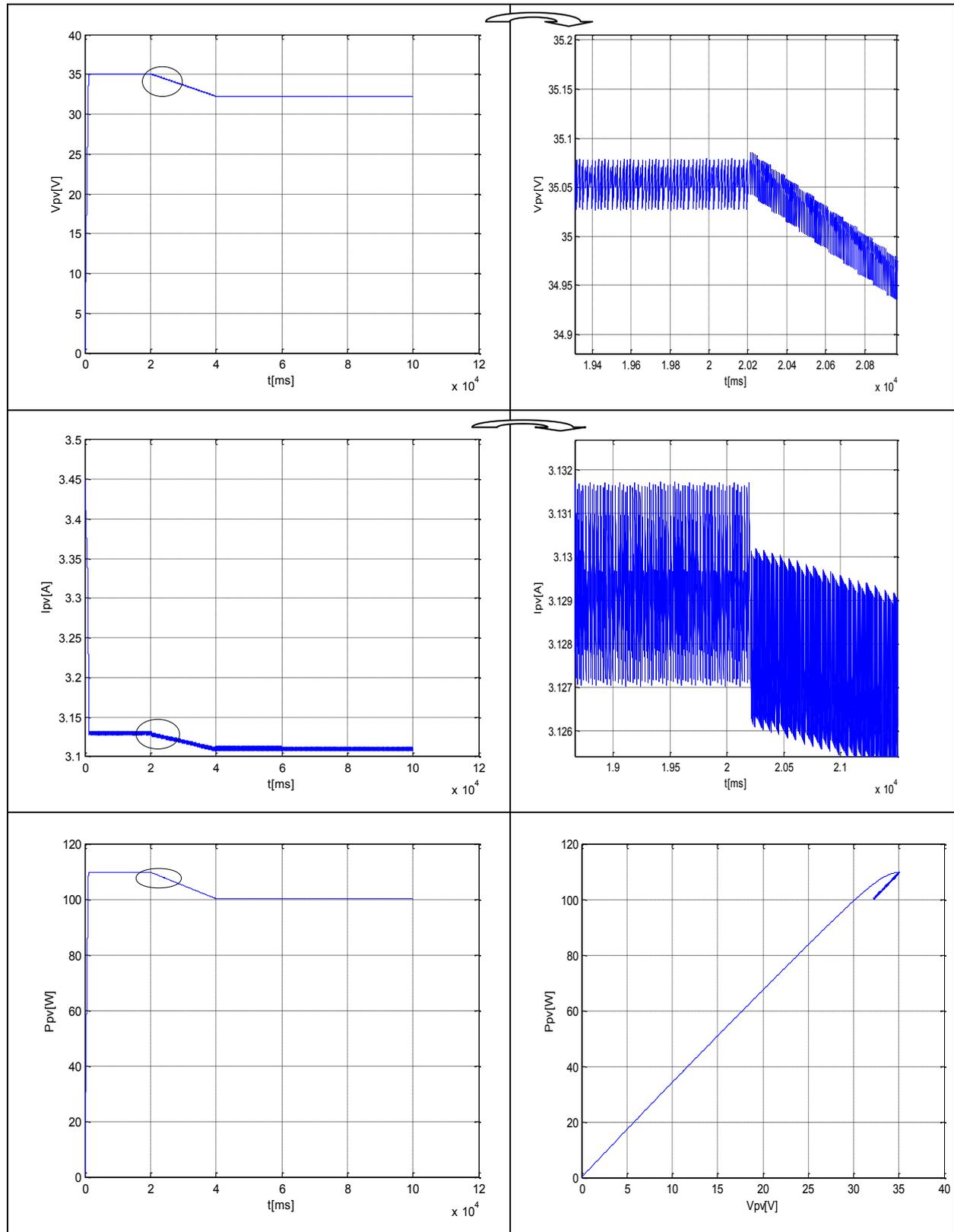


Figure IV.5. Réponse du système PV avec le contrôleur MPPT-MG pour une augmentation de température (de 25°C à 45°C) avec $K_x=0.45$.

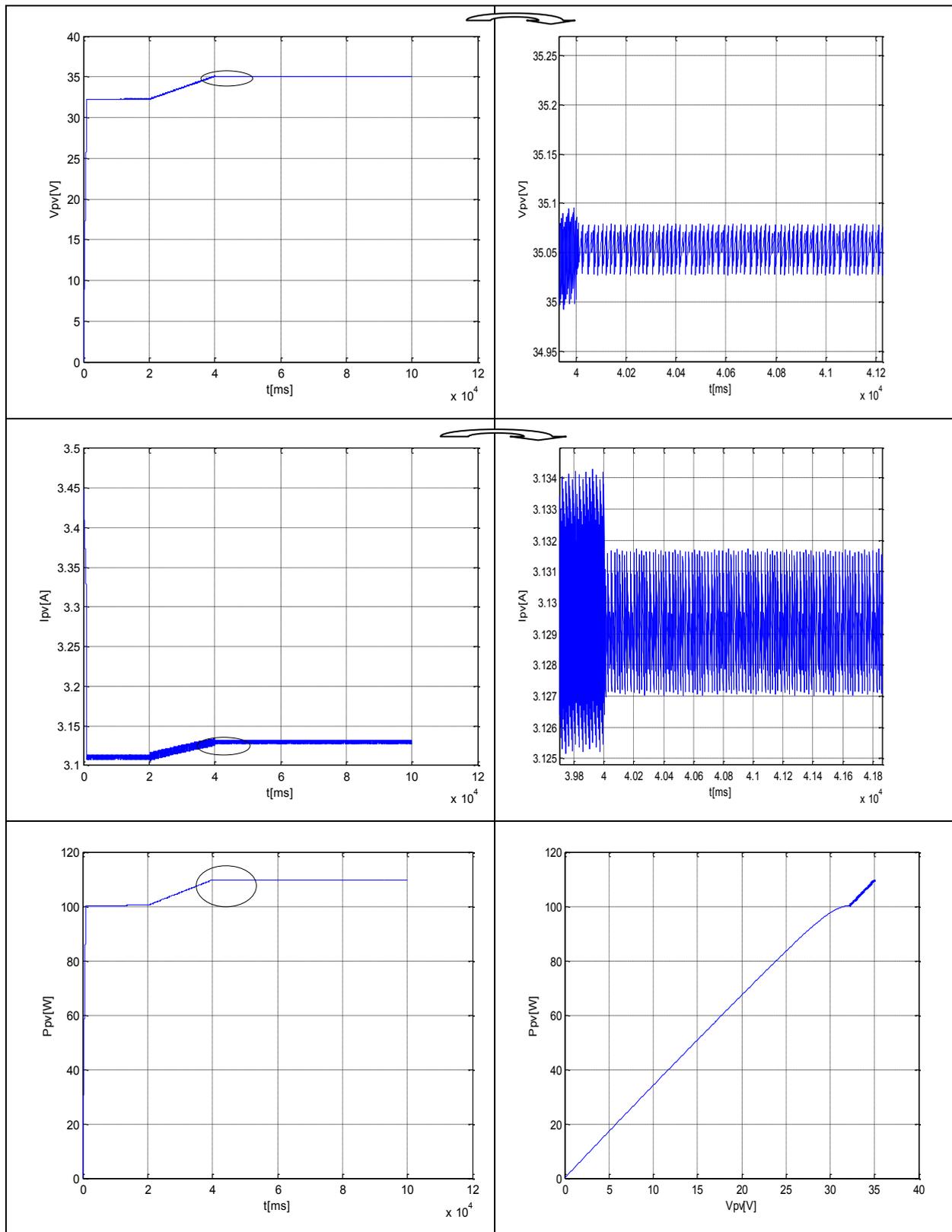


Figure IV.6. Comportement du contrôleur CMG lors d'une diminution de la température

On constate que malgré les variations des paramètres météorologiques (éclairage et température), Le système PV commandé par l'algorithme MPPT basé sur les modes glissants fonctionne au point de puissance maximale.

Les figures (IV.3) et (IV.4) présentent les réponses pour une augmentation de l'éclairement 500W/m^2 à 1000W/m^2 et sa diminution de 1000W/m^2 à 500W/m^2 respectivement, avec $K_x = 0.45$. On constate que la puissance P_{PV} du panneau PV augmente avec l'éclairement et le contraire est vrai, or la température provoque l'effet contraire sur la P_{PV} , mais le contrôleur MPPT-MG assure le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale avec un temps de réponse faible et une stabilité de tous les signaux. Le seul inconvénient est les effets de réticence qui affectent en particulier le régime transitoire qui peuvent détruire les composants du hacheur.

Les réponses du système vis-à-vis aux variations de température sont représentées par les figures (IV.5) et (IV.6). On constate que ces variations provoquent l'effet contraire sur P_{PV} que l'éclairement. Mais le système fonctionne avec une puissance maximale et avec de bonne performance et les mêmes inconvénients que les variations de l'éclairement.

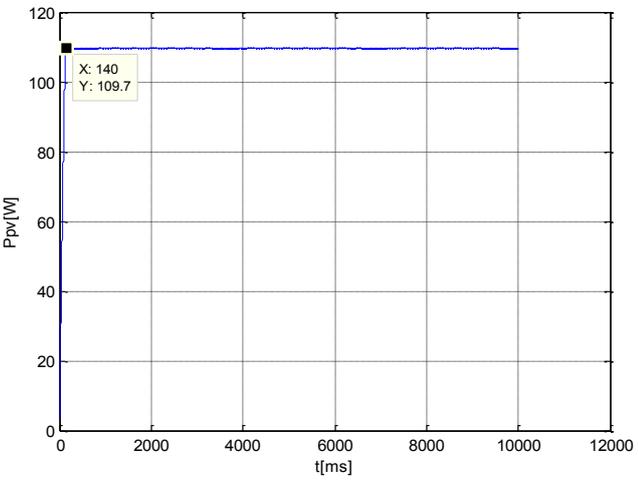
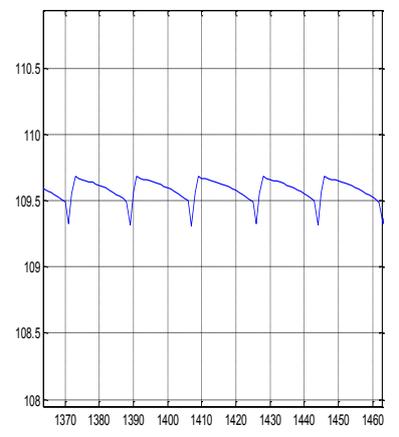
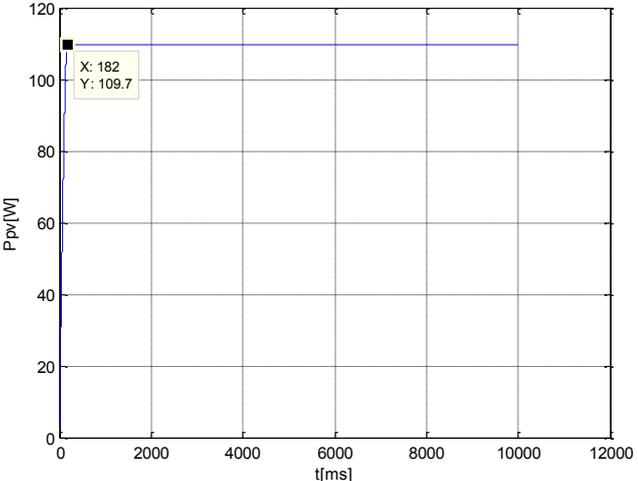
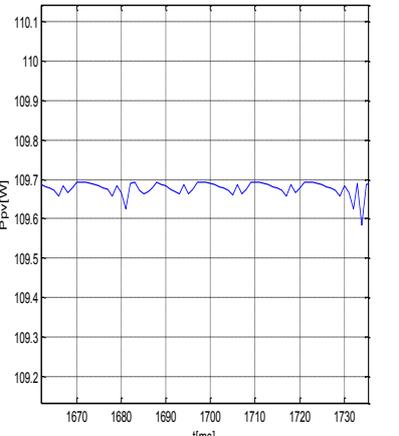
IV.3. Influence du gain de réglage K_x sur les performances du contrôleur MPPT-MG

On teste l'algorithme MPPT-MG par rapport aux variations du gain de réglage K_x , d'abord pour un éclairement de 1000W/m^2 et une température de 25°C , puis on varie l'éclairement (augmentation de 1000W/m^2 à 500W/m^2 , puis une diminution de 500W/m^2 à 1000W/m^2). On effectue un autre test par rapport aux variations de la température. On rappelle que K_x est un gain positif qui caractérise le terme discontinu du signal de commande et qui est dimensionné par des essais de simulations.

Chapitre IV : Validation des lois de commande MPPT

IV.3.1. Variation de K_x dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$)

On vari le gain de réglage K_x de 0.6 à 0.01, on obtient les réponses suivantes :

K_x	Les figures	Le zoom
0.6		
0.45		

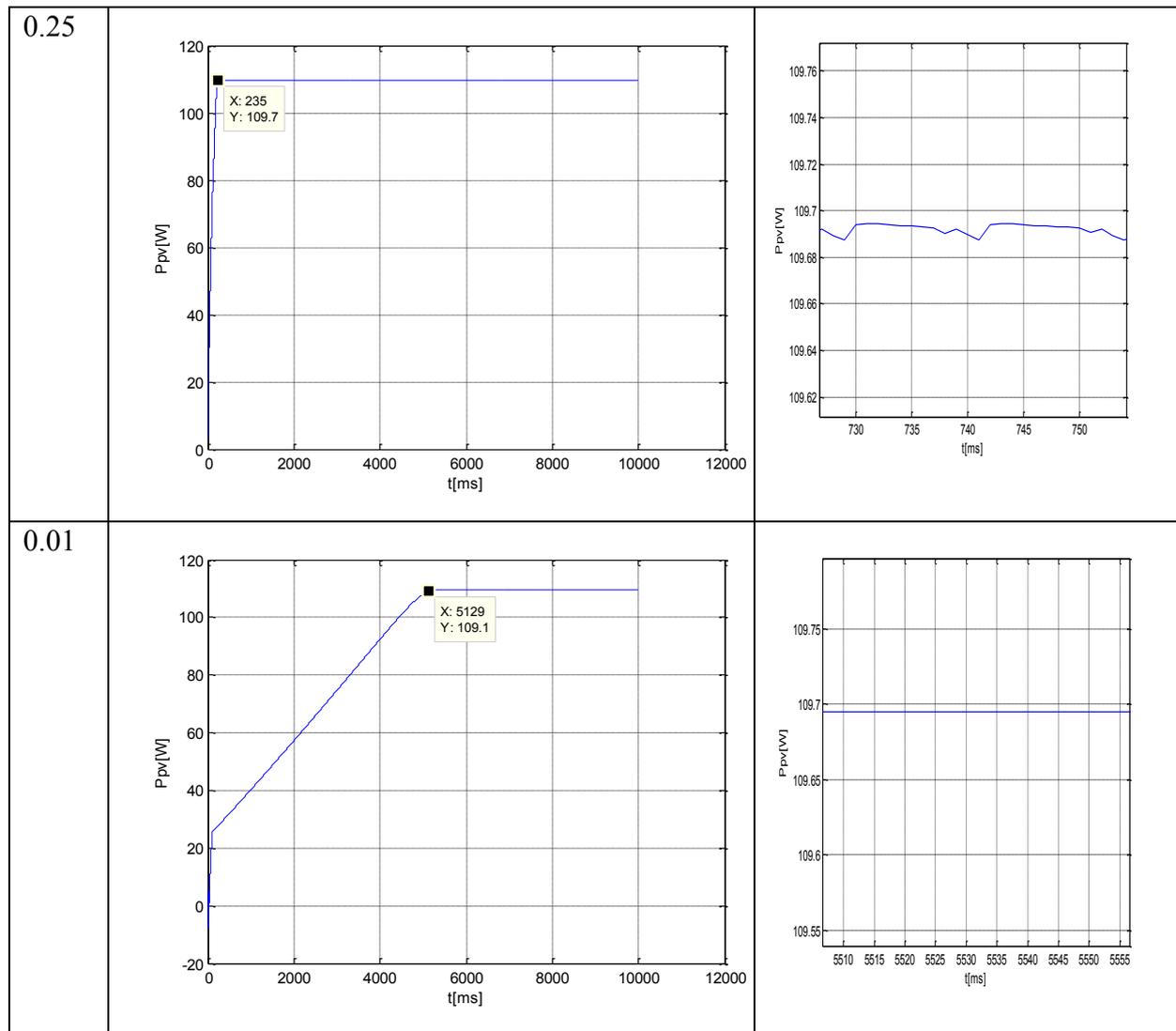


Figure IV.7. Les effets de la variation de K_x (0.6 à 0.01), sur les performances du contrôleur MPPT-MG avec $T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$:

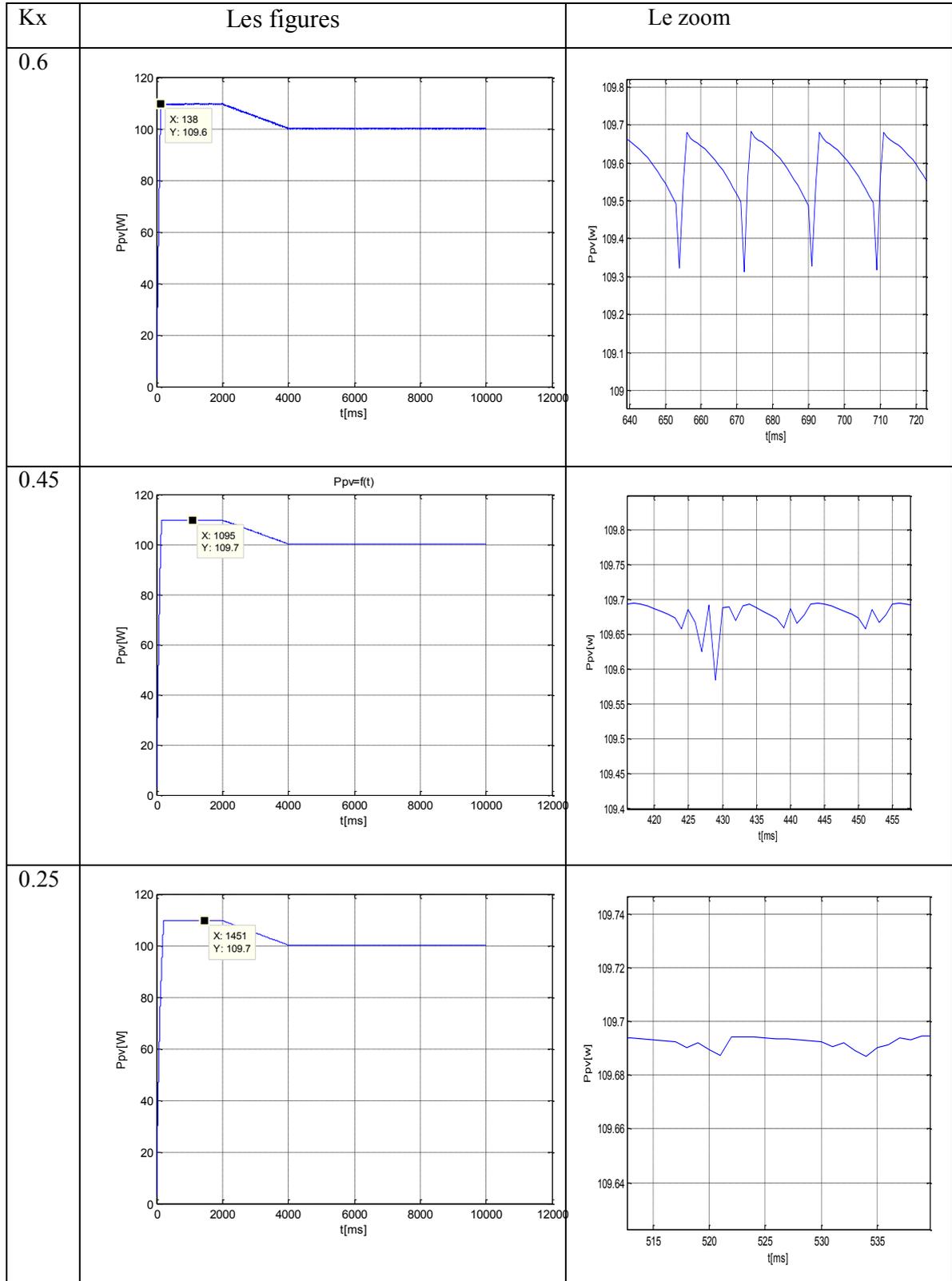
On remarque que l'augmentation du gain K_x rend le système rapide mais relativement instable par l'apparition des effets de réticence et il fonctionne toujours avec une puissance maximale. En effet, la valeur de K_x détermine l'amplitude du terme discontinu « U_N » dans la commande MPPT-MG.

IV.3.2. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux Variations de la température

Dans cette partie, nous étudions l'influence du gain K_x (0.6 à 0.01), sur la robustesse du contrôleur MPPT-MG pour une augmentation de la température de 298°K à 318°K

Chapitre IV : Validation des lois de commande MPPT

(25°C à 45°C) et en gardant l'éclairement à $E = 1000\text{W/m}^2$. La figure (IV.8) présente les résultats de simulation :



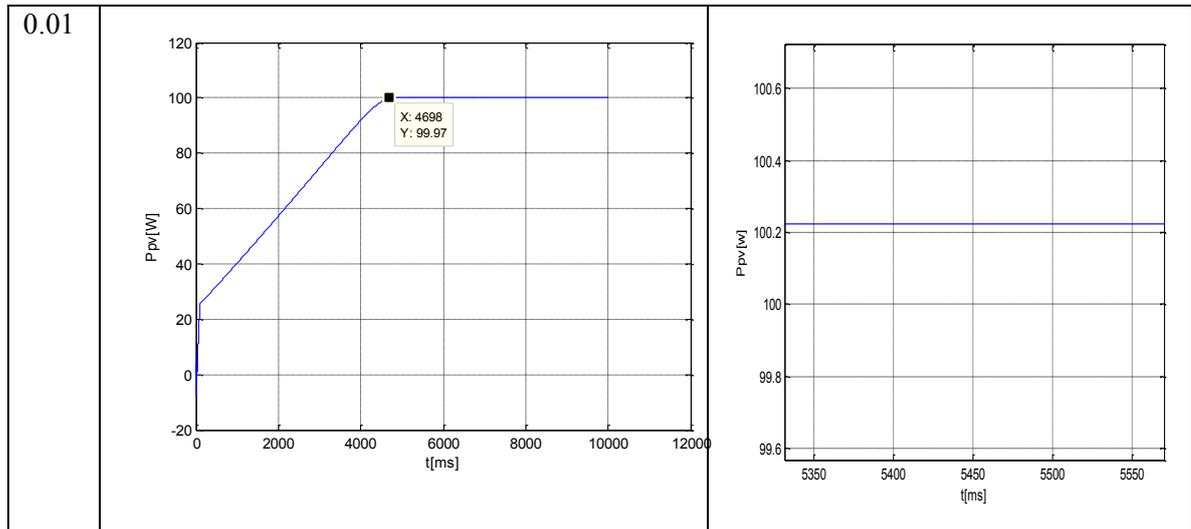


Figure IV.8. Influence du gain K_x (0.6 à 0.01), sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux variations de T (25°C à 45°C).

La diminution du gain de réglage rend le système stable (absence des effets de réticence) mais le régime transitoire est prolongé (système long). L'augmentation du gain K_x rend le système rapide mais relativement instable à cause de l'apparition des effets de réticence et il fonctionne toujours avec une puissance maximale. Il est nécessaire de trouver un compromis entre stabilité et temps de réponse.

IV.3.3. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux Variations de l'éclairement

La robustesse du contrôleur MPPT-MG par rapport à la diminution de l'éclairement de 1000W/m² à 850W/m² et pour une température de 25°C est étudiée par rapport aux valeurs du gain de réglage K_x (0.45 à 0.05). Les résultats de simulation sont donnés par la **Figure** :

Chapitre IV : Validation des lois de commande MPPT

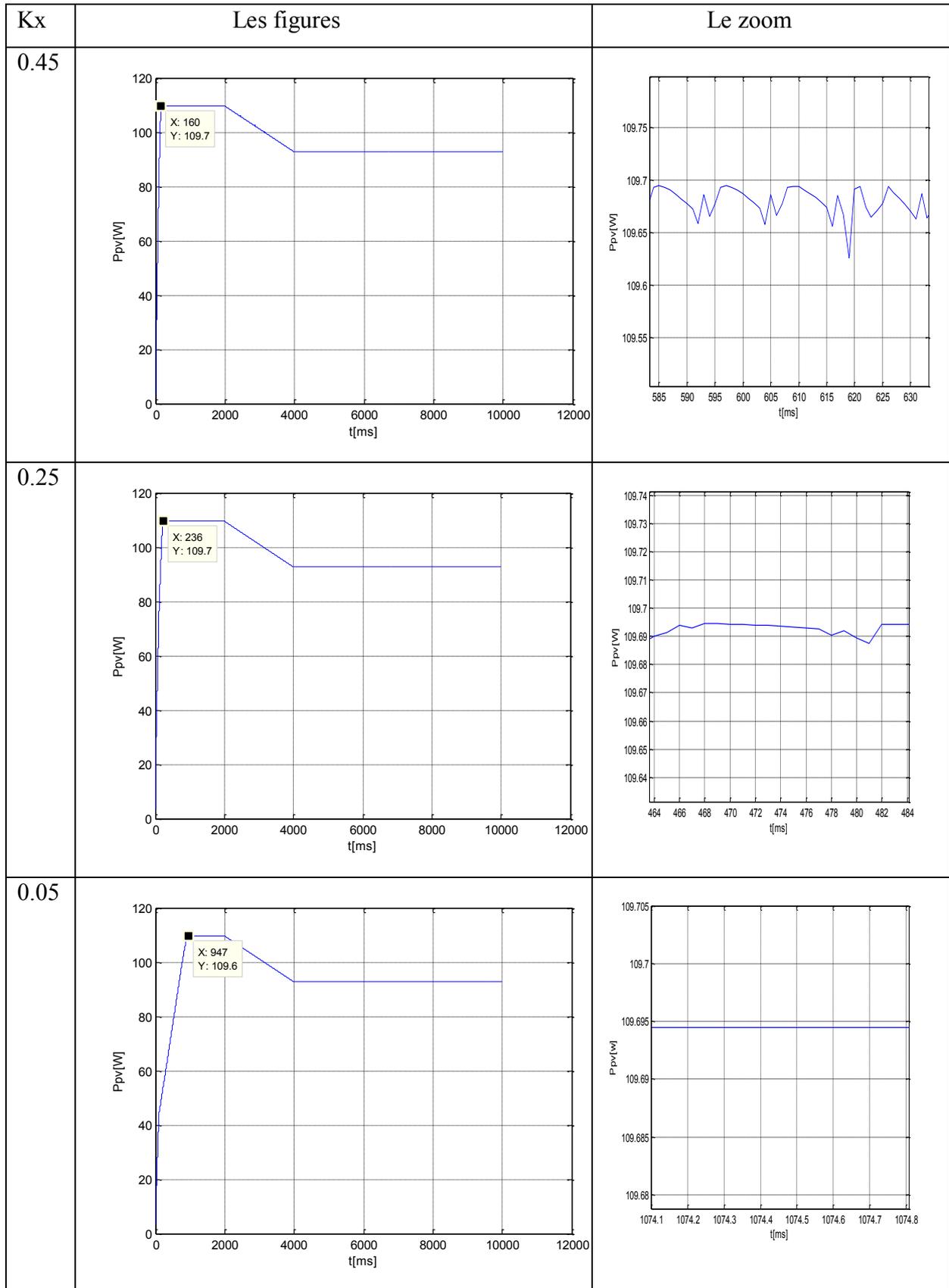


Figure IV.9. Influence du gain K_x (0.45 à 0.05), sur la robustesse de la MPPT-MG par rapport aux variations de l'éclairement (1000W/m^2 à 850W/m^2).

L'augmentation du gain rend le système rapide mais il est relativement instable à cause des effets de réticence et le système est stable (absence des réticences) mais très long si on diminue K_x . Le système fonctionne au point de puissance maximale.

D'après les trois essais précédents, on constate que le choix de gain est très influant car, s'il est très petit le temps de réponse est très long et, s'il est choisi grand, des oscillations apparaissent au niveau de l'organe de la commande, donc, dans les signaux du système PV.

Pour éliminer ces oscillations (les effets de réticences), on utilise la commande MPPT-MG modifiée.

IV.4. Les essais de simulation du contrôleur MPPT-MG modifiée par rapport aux variations des paramètres météorologiques

Donne cette partie nous présentons les résultats de simulation de l'algorithme MPPT-MG modifiée, en variant K_x , dans un premier lieu, avec des conditions météorologiques fixe (standard). Par la suite, on varie ces paramètres météorologiques.

IV.4.1. Variation de K_x dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$)

On varie le gain de réglage K_x de 06 à 0.25, on obtient les réponses suivantes :

Chapitre IV : Validation des lois de commande MPPT

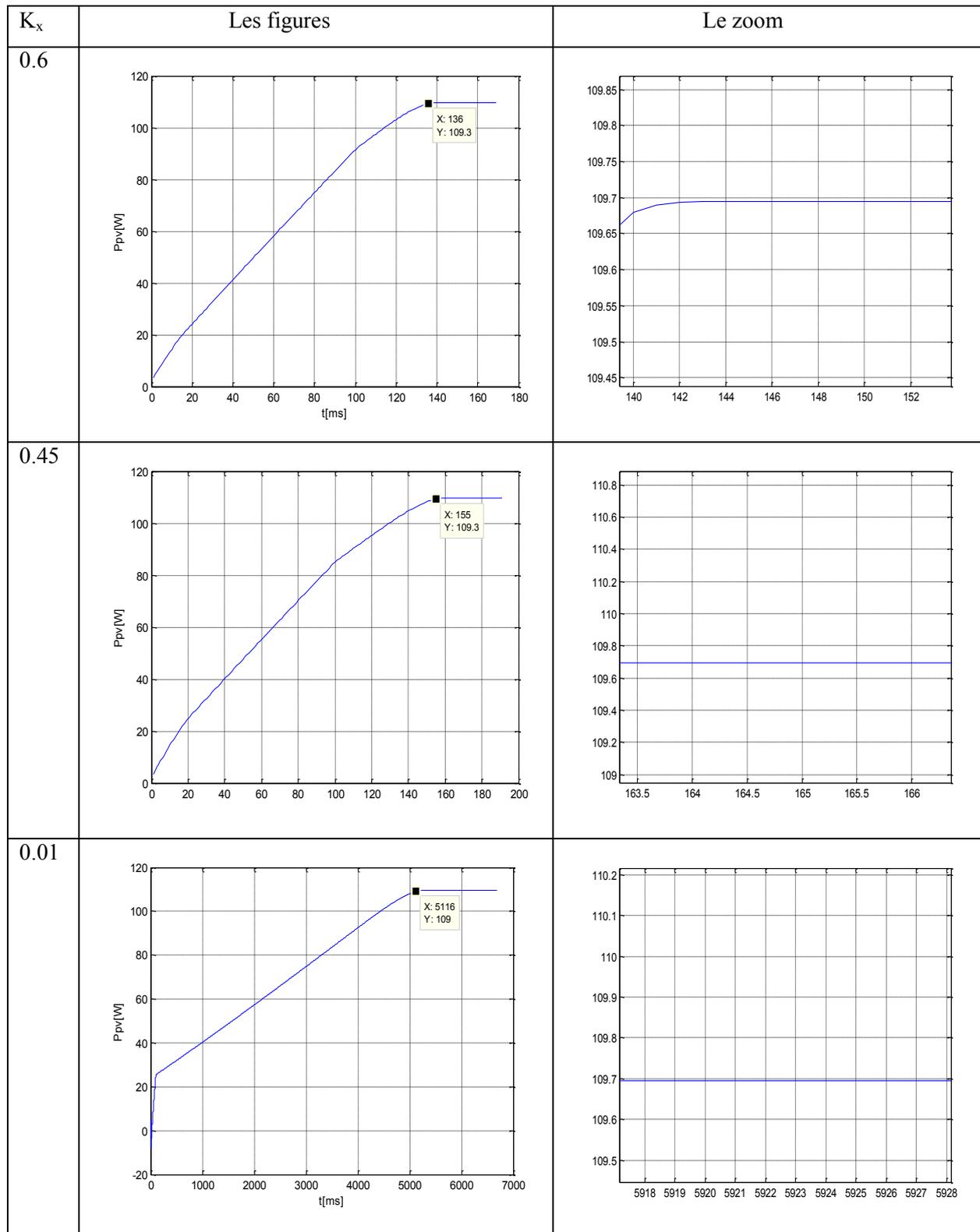


Figure IV.10. Les effets de la variation de K_x (0.6 à 0.25), sur les performances du contrôleur MPPT-MG modifiée avec $T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$.

IV.4.2. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de la température

Dans cette partie, nous étudions l'influence du gain K_x (0.6 à 0.25), sur la robustesse du contrôleur MPPT-MG modifié pour une augmentation de la température de 298°K à 318°K (25°C à 45°C) et en gardant l'éclairement à $E = 1000\text{W/m}^2$. La figure (IV.11) présente les résultats de simulation :

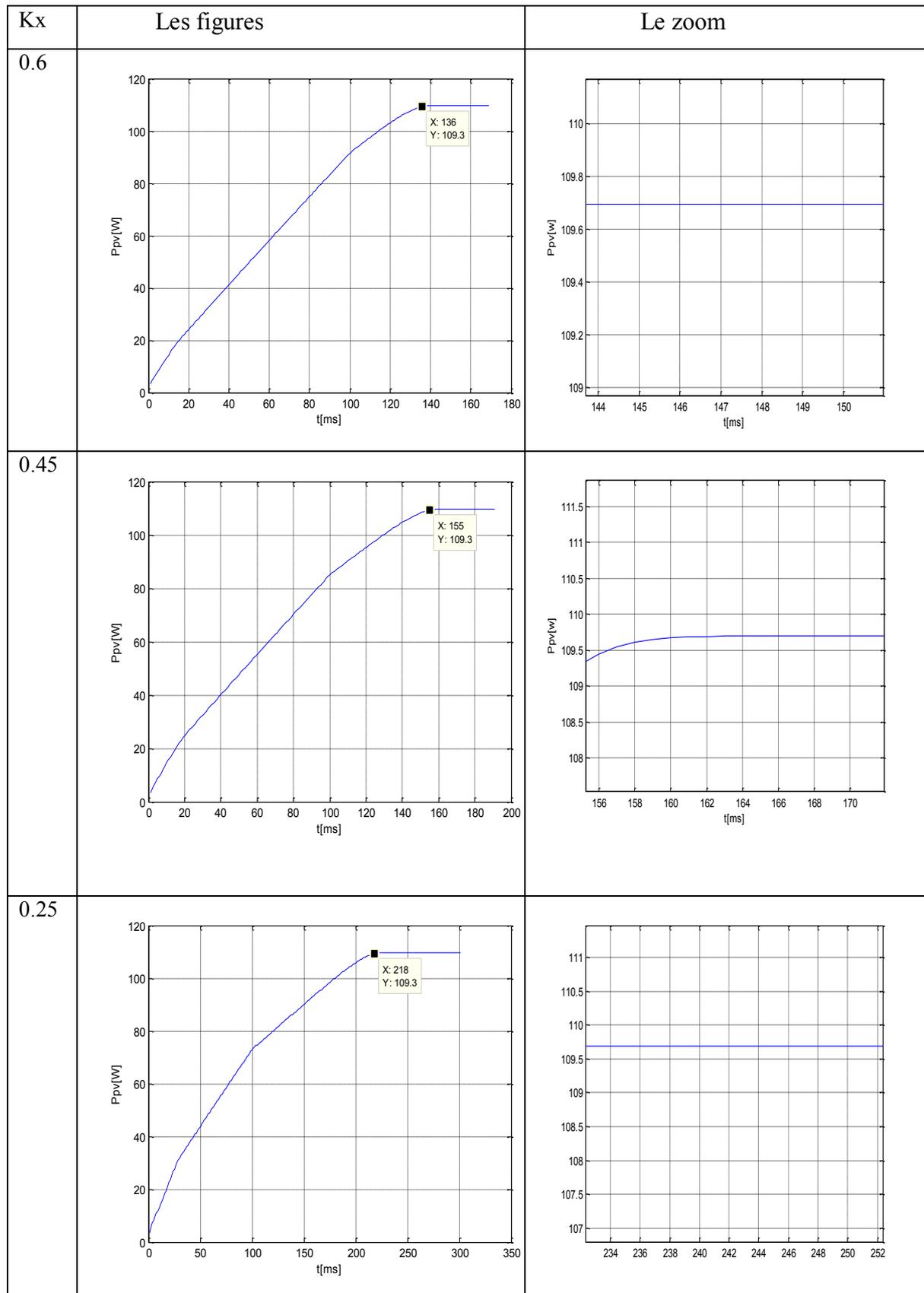


Figure IV.11. Influence du gain K_x (0.6 à 0.25), sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de T (25°C à 45°C).

IV.4.3. Influence du gain K_x sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de l'éclairement

La robustesse du contrôleur MPPT-MG modifiée par rapport à la diminution de l'éclairement de 1000W/m^2 à 850W/m^2 et pour une température de 25°C est étudiée par rapport aux valeurs du gain de réglage K_x (0.45 à 0.05). Les résultats de simulation sont donnés par la **Figure IV.12**:

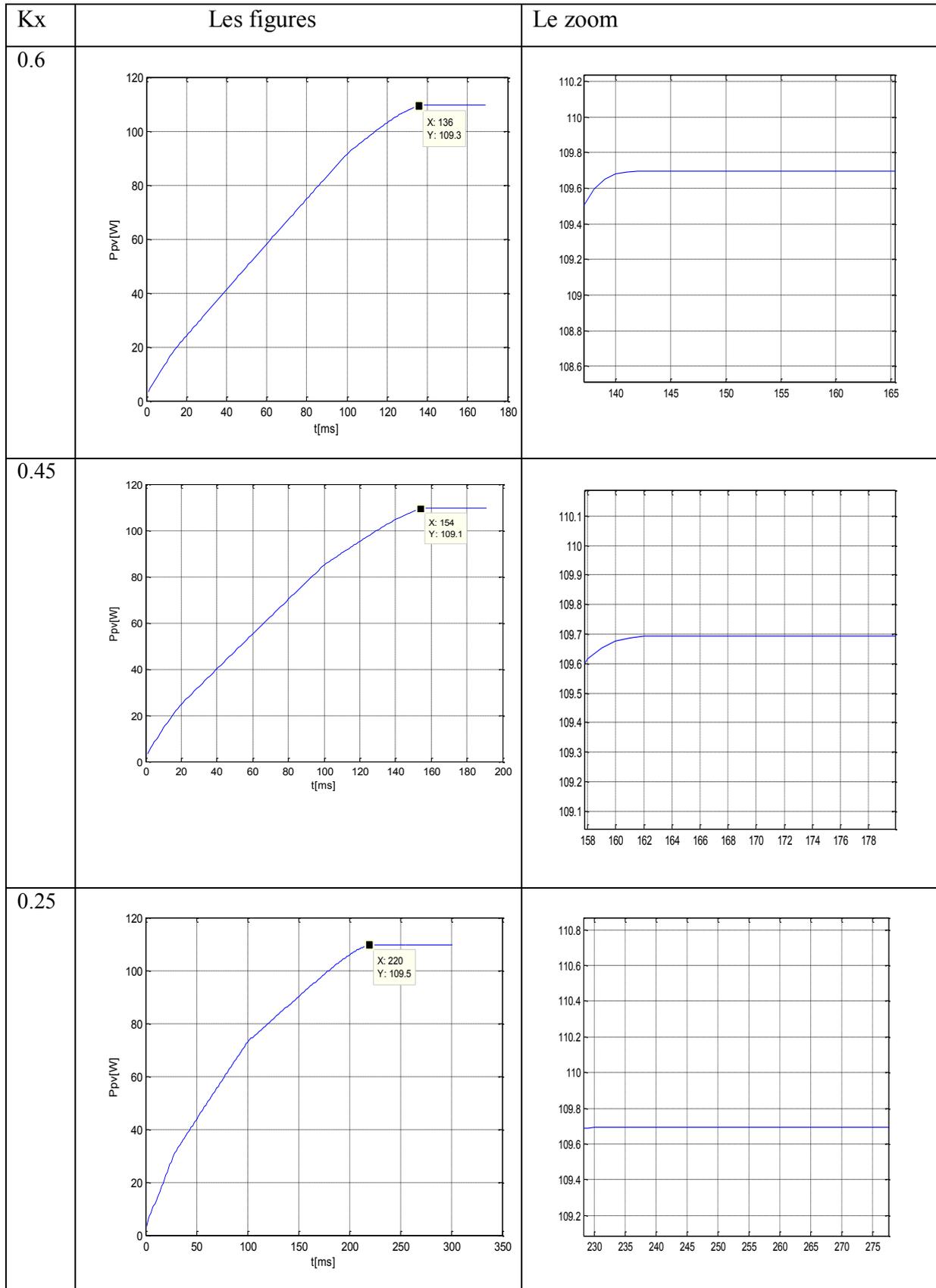


Figure IV.12. Influence du gain K_x (0.6 à 0.25), sur la robustesse de la MPPT-MG modifiée par rapport aux variations de E de (1000W/m^2 à 850W/m^2).

La commande MPPT-MG modifiée garde les mêmes performances (robustesse et fonctionnement au point de puissance maximale) que la MPPT-MG avec élimination des effets de réticences pour des valeurs du gain K_x élevées. Seulement, le fait d'utiliser une fonction « sat(.) » dans le terme U_N de la commande prolonge le régime transitoire si on diminue K_x . La MPPT-MG modifiée permet l'augmentation de l'amplitude du terme U_N de la commande qui déterminant pour la robustesse du contrôleur.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de deux commandes MPPT-MG et MPPT-MG modifiée, sur le système photovoltaïque.

La commande MPPT-MG assure un fonctionnement au point de puissance maximale même en présence des variations de la température et de l'éclairement. La composante discontinue « U_n », de la commande provoque des oscillations des signaux du système PV à cause de la présence des effets de réticence. Ce problème est remédié en diminuant l'amplitude de la composante discontinue avec le gain de réglage mais au détriment du temps de réponse.

Une solution alternative est de modifier la loi de commande avec la MPPT-MG modifiée. Le problème des réticences est réglé même pour des valeurs importantes du gain de réglage.

V- Conclusion Générale

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'éclairement et la température. Afin de maximiser les performances des systèmes d'énergies renouvelables, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale.

Dans ce travail, on a associée une commande MPPT qui est la commande par mode glissant au convertisseur statique (Buck-Boost) pour l'optimisation de la puissance produite des systèmes photovoltaïques.

Le premier chapitre a été un rappel sur les différentes sources d'énergies, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque et une description sur la chaîne de conversion photovoltaïque.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, et la simulation du générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode. Nous avons observé l'influence des paramètres météorologiques (variation de l'éclairement et la température) sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Dans le troisième chapitre, nous avons cité quelques types de commandes MPPT qui ont comme but la recherche du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Parmi ces dernières notre choix est basé sur la commande par mode glissant (CMG), ou nous avons utilisé deux variantes.

La validation des lois par simulation des performances de la MPPT-MG ainsi que la robustesse de varier les paramètres météorologiques est présenté au dernier chapitre.

La poursuite du point de puissance maximale par la commande MPPT-MG est complexe à élaborer du point de vue algorithmique par rapport aux autres types de commandes, néanmoins elle apporte une amélioration du régime établi du système photovoltaïque commandé en éliminant ces oscillations, vu sa robustesse, elle suit rapidement le point de puissance maximale malgré la variation des paramètres atmosphériques.

Références bibliographiques

- [1] Y. A.ould Mohamed, Aould Mahmoud et I. Youm, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », revue des énergies renouvelables vol.11 N°3 (2008).
- [2] M. Arrof, « optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe »branché sur un générateur photovoltaïque thèse Doctorat, université de Constantine 2007.
- [3] Encarta 2005.
- [4] B. Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque Ellipses 1993.
- [5] S. M. Ait-Cheikh, « étude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux .systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d'état, École Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [6] T. P. Nguyen. «Solar panel maximum power point tracker», Undergraduate Thesis, University of Queensland, 19 October 2001.
- [7] H. Knopf. «Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle». Master of Sciences Portland University, 1999
- [8] B .Bendib « techniques conventionnelle et avancée de poursuite MPPT pour des Applications photovoltaïques, Etude comparative » thèse de Magister, université de Sétif 2007.
- [9] M. Madani, « Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaire à couches minces », thèse de magister en physique, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen.
- [10] H. Benis, « Contribution a la modélisation du problème de “Hot Spot“ dans les modules solaire photovoltaïques occultés », thèse magistères, université Constantine 2008.

Références bibliographiques

- [11] M.S. Imamura and J.I. Portscher, Year Evaluation of the Methods of Determining Solar Cell Series Resistance, Proc. 8^{HT} Photovoltaic Specialists' Conf., Seattle, WA, pp 102-107, 1970.
- [12] Fillipov, A.F « Differential equations with discontinuous right-hand side », Amer. Math. Soc trans .62: 199-231, (1960).
- [13] M. Faizal Bin Mohamed Thah, « Grid-Connected Photovoltaic System side ». Degree in Bachelor of Engineering (Honors), University of Queensland, 21st May 2003.
- [14] D. Rekioua, «Etude d'une central photovoltaïque-éolien-diesel», Revue des Energies Renouvelables vol.11 N°4(2008)623-633, "article", université de Bejaïa.
- [15] R. BAUSIERE, F. LABRIQUE, G. SEGUIER : « les convertisseurs de l'électronique de puissance», la conversion continu-continu, volume 3 : pp 109-135,1987.
- [16] H. Amimeur, « contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoiles par mode de glissement », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [17] E. Michel, A. Deves « Energie photovoltaïque : application au traitement de l'eau potable et eaux usées en zones rurales » .Edition COSTIC ,2003.
- [18] « Le pompage d'eau avec l'énergie solaire » ATLANTS SOLAR.
http://www.atlants.net/aaa_cats_solar_fra/avantatges_pompage_eau_atlants.pdf 2010.
- [19] I. Batarseh, T. Kasparis, K. Rustom, W. Qiu, N. Pongratananukul, and W.Wu, «DSP-based multiple peak power tracking for expandable power system» . In Proc. 18th Annu. IEEE Applied Power Electronics Conf. Expo, vol. 1, Feb. 2003, 525–530.
- [20] F. Nicola, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. « Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ». IEEE transactions on power electronics, vol. 20, no. 4, pp.963-973, July 2005.
- [21] U. Itkis« Control systems of variable structure», J. Wiley, New York. , (1976).
- [22] Utkin, V.I, Sliding modes in control and optimization.Springer.Berlin (1992).

Références bibliographiques

- [23] Buhler, H. Réglage par mode de glissement. Presses Polytechniques Romandes (1986).
- [24] Dj REKIOUA, « cours sur les énergie renouvelables 2011 », professeur à l'université de Bejaia.
- [25] M.I .Artega Orozco, J.R. Vazquez, P. Salameron, A. Pérez, “a sliding Maximum power point Traker for a photovoltaic system”, article, E.P.S., Huelva University, Spain.

Caractéristiques des panneaux photovoltaïques 110Wc

- Dimension extérieur (mm) : 1316×660 mm.
- Epaisseur (mm) : 40 mm.
- Poids (Kg) : 11.5 Kg.
- Puissance maximale du panneau $P_m = 110$ W.
- Courant au point de puissance maximale $I_m = 3.15$ A.
- Tension au point de puissance maximale $V_m = 35$ V.
- Courant de court-circuit $I_{sc} = 3.45$ A.
- Tension en circuit ouvert $V_{oc} = 43.5$ V.
- Coefficient d'incrément de température $\alpha_{sc} = 1.4$ mA/°C.
- Coefficient d'incrément de température $B_{oc} = -152$ mV/°C.

Résumé :

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules...mais aussi et surtout par la charge. Aussi afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée.

Dans ce travail on a présenté une méthode de poursuite du point de puissance maximale utilisant le mode glissant, afin d'améliorer les performances de conversion de l'énergie photovoltaïque.

Mots clés : Convertisseur DC-DC, MPPT, Photovoltaïque, Poursuite, mode glissant, systèmes.