

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



Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme Master en Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème :

Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques

Réalisé par :

- BOUCHAMA Messaoud
- LAOUAR Mohammed Islam

Encadré par :
Dr. HALIMI Meriem

Année Universitaire 2017/2018

Remerciements

Avant tout, nous adressons nos remerciements à Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Dr. HALIMI Meriem qui a proposé et dirigé ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département Automatique de l'université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel pour les facilités qu'ils nous ont accordés pour terminer ce travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire, en particulier les enseignants du département d'Automatique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager, que Dieu me les garde.

Mes très chers sœurs : Ibtissam. Mereim

Mes très chers frères : Mohammed Amin, Sami, Chamseddine ,Yakoub et Aymene.

Tous les membres de ma grande famille.

Mes collègues des études.

Et à tous mes amis.

BOUCHAMA Messaoud

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance à ma famille

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien,
tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années
de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

Ma sœur Rima

Mes frères Youcef et Alaa

À toute ma famille

Tous les membres de ma grande famille

Tous ceux que j'aime

LAOUAR Mohammed Islam

Liste des symboles

c : Vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

$e(x)$: erreur entre la variable x et la valeur désirée x_{ref} : $e(x) = x_{ref} - x$

E : Énergie [J].

E_g : Énergie de gap.

f_c : fréquence de commutation (des impulsions) [Hz].

G : Éclairement [W / m^2].

G_{ref} : Valeur nominale de l'ensoleillement ($G_{ref} = 1000 \text{ W} / m^2$).

h : Constante de Plank ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

I_{cc} : Courant de de la cellule court-circuit [A].

$I_{cc,ref}$: Courant de court-circuit aux conditions de référence [A].

I_d : Courant qui traverse la diode [A].

I_e : Courant fourni par la cellule (ou GPV), en même temps c'est le courant d'entrée du convertisseur DC/DC [A].

I_L : Courant traversant l'inductance L dans le convertisseur DC/DC [A].

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

I_{ppm} : Courant au point de puissance maximale [A].

I_{Rp} : Courant dérivé par la résistance parallèle [A].

I_s : Courant de sortie du convertisseur DC/DC [A].

I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température [A].

I_{sat1} : Courant de saturation inverse de la diode D1 [A].

I_{sat2} : Courant de saturation inverse de la diode D2 [A].

$I_{sat,ref}$: Courant de saturation de la diode aux conditions de référence [A].

K : Constante de Boltzmann $K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

k_i : Coefficient de température du courant de court-circuit, donné par la fiche technique du constructeur [$mA/^\circ C$].

k_v : Coefficient de température du courant de court-circuit, donné par la fiche technique du constructeur [$mV/^\circ C$].

-
- n : Facture de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- n_1 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode 1 .
- n_2 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode 2 .
- N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.
- N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle
- P_e : Puissance de la cellule photovoltaïque (ou GPV).
- P_{max} : Puissance maximale produite PV (W).
- P_s : Puissance de sortie du convertisseur DC/DC (de la charge R).
- q : Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-9}c$.
- R : Charge résistive [Ω]
- R_p : Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction [Ω].
- R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions [Ω].
- S : Surface de glissement.
- Sat**() : Fonction saturation
- Sign**() : Fonction signe
- T : Température effective de la cellule en kelvin [K].
- T_{ref} : Température de référence de la cellule en Kelvin ($T_{ref} = 298^\circ K$)
- T_c : Période des impulsions [s].
- t_{off} : Temps de fermeture du transistor MOSFET [s].
- t_{on} : Temps d'ouverture du transistor MOSFET [s].
- u : Loi de commande
- u_{eq} : Loi de commande équivalente
- u_n : Loi de commande discontinue
- $V(x)$: Fonction de Lyapunov
- V_{co} : Tension de la cellule en circuit ouvert [V].
- $V_{co,ref}$: Tension du circuit ouvert aux conditions de référence, donné par la fiche technique du constructeur [V].
- V_e : Tension fourni par la cellule (ou GPV) [V].
- V_s : Tension de sortie du convertisseur DC/DC [V].
- V_{ppm} : Tension au point de puissance maximale [V].
- V_T : Tension thermique [V].

$V_{T,ref}$: Tension thermique aux conditions de références [V].

x : Vecteur d'état

α : Rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

λ : Longueur d'onde souvent exprimée en micromètre.

Liste des abréviations

AC : Courant Alternatif (Alternative Current)

AM : Air Mass

BF : Boucle Fermée

BO : Boucle Ouverte

DC : Courant Continu (Direct Current)

EVA : Ethylène Vinyle Acétate

GPV : Générateur Photovoltaïque

IncCond : Conductance incrémentale (Incremental Conductance)

MC : Mode de Convergence

MCC : Mode de Conduction Continue

MG : Mode de Glissement

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

PF : Point de Fonctionnement

PPM : Point de Puissance Maximale

PV : Panneau Photovoltaïque

PWM : Modulation de largeur d'impulsions (Pulse With Modulation)

P&O : Perturber et Observer.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 – Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	05
Figure I.2 – Structure d'une cellule photovoltaïque.....	07
Figure I.3 – Cellule, module et panneau photovoltaïque	08
Figure I.4 – Structure externe d'un module photovoltaïque	08
Figure I.5 – Types des cellules photovoltaïque.....	10
Figure I.6 – Éléments principaux d'un système photovoltaïque.....	12
Figure I. 7 – Chaîne photovoltaïque autonome	13

Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïques

Figure II.1 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode ...	14
Figure II.2 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes	16
Figure II.3 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode....	17
Figure II.4 – Modèle électrique équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode	18
Figure II.5 – Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque	18
Figure II.6 – Caractéristique Courant-Tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque	19
Figure II.7 – Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque	19
Figure II.8 – Configuration de connexion des cellules photovoltaïques	24
Figure II.9 – Association de N_s cellules en série	24
Figure II.10 – Association de N_p cellules en parallèle	25
Figure II.11 – Association série-parallèle des cellules	25

Figure II.12 – Caractéristique $I - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs de températures.	27
Figure II.13 – Caractéristique $P - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs de températures.	27
Figure II.14 – Caractéristique $I - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs d'éclairement.	28
Figure II.15 – Caractéristique $P - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs d'éclairement.	29
Figure II.16 – Variation de l'irradiation G en fonction du temps	30
Figure II.17 – Puissance du générateur photovoltaïque connecté directement à une charge	30

Chapitre III : Commande MPPT des systèmes photovoltaïques

Figure III.1 – Forme d'impulsion générée par le circuit PWM.....	33
Figure III.2 – Représentation schématique d'un convertisseur Buck.....	34
Figure III.3 – Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé	34
Figure III.4 – Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.	35
Figure III.5 – Représentation schématique d'un convertisseur Boost.....	37
Figure III.6 - Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.	37
Figure III.7 – Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert.....	38
Figure III.8 – Représentation schématique d'un convertisseur Buck-Boost	39
Figure III.9 – Schéma électrique d'un hacheur Buck-Boost fermé.....	40
Figure III.10 – Schéma électrique d'un hacheur Buck-Boost ouvert.....	41
Figure III.11 – Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT....	42
Figure III.12 – Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.	43
Figure III.13 – Organigramme de l'algorithme P&O.	44
Figure III.14 – Principe de fonctionnement de l'algorithme IncCond.	45
Figure III.15 – Organigramme de l'algorithme IncCond.	46
Figure III.16 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$ en BO....	47

Figure III.17 – Évolution de la puissance d'entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$ en BO	47
Figure III.18 – Évolution des courants d'entrée $I_e(t)$, de sortie $I_s(t)$ et d'inductance $I_L(t)$ en BO	48
Figure III.19 – Évolution de la dérivée de la puissance par rapport à la tension dP_e/dV_e en BO	48
Figure III.20 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$ en BF	49
Figure III.21 – Évolution de la puissance d'entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$ en BF	50
Figure III.22 – Évolution du rapport cyclique α en BF	50
Figure III.23 – Évolution des courants d'entrée $I_e(t)$ et de sortie $I_s(t)$ en BF	51

Chapitre IV : Commande MPPT par mode glissant des systèmes photovoltaïques

Figure IV.1 – Principe de la commande par mode glissant	54
Figure IV.2 – Commande équivalente	56
Figure IV.3 – Représentation de la fonction " Signe "	58
Figure IV.4 – Fonction saturation	59
Figure IV.5 – Fonction Smooth	59
Figure VI.6 – Caractéristique $P - V$ typique	63
Figure IV.7 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$	64
Figure IV.8 – Évolution du courant du GPV $I_e(t)$ et du courant de sortie $I_s(t)$	64
Figure IV.9 – Évolution de la puissance d'entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$	65
Figure IV.10 – Évolution de la commande $\alpha = u$	65

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau I.1 – Potentiel solaire en Algérie.....06

Tableau I.2 – Performances des différentes filières silicium.....10

Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïques

Tableau II.1 – Spécification du module photovoltaïque BP SX 120.....26

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction.....	03
I.2 Historique.....	03
I.3 Rayonnement solaire.....	04
I.4 Potentiel solaire en Algérie.....	05
I.5 Effet photovoltaïque	06
I.6 Cellule photovoltaïque.....	06
I.6.1 Description générale.....	06
I.6.2 Principe de fonctionnement.....	07
I.7 Système de captage photovoltaïque.....	07
I.7.1 Modules photovoltaïques.....	08
I.7.2 Générateur photovoltaïque (GPV).....	09
I.8 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques.....	09
I.8.1 Cellules de type monocristallines.....	09
I.8.2 Cellules de type poly-cristallines.....	09
I.8.3 Cellules de type silicium amorphe.....	10
I.9 Secteurs d'application.....	10
I.10 Avantages et inconvénients du photovoltaïque	11
I.11 Composantes d'une installation photovoltaïques.....	11
I.12 Conclusion	13

Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïques

II.1 Introduction.....	14
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	14
II.2.1 Modèle électrique idéal à une diode.....	14
II.2.2 Modèle électrique réel à deux diodes.....	15
II.2.3 Modèle électrique réel à une diode.....	17
II.2.4 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	18
II.2.5 Calcul des paramètres du modèle.....	20
II.2.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}	21
II.2.5.2 Photo-courant I_{ph}	21
II.2.5.3 Tension de circuit-ouvert V_{co}	22
II.2.5.4 Courant de saturation de la diode I_{sat}	22
II.2.5.5 Résistance série R_s	23

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	23
II.3.1 Association de N_s cellules en série.....	24
II.3.2 Association de N_p cellules en parallèle.....	25
II.3.3 Association série-parallèle des cellules	25
II.4 Simulation du générateur photovoltaïque (Module solaire BP-Solar SX 120).....	26
II.4.1 Description du module	26
II.4.2 Caractéristiques électriques et mécaniques du module.....	26
II.4.3 Simulation du module photovoltaïque BP SX 120.....	27
II.4.4 Simulation du module BP SX 120 connecté directement à une charge	30
II.5 Conclusion.....	31

Chapitre III : Commande MPPT des systèmes photovoltaïques

III.1 Introduction.....	32
III.2 Convertisseurs continu – continu (DC/DC)	32
III.2.1 Convertisseur abaisseur de tension Buck	34
III.2.1.1 Séquences de fonctionnement	34
III.2.1.2 Modèle moyen.....	36
III.2.1.3 Rapport cyclique	36
III.2.2 Convertisseur élévateur de tension Boost	36
III.2.2.1 Séquences de fonctionnement	37
III.2.2.2 Modèle moyen.....	39
III.2.2.3 Rapport cyclique	39
III.2.3 Convertisseur Buck-Boost.....	39
III.2.3.1 Séquences de fonctionnement	40
III.2.3.2 Modèle moyen.....	41
III.2.3.3 Rapport cyclique	41
III.3 Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT)	42
III.3.1 Principe de la commande MPPT	42
III.3.2 Commande « Perturbation et Observation » (P&O)	43
III.3.2.1 Principe de la méthode P&O	43
III.3.2.2 Algorithme de la méthode P&O.....	43
III.3.3 Commande « Incrément des conductances » (IncCond).....	44
III.3.3.1 Principe de la méthode IncCond	44
III.3.3.2 Algorithme de la méthode IncCond	46
III.4 Simulation du système photovoltaïque	46
III.4.1 Système photovoltaïque en boucle ouverte.....	47
III.4.2 Système photovoltaïque en boucle fermée avec P&O et IncCond.....	49

III.4.3 Discussion des résultats.....	51
III.5 Conclusion.....	52

Chapitre IV : Commande MPPT par mode glissant des systèmes photovoltaïques

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Systèmes à structures variables.....	53
IV.3 Théorie des modes glissants.....	53
IV.4 Principe de la commande par mode glissant.....	54
IV.5 Conception de la commande par mode de glissement.....	55
IV.5.1 Choix de la surface de glissement.....	55
IV.5.2 Condition d'existence du glissement.....	56
IV.5.3 Calcul de la loi de commande : Méthode de la commande équivalente.....	56
IV.5.3.1 Commande équivalente u_{eq}	57
IV.5.3.2 Commande discontinue u_n	57
IV.6 Phénomène de broutement.....	58
IV.7 Réduction du phénomène de broutement.....	59
IV.7.1 Fonction saturation.....	59
IV.7.2 Fonction smooth.....	59
IV.8 Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque.....	60
IV.8.1 Choix de la surface de glissement.....	60
IV.8.2 Détermination de la commande équivalente.....	61
IV.8.3 Détermination de la commande discontinue.....	62
IV.8.4 Détermination de la loi de commande.....	62
IV.8.5 Vérification de l'existence du mode glissant.....	62
IV.9 Résultats de simulation.....	63
IV.10 Discussion des résultats.....	65
IV.11 Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67

Introduction Générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées. Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, elles ont toutes l'immense avantage d'être d'origine naturelle, inépuisable, non polluante et très adaptées à la production décentralisée. Leur exploitation permettrait de fournir l'électricité aux sites isolés, situés loin des réseaux électriques, et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui nécessitent un lourd investissement [Diaf, 2009].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [Ait-cheikh, 2007].

Le générateur PV ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température, ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du générateur PV peut donc varier entre les points extrêmes correspondants au courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. La détermination du point de fonctionnement du générateur PV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. La puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné.

Pour une gestion optimale de l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque, les techniques d'optimisations, de régulation et de contrôle permettent

d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur photovoltaïque, et ce, quelles que soient les variations de l'éclairement et de la température.

Les techniques MPPT (maximum power point tracking) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. C'est pourquoi nous allons présenter dans ce mémoire, d'abord deux méthodes conventionnelles (P&O, IncCond) puis l'application de la commande MPPT par mode glissant.

Afin de mieux présenter notre travail, ce mémoire sera organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons quelques généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de différents modèles électriques des cellules et modules photovoltaïques (générateur photovoltaïque). Nous illustrons à travers des simulations l'influence des facteurs météorologiques (température et éclairement) sur les caractéristiques courant-tension ($I - V$) et puissance-tension ($P - V$) de notre générateur photovoltaïque.
- Nous introduisons dans le troisième chapitre la modélisation des convertisseurs DC/DC ainsi que le principe de la commande MPPT afin de l'appliquer dans notre système photovoltaïque. Les résultats d'optimisation de la puissance du générateur photovoltaïque par les deux méthodes P&O et IncCond obtenus par simulation en utilisant Matlab Simulink seront présentés.
- Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'application de la commande MPPT par mode glissant sur le système photovoltaïque. L'efficacité de cette commande sera illustrée à travers des simulations.

I.1 Introduction

Aujourd'hui, les besoins en énergie électrique de l'humanité sont toujours en progression. Pour y faire face, l'évolution de la capacité de production d'électricité doit suivre cette croissance. La production d'électricité mondiale à partir de combustibles fossiles est la plus courante, elle représente environ deux tiers de l'électricité mondiale ; sur le plan régional, d'autres sources d'énergie peuvent fournir la majorité de l'électricité. La production d'électricité renouvelable fait partie intégrante du système de production d'électricité mondiale [Diaf, 2009].

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.

Un système photovoltaïque comporte un ensemble d'organes distincts ou de sous-systèmes en relation entre eux, représentent un processus énergétique complexe. L'élément de base est le système de captation puis l'ensemble de conditionnement de l'énergie électrique produite aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble groupe tous les équipements entre le système de conversion d'énergie solaire (champ photovoltaïque) et la charge finale. La gamme de puissance admise pour les systèmes photovoltaïques ne possède théoriquement pas de borne. Elle s'étend donc de systèmes comportant une installation de modules photovoltaïque de quelque dizaine de watts à des systèmes de puissances plus importantes de plusieurs kilowatts à des mégawatts. Les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, requièrent peu d'entretien, silencieux, ne produisent aucune émission de polluants et ce sont des systèmes modulaires [Bencherif, 2014].

I.2 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 45 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du

monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [Bendjellouli, 2009].

Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont mentionnées ci-dessous [Dang, 2009] :

- **1839** - Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** - Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** - Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. Ces chercheurs ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.
- **1958** - Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** - La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** - La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour « Air Mass ». Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350 W/m^2$ (Figure I.1). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de $1000 W/m^2$ au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1) [Abouda, 2015].

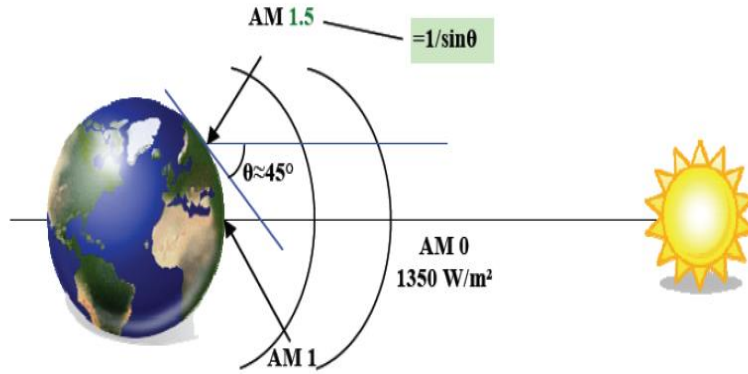


Figure I.1 – Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM

Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

- E : Énergie en J ;
- h : constante de Plank ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) ;
- c : vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- λ : longueur d'onde souvent exprimée en micromètre.

I.4 Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{Kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au sud du pays.

Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [Boukli-Hacen, 2011].

Tableau I.1 – Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne de l'ensoleillement (<i>Heure/An</i>)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (<i>KWh/m²/an</i>)	1700	1900	2650

I.5 Effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » signifie Lumière en Grec, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [Helali, 2012]. L'effet photovoltaïque fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

I.6 Cellule photovoltaïque

I.6.1 Description générale

Une cellule photovoltaïque ; appelée aussi la photopile ; est l'unité de base du système de conversion d'énergie solaire en électricité du type continue directement utilisable ou convertit en alternatif. Elle est basée sur le phénomène physique « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.6 V en fonction du matériau semi-conducteur utilisé ainsi que de sa température et du vieillissement de la cellule. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}) et elle fortement dépendante de la température. Le

courant maximal qui se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées est nommé courant de court-circuit (I_{cc}) et il est fortement dépendant du niveau d'éclairement (G) [Cabal, 2008] [Faranda et Leva, 2008].

I.6.2 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons ; provenant du spectre solaire ; sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN, Lorsque cette énergie supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite (l'énergie de la bande de gap) E_g du semi-conducteur, un couple électron-trou est créé. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités ce qui va créer une différence de potentiel aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé l'effet photovoltaïque. La figure I.2 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque.

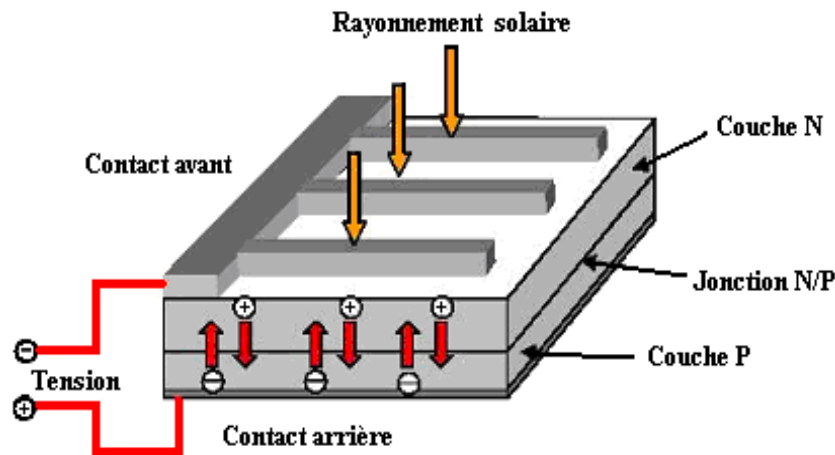


Figure I.2 – Structure d'une cellule photovoltaïque

I.7 Système de captage photovoltaïque

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur [Boukli-Hacene, 2011].

La figure ci-dessous, représente une cellule, un module et un panneau PV.

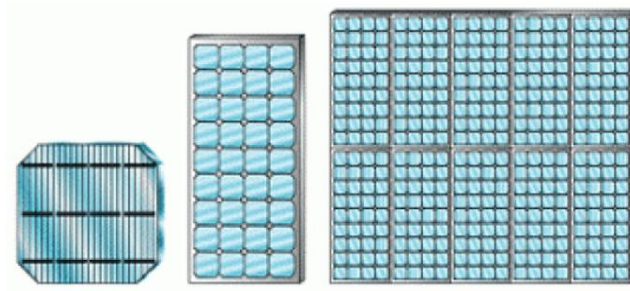


Figure I.3 – Cellule, module et panneau photovoltaïque

I.7.1 Modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est un assemblage de cellules élémentaires connectées les unes aux autres pour former des chaînes directement utilisables. Il assure une double fonction :

- La première fonction est l'association des cellules pour l'obtention d'une caractéristique courant-tension intéressante pour l'application. En effet, les modules peuvent être connectés soit en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant.
- La deuxième fonction est la protection contre des agents atmosphériques extérieurs afin d'augmenter leurs durées de vie. En effet, les chaînes de cellules sont encapsulées dans un plastique E.V.A. (Ethylène Vinyle Acétate) pour les protéger des agressions extérieures (rayons U.V., humidité). L'ensemble est protégé sur la surface avant par un verre trempé à haute transmission et ayant une bonne résistance mécanique, et sur la face arrière par une feuille de Tedlar ou de polyéthylène. Le module est placé dans un cadre métallique rigide qui va lui donner une grande rigidité mécanique.

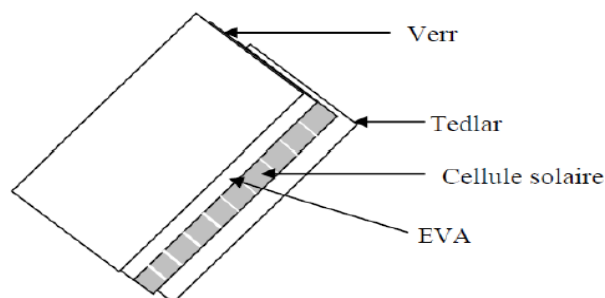


Figure I.4 – Structure externe d'un module photovoltaïque

I.7.2 Générateur photovoltaïque (GPV)

Le terme générateur photovoltaïque est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau photovoltaïque. Toutefois, il peut faire allusion au système photovoltaïque tout entier. Pour la suite de ce mémoire, on utilisera le terme générateur photovoltaïque pour désigner un module ou un panneau photovoltaïque.

I.8 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïque

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, les principales technologies industrialisées à ce jour sont [Madani, 2006] :

I.8.1 Cellules de type monocristallines

C'est la cellule qui s'approche le plus du modèle théorique. Cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les matériaux de base pour de telles cellules sont d'énormes cristaux de silicium spécialement produits à cet effet. Ces cellules sont caractérisées par :

- Un taux de rendement excellent. Le rendement théorique maximal pour des cellules au silicium est de 28%. Dans la pratique, les cellules monocristallines permettent d'obtenir un rendement, de l'ordre de 15 à 22%. Cette diminution est due au fait qu'une part du rayonnement solaire, celui situé dans le rouge et l'infrarouge, ne contient pas assez d'énergie pour provoquer un effet photovoltaïque ;
- Un prix élevé dû à la méthode de fabrication laborieuse et difficile ;
- Un investissement en énergie élevée vue qu'il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

I.8.2 Cellules de type poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines ressemblent aux cellules monocristallines, mais sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles ont les caractéristiques suivantes :

- Rendement moyen (de l'ordre de 10 à 15%) ;
- Coût de production moins élevé ;
- Procédé de fabrication nécessitant moins d'énergie.

I.8.3 Cellules de type silicium amorphe

Depuis 1975, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium à l'état amorphe. Cet intérêt est dû au fait que ce dernier présente des avantages majeurs parmi eux un fort coefficient d'absorption ce qui autorise de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron et une faible consommation énergétique durant le cycle de production. Les caractéristiques de ces cellules sont :

- Coût de production bien plus bas ;
- Rendement plus bas (de l'ordre de 6 à 7%) ;
- Durée de vie plus faible (dégradation sous lumière).



(a) Silicium monocristallin

(b) Silicium polycristallin

(c) Silicium amorphe

Figure I.5 – Types des cellules photovoltaïques

Le tableau I.2 montre les performances des différentes filières silicium présentes actuellement sur le marché [Pétion, 2009].

Tableau I.2 – Performances des différentes filières silicium

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
Monocristallin	12 à 16 %	-0.442% par °C	-0.38% par an
Poly-cristallin	11 à 14 %	-0.416% par °C	-0.35% par an
Amorphe	6 à 7 %	-0.175% par °C	-1.15% par an

I.9 Secteurs d'application

Les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes) remontent aux années soixante, après l'énergie photovoltaïque est adaptée à une large gamme d'applications vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la

maintenance légère et la longue durée de vie des équipements. Parmi les secteurs d'application des systèmes photovoltaïques on cite :

- Électrification rurale : éclairage, réfrigérateur, ... ;
- Télécommunication : relais T.V, relais radiotéléphone, ... ;
- Pompage d'eau ;
- Signalisation lumineuse routière et ferroviaire ;
- Détection et protection : commandes des vannes de sécurité, système d'alarme, ... ;
- Stations de mesures et d'acquisition de données : stations automatiques météorologiques, comptage de trafic....

I.10 Avantages et inconvénients du photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente plusieurs avantages tels que [Mekemeche, 2017] :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité,
- Peu d'entretien,
- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- Utilisation autonome et décentralisée.

Malgré ces avantages intéressants, il y a aussi des inconvénients tels que :

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces,
- Technologie coûteuse,
- Facteur de charge faible,
- Stockage difficile,
- Difficulté à recycler les composants du système.

I.11 Composantes d'une installation photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques peuvent être autonomes ou connectés aux réseaux publics, comme on peut rajouter aux GPV d'autres sources, par exemple éoliennes et/ou groupes électrogènes pour éviter le surdimensionnement des panneaux et des batteries. Dans ce cas, le système photovoltaïque devient un système hybride.

Un système photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques (Générateur photovoltaïque), de batteries, de régulateurs de charge, de convertisseurs de type DC/DC et de type DC/AC s'il s'agit d'alimenter des appareils fonctionnant en alternatif [Rezzouk, 2010].

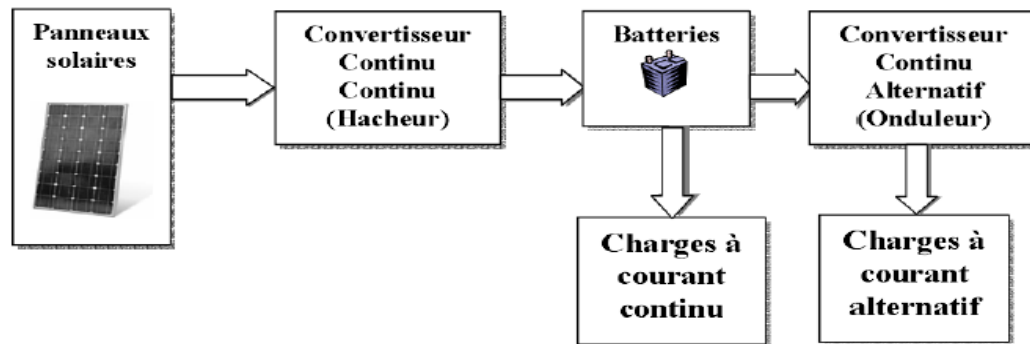


Figure I.6 – Principaux éléments d'un système photovoltaïque

D'après la figure I.6, les éléments ajoutés aux modules peuvent être classifiés dans les quatre catégories suivantes :

- **Contrôleur (convertisseur DC/DC)** : gère le stockage de l'énergie dans les accumulateurs et la distribution vers la charge. Il permet aussi de faire fonctionner l'installation au point de fonctionnement optimal qui correspond à la puissance maximale de l'installation ;
- **Batterie** : permet d'emmagasiner l'énergie produite par les modules photovoltaïques en vue d'être utilisée au moment du manque de l'éclairement (la nuit ou lors de jours couverts) ;
- **Onduleur** : permet de convertir le courant électrique continu produit par les modules photovoltaïques en un courant alternatif afin d'alimenter les charges alternatives.

Selon le type d'application, certaines infrastructures connexes d'un système photovoltaïque ne sont pas nécessaires. Par exemple :

- Un onduleur n'est pas utile s'il n'y a pas de charge en courant alternatif (CA).
- Les batteries ne sont pas nécessaires pour les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité comme le pompage de l'eau. Dans ce cas, le couplage direct où le GPV est directement connecté à la charge continue.

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, nous allons s'intéresser aux systèmes photovoltaïques autonomes donnés sur la figure suivante :



Figure I.7 – Chaîne photovoltaïque autonome

- Le générateur photovoltaïque que nous allons utiliser est le module BP SX 120 qui sera décrit et simulé dans le chapitre II ;
- La présentation et la modélisation des différents convertisseurs DC/DC qui existent dans la littérature fera l'objet du chapitre III. Nous nous intéresserons particulièrement au convertisseur abaisseur de tension Buck et à la commande MPPT (Maximum Power Point Tracker) qui permet de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.
- L'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque étudié sera expliquée et illustrée à travers des simulations dans le chapitre IV.

I.12 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la présentation des notions essentielles sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons d'abord expliqué le principe de fonctionnement ainsi que la technologie de fabrication de l'élément de base d'un système de captation qui est la cellule photovoltaïque. Nous avons ensuite cité les secteurs d'application de cette technologie. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire ont été ensuite donnés. Enfin nous avons terminé ce chapitre par une description des éléments du système photovoltaïque auquel on s'intéresse.

II.1 Introduction

Une cellule photovoltaïque est une source de puissance non linéaire. Le courant et la tension de sortie de ce composant dépendent à la fois de l'éclairement solaire G et de la température T . À cet effet, la prédiction des performances d'une cellule photovoltaïque nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions météorologiques (éclairement, température). De nombreux travaux portent sur le développement des modèles mathématiques pour la simulation de la caractéristique courant-tension ($I - V$) de la cellule photovoltaïque [Diaf, 2009] [Abouda, 2015].

Dans ce chapitre, nous allons récapituler quelques modèles des cellules photovoltaïques existantes dans la littérature. Ensuite, nous expliquerons les modifications apportées aux modèles des cellules afin de décrire la relation courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Généralement, la simulation du comportement des modules photovoltaïque est basée sur leur caractéristique $I - V$. Pour cet objectif, plusieurs études ont été présentées utilisant différents modèles mathématiques. Cette section présente trois principaux modèles : modèle idéal, le modèle réel à deux diodes et le modèle réel à une diode que nous allons utiliser.

II.2.1 Modèle électrique idéal à une diode

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, une cellule photovoltaïque est une diode de grandes dimensions, son illumination provoque la génération d'un photo-courant I_{ph} . En effet, une partie de ce courant est dissipée dans la jonction, ce qui conduit au modèle simplifié de la cellule photovoltaïque qui est équivalente à une source de courant shuntée avec une diode (Figure II.1).

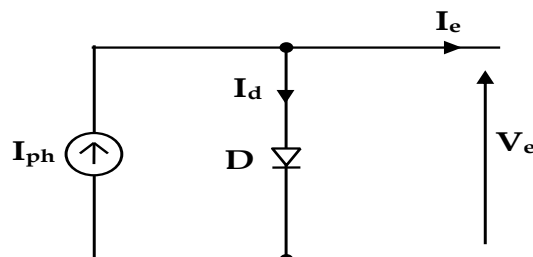


Figure II.1 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode

Le courant de sortie I_e est obtenu à partir du circuit équivalent :

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

Avec :

$$I_d = I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_e}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.3})$$

Où :

- I_e : Courant fourni par la cellule ;
- I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation ;
- I_d : Courant qui traverse la diode ;
- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température ;
- V_e : Tension aux bornes de la cellule ;
- n : Facteur de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique ;
- V_T : Tension thermique ;
- K : Constante de Boltzmann $K = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K ;
- T : Température effective de la cellule en kelvin ;
- q : Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-9}$ C.

II.2.2 Modèle électrique réel à deux diodes

La représentation précédente de la cellule photovoltaïque est idéale, ce qui n'est pas le cas en réalité. Afin de prendre en compte les différents phénomènes physiques présents au niveau de la cellule photovoltaïque, le modèle électrique précédent est complété par deux résistances série (R_s) et parallèle (R_p) comme le montre la figure II.2. En effet, le modèle réel à deux diodes est constitué de deux diodes parallèles $D1$ et $D2$ ayant les courants de saturation respectifs I_{sat1} et I_{sat2} et les facteurs de diode respectifs n_1 et n_2 , d'une source de courant produisant le courant I_{ph} qui dépend de l'éclairement solaire G . Une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques du matériau et des contacts (résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal). La valeur de R_s peut être déterminée par l'inverse de la pente

de la caractéristique $I - V$ pour la tension à circuit ouvert V_{co} . Enfin, une résistance parallèle R_p qui présente l'admittance parallèle du générateur de courant (la présence d'un courant de fuite dans la jonction).

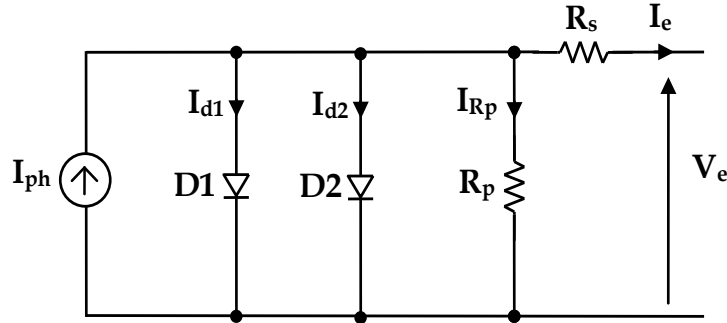


Figure II.2 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes

En se basant sur le circuit de la figure II.2, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante [Helali, 2012] :

$$I_e = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{R_p} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$$I_{d1} = I_{sat1} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II. 5})$$

$$I_{d2} = I_{sat2} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II. 6})$$

$$I_{R_p} = \frac{V_e + R_s I_e}{R_p} \quad (\text{II. 7})$$

Et la tension thermique V_T est donnée par l'équation (II.3).

Où :

- I_{sat1} : Courant de saturation inverse de la diode $D1$;
- I_{sat2} : Courant de saturation inverse de la diode $D2$;
- n_1 : Facteur de non idéalité de la jonction de la diode $D1$;
- n_2 : Facteur de non idéalité de la jonction de la diode $D2$;
- I_{R_p} : Courant dérivé par la résistance parallèle ;

- R_p : Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction ;
- R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

Ainsi, le courant fourni par une cellule est donné par la relation suivante :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat1} \left(\exp \left(\frac{q(V_e + I_e R_s)}{n_1 K T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left(\exp \left(\frac{q(V_e + I_e R_s)}{n_2 K T} \right) - 1 \right) - \frac{V_e + I_e R_s}{R_p} \quad (\text{II. 8})$$

II.2.3 Modèle électrique réel à une diode

La cellule photovoltaïque est aussi représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode en moins par rapport au modèle à deux diodes comme le montre la Figure II.3.

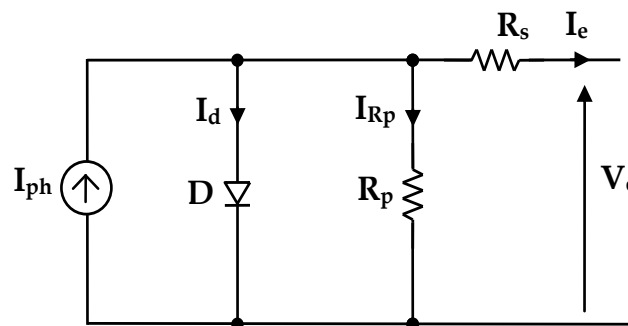


Figure II.3 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

En se basant sur le circuit de la figure II.3, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante [Cabal, 2008] :

$$I_e = I_{ph} - I_d - I_{R_p} \quad (\text{II. 9})$$

Ainsi, et à partir des équations données précédemment, le courant fourni par une cellule est donné par la relation suivante :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_e + I_e R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_e + I_e R_s}{R_p} \quad (\text{II. 10})$$

La résistance parallèle R_p est très grande par rapport à la résistance série R_s , son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger, ce qui nous permet d'aboutir à un modèle simplifié qui est largement utilisé. La figure II.4 illustre ce modèle simplifié de la cellule photovoltaïque [Francisco, 2005], [Walker, 2000], [Helali, 2012].

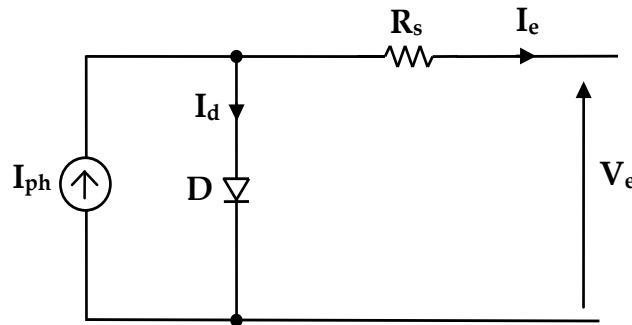


Figure II.4 – Modèle électrique équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

Par conséquent, l'équation (II.10) devient :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_e + I_e R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II. 11})$$

II.2.4 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les figures II.5, II.6 et II.7 illustrent les caractéristiques non linéaires d'une cellule photovoltaïque à base de silicium pour un éclairage et une température donnée.

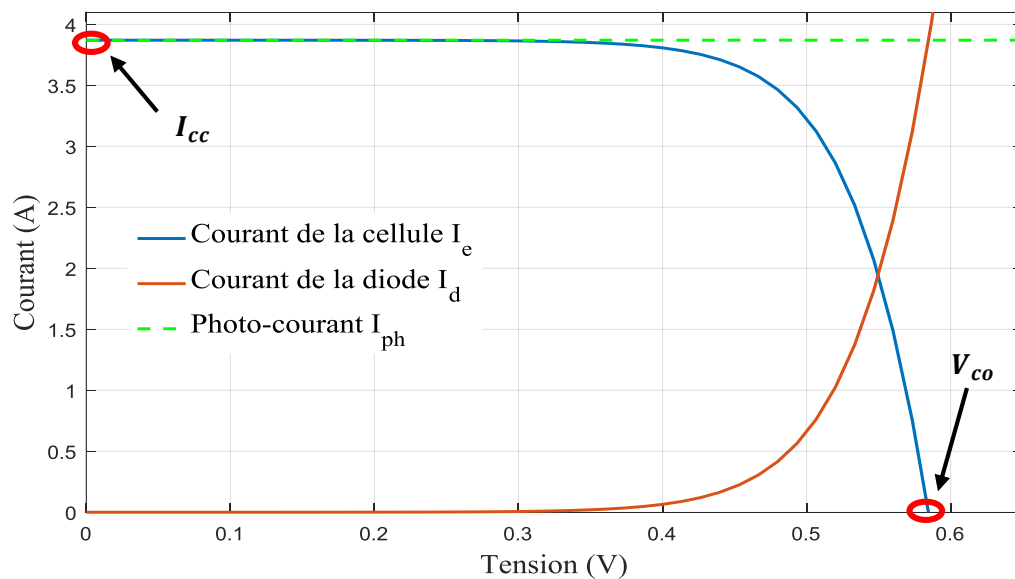


Figure II.5 – Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

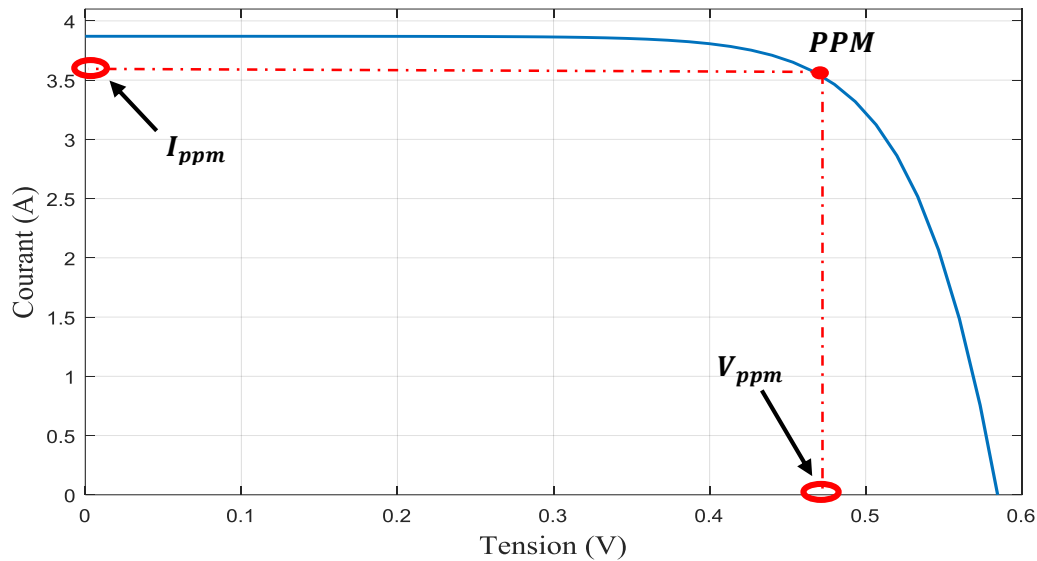


Figure II.6 – Caractéristique Courant-Tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque

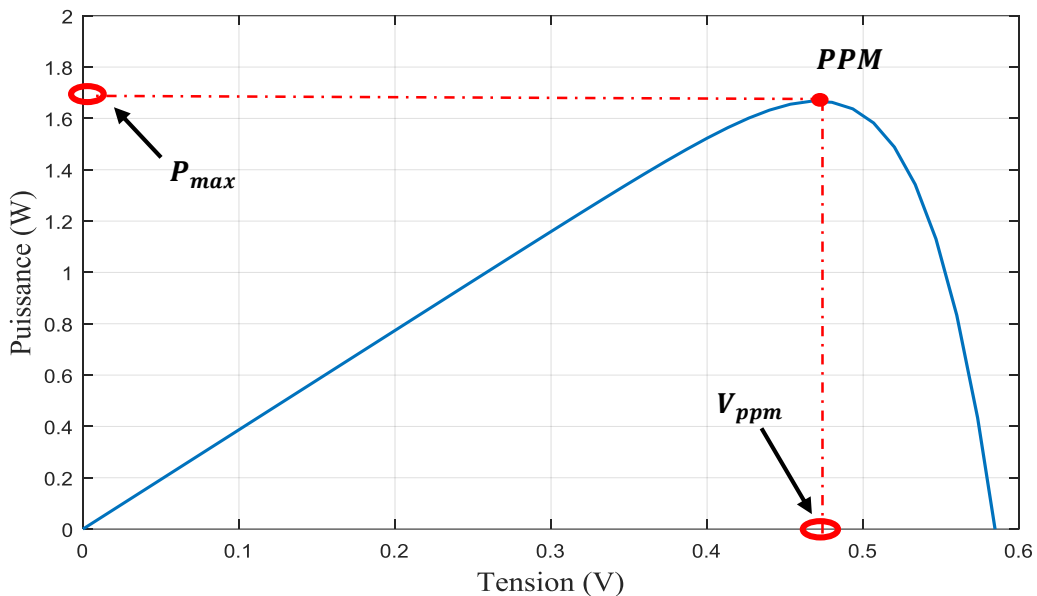


Figure II.7 – Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque

La puissance de la cellule photovoltaïque est calculée par la relation suivante :

$$P_e = V_e I_e \quad (\text{II.12})$$

D'après les courbes caractéristiques précédente, on remarque que la cellule photovoltaïque présente une caractéristique $I - V$ non linéaire allant du point de fonctionnement extrême correspondant au courant de court-circuit I_{cc} vers un autre point extrême correspondant à la tension en circuit ouvert V_{co} tout en passant par le point de fonctionnement souhaité (optimal) qui est le Point de Puissance Maximale (PPM) [Belkaid, 2015].

Trois modes de fonctionnement de la cellule photovoltaïque peuvent être distingués en regardant sa caractéristique $I - V$:

- **Si sa tension est inférieure à 0,4 V** : elle se comporte comme générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation G . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles ;
- **Si son courant est moins de 3 A** : elle se comporte comme générateur de tension V_{co} proportionnel à la température T . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées ;
- **Entre ces deux limites** : elle fonctionne dans son point de fonctionnement optimal PPM. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées permettant ainsi d'exploiter au mieux le gisement solaire.

II.2.5 Calcul des paramètres du modèle

Les fiches techniques photovoltaïques présentent des données expérimentales sur les caractéristiques électriques et thermiques du dispositif photovoltaïque fonctionnant dans des conditions de référence qui correspondent à l'irradiation $G = G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ et la température $T = T_{ref} = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$.

Ces fiches contiennent principalement les données suivantes: le courant de court-circuit $I_{cc,ref}$, la tension de circuit ouvert $V_{co,ref}$, la tension correspondante au point de la puissance maximale $V_{ppm,ref}$, le courant correspondant au point de la puissance maximale $I_{ppm,ref}$, les coefficients de la variation de la tension du circuit ouvert et du courant de court-circuit en fonction de la température définis respectivement par k_v et k_i et les caractéristiques $I - V$ des dispositifs photovoltaïques sous différentes valeurs de température et d'irradiation.

Cependant, certains paramètres ne peuvent pas être trouvés dans la fiche technique du fabricant, comme le photo-courant, le courant de saturation de la diode, le facteur d'idéalité et les résistances série et parallèle. De plus, il est important de noter que, pour différentes conditions météorologiques, il est irréaliste de supposer que les paramètres du modèle sont des constantes. Généralement, les paramètres de la cellule sont affectés par la température T et l'irradiation G .

Dans ce qui suit, nous donnerons les paramètres importants du modèle photovoltaïque et de leur variation avec les conditions météorologiques (T et G) [Diaf, 2009] [Abdelmoula,2017].

II.2.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}

L'expression du courant de court-circuit la plus répandue dépend de la température et de l'irradiation solaire. Elle est donnée pour une température quelconque T et une irradiation solaire quelconque G comme suit :

$$I_{cc} = I_{cc,ref}(1 + k_i(T - T_{ref})) \quad (\text{II. 13})$$

Où :

- $I_{cc,ref}$: courant de court-circuit aux conditions de référence ;
- T_{ref} : température de référence de la cellule en Kelvin ($T_{ref} = 298^\circ K$)
- k_i : coefficient de température du courant de court-circuit, donné par la fiche technique du constructeur.

II.2.5.2 Photo-courant I_{ph}

L'expression du photo-courant est donnée comme suit :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc} \quad (\text{II. 14})$$

Où :

- G_{ref} : valeur nominale de l'ensoleillement ($G_{ref} = 1000 \text{ W /m}^2$).

Le fait que la résistance série R_s est très petite comparée à la résistance parallèle R_p , le courant de court-circuit peut être plus proche du courant généré par la lumière et par conséquent on peut admettre l'égalité de ces deux courants dans les conditions de référence. Ainsi, on peut écrire :

$$I_{cc,ref} = I_{ph,ref} \quad (\text{II. 15})$$

Où $I_{cc,ref}$ est le courant de court-circuit aux conditions de référence, donné par la fiche technique du constructeur.

II.2.5.3 Tension de circuit-ouvert V_{co}

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque). La tension du circuit ouvert en fonction de la température est donnée par :

$$V_{co} = V_{co,ref} + k_v(T - T_{ref}) - R_s(I_{cc} - I_{cc,ref}) \quad (\text{II. 16})$$

Où :

- $V_{co,ref}$: la tension du circuit ouvert aux conditions de référence, donné par la fiche technique du constructeur ;
- k_v : coefficient de température du courant de court-circuit, donné par la fiche technique du constructeur.

II.2.5.4 Courant de saturation de la diode I_{sat}

Le courant de saturation de la diode I_{sat} dépend de la valeur de la température. Pour la température de référence T_{ref} , nous avons :

$$I_{sat,ref} = \frac{I_{cc,ref}}{\exp\left(\frac{V_{co,ref}}{n V_{T,ref}}\right) - 1} \quad (\text{II. 17})$$

Où V_{co} est la tension de circuit ouvert et $V_{T,ref}$ est la tension thermique à la température de référence, donnée par :

$$V_{T,ref} = \frac{KT_{ref}}{q} \quad (\text{II. 18})$$

Pour une température quelconque T , le courant de saturation peut être calculé par l'expression suivante :

$$I_{sat} = I_{sat,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}} \exp\left(\frac{-qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (\text{II. 19})$$

Où E_g est l'énergie de la bande de gap.

II.2.5.5 Résistance série R_s

La résistance série R_s influe directement sur la pente de la caractéristique courant-tension $I - V$ dans la région proche de la tension en circuit ouvert V_{co} . L'équation de la résistance série R_s est déterminée en différenciant l'équation (II.11) [Rezzouk, 2010]:

$$dI_e = 0 - I_{sat} \left(\frac{dV_e + R_s dI_e}{nV_T} \right) \exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{nV_T} \right) \quad (\text{II. 20})$$

Ce qui donne :

$$R_s = - \frac{dV_e}{dI_e} - \frac{nV_T}{I_{sat} \exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{nV_T} \right)} \quad (\text{II. 21})$$

Au voisinage de V_{co} sur la courbe de la caractéristique $I - V$ on a :

$$R_s = - \left. \frac{dV_e}{dI_e} \right|_{V_{co}} - \frac{nV_T}{I_{sat} \exp \left(\frac{V_{co}}{nV_T} \right)} \quad (\text{II. 22})$$

$\left. \frac{dV_e}{dI_e} \right|_{V_{co}}$ représente la pente de la caractéristique $I - V$, calculée dans la région proche de V_{co}

en utilisant les courbes publiées par le constructeur dans la fiche technique puis on la divise par le nombre de cellules mises en série N_s .

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

L'équation de base (II.11) de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique $I - V$ d'un générateur photovoltaïque. Le GPV est un regroupement d'un grand nombre de cellules élémentaires, connectées dans différentes topologies. Trois types de structure d'interconnexion sont généralement utilisés, à savoir série-parallèle, Total Cross Tied (TCT), et Bridge Linked (BL). La Figure II.8 illustre ces différentes configurations pour un module photovoltaïque 2x6 [Abdelmoula, 2017].

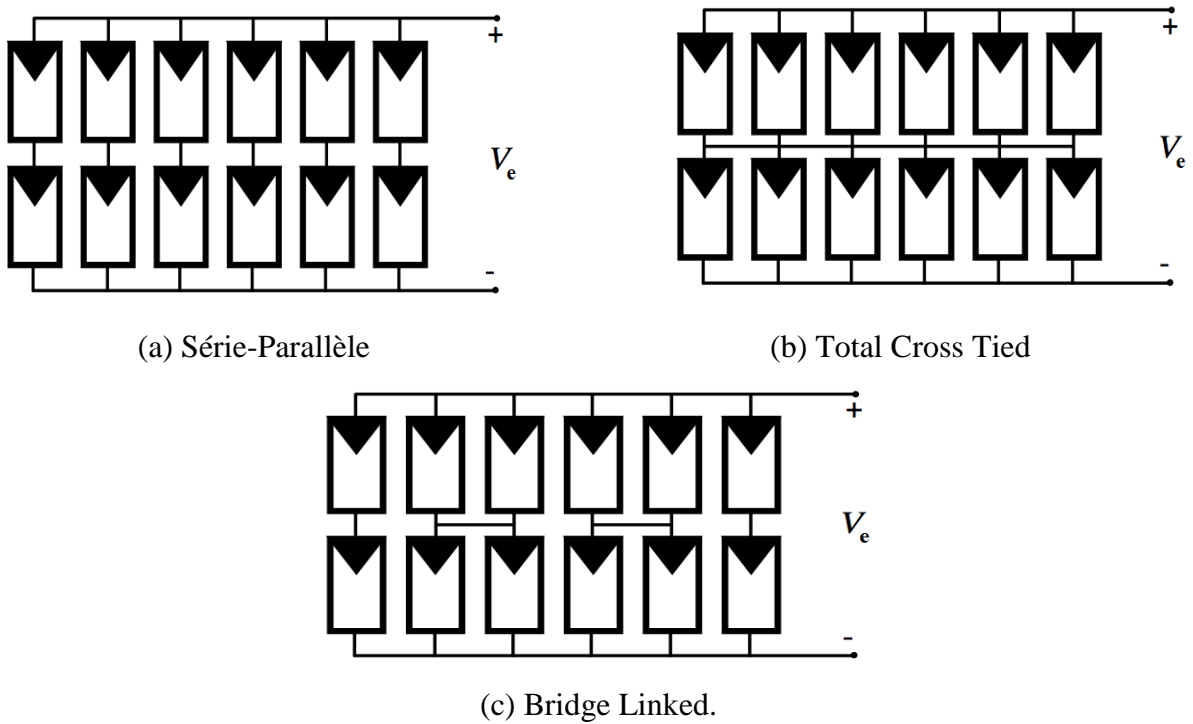


Figure II.8 – Configuration de connexion des cellules photovoltaïques

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous allons s'intéresser à la configuration série-parallèle.

II.3.1 Association de N_s cellules en série

L'association parallèle de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.9.

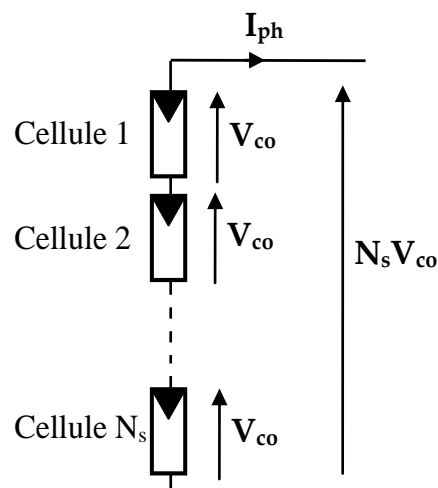


Figure II.9 – Association de N_s cellules en série

II.3.2 Association de N_p cellules en parallèle

L'association parallèle de N_p cellules permet d'accroître le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.10.

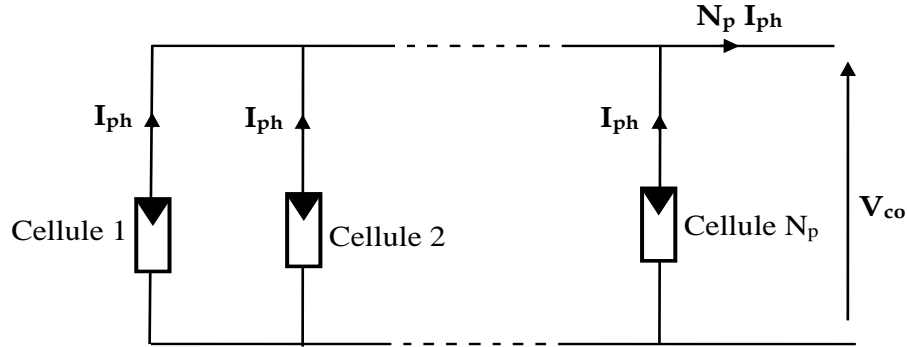


Figure II.10 – Association de N_p cellules en parallèle

II.3.3 Association série-parallèle des cellules

L'association série-parallèle permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.11.

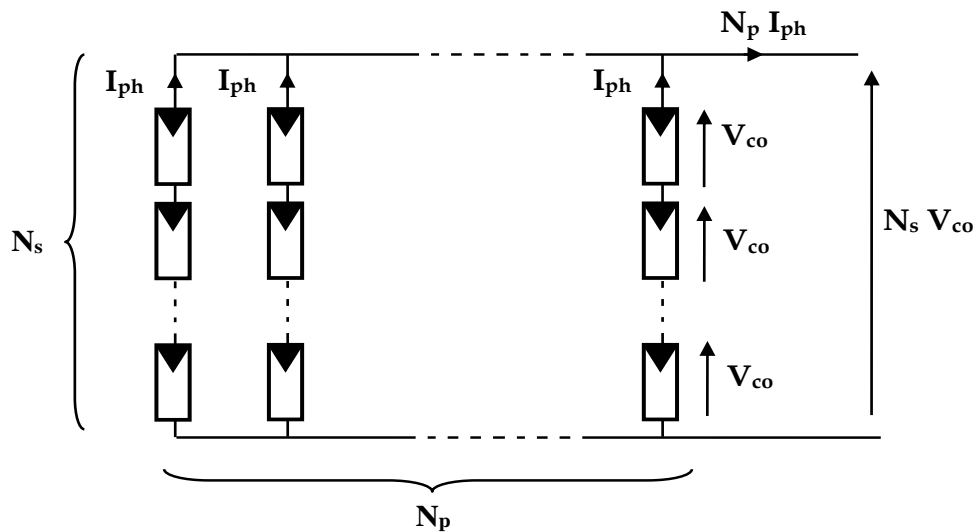


Figure II.11 – Association série-parallèle des cellules

À partir de l'équation (II.11) et de la figure II.11, la relation entre le courant et la tension dans un générateur photovoltaïque, constitué de N_s cellules connectées en série et de N_p cellules connectées en parallèle est donnée par l'équation suivante :

$$I_e = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_e + \frac{N_p}{N_s} I_e R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) \quad (II.23)$$

II.4 Simulation du générateur photovoltaïque (Module solaire BP-Solar SX 120)

II.4.1 Description du module

Les séries des modules BP-Solar SX fournies une puissance rentable pour l'usage général, soit pour alimenter des charges à courant continu directement ou à travers un onduleur pour les charges à courant alternative. Le module BP SX 120 est constitué de 72 cellules monocristallines connectées en série ($N_s = 72$), d'une puissance crête de 120W, chargent des batteries de 24V (ou multiples de 24V) [BP Solar, 2001].

II.4.2 Caractéristiques électriques et mécaniques du module

Le tableau II.1 résume les caractéristiques électriques et mécaniques du module photovoltaïque fournies par le constructeur. On rappelle que ces paramètres sont donnés pour les conditions de référence, à savoir $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_{ref} = 298 \text{ K}$.

Tableau II.1 – Spécification du module photovoltaïque BP SX 120

Caractéristiques électriques	
Puissance maximale P_{max}	120 W
Tension au point de puissance maximale V_{ppm}	33.7 V
Courant au point de puissance maximale I_{ppm}	3.56 A
Courant de court-circuit I_{cc}	3.87 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	42.1 V
Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température	$-(0.5 \pm 0.05) \text{ \%}/^\circ\text{C}$
Coefficient de variation du courant du court-circuit en fonction de la température k_i	$(0.065 \pm 0.015) \text{ \%}/^\circ\text{C}$
Coefficient de variation de tension du circuit ouvert en fonction de la température k_v	$-(80 \pm 10) \text{ mV}/^\circ\text{C}$
Température nominale de fonctionnement de la cellule	$(47 \pm 2) ^\circ\text{C}$
Caractéristiques mécaniques	
Longueur	1456 mm
Largeur	731 mm
Hauteur	50 mm
Poids	12.8 Kg

II.4.3 Simulation du module photovoltaïque BP SX 120

Le modèle choisi pour la simulation du module photovoltaïque est celui décrit par l'équation (II.23) avec $N_p = 1$ et $N_s = 72$.

a) Influence de la température

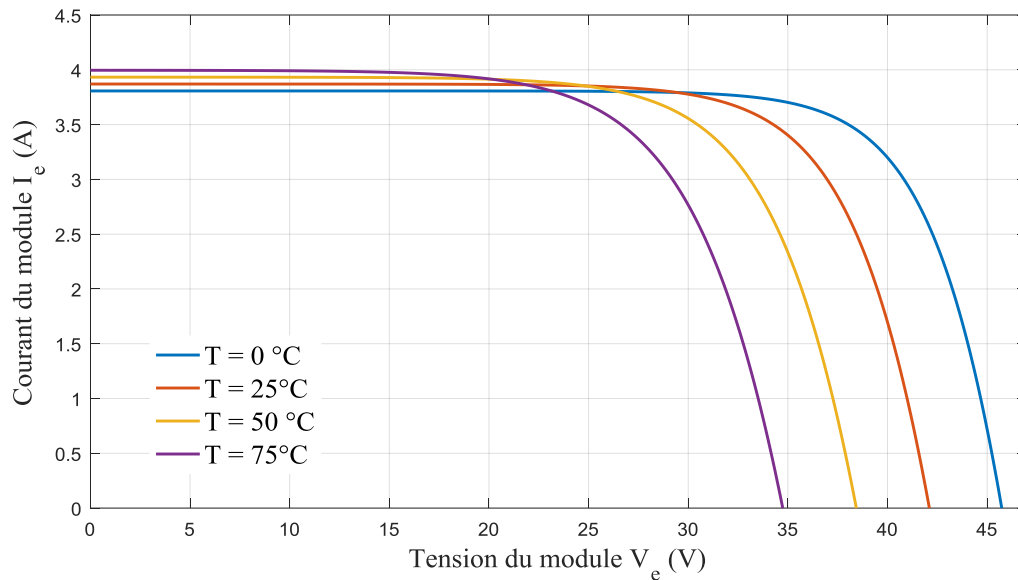


Figure II.12 – Caractéristique $I - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs de températures.

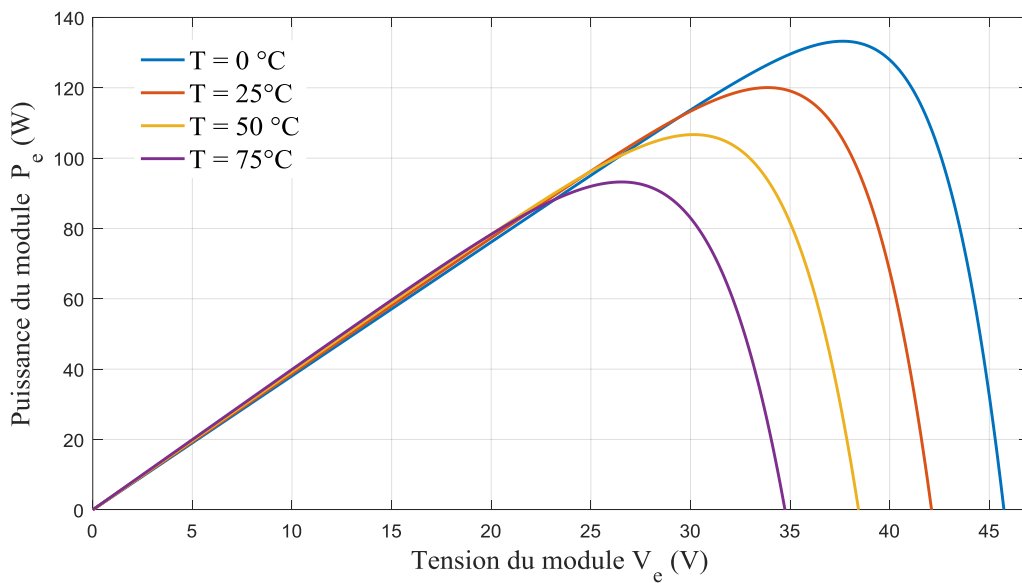


Figure II.13 – Caractéristique $P - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs de températures.

Les figures II.12 et II.13 illustrent la variation des caractéristiques $I - V$ et $P - V$ suite à la variation de la température, sachant que l'éclairement est constant $G = G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$.

✓ Discussion

- La figure II.12 montre que le courant de court-circuit est pratiquement constant en fonction de la température (augmentation légère), mais la tension de circuit ouvert diminue de l'ordre de quelques millivolts par degré Celsius d'augmentation de la température ($160 \text{ mV/}^\circ\text{C}$).
- Par conséquent, la puissance maximale diminue suite à l'augmentation de la température comme le montre la figure II.13. Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

Maintenant nous allons s'intéresser à la variation des caractéristiques $I - V$ et $P - V$ en fonction de l'éclairement G , sachant que la température est constante $T = T_{ref} = 25^\circ\text{C}$.

b) Influence de l'éclairement

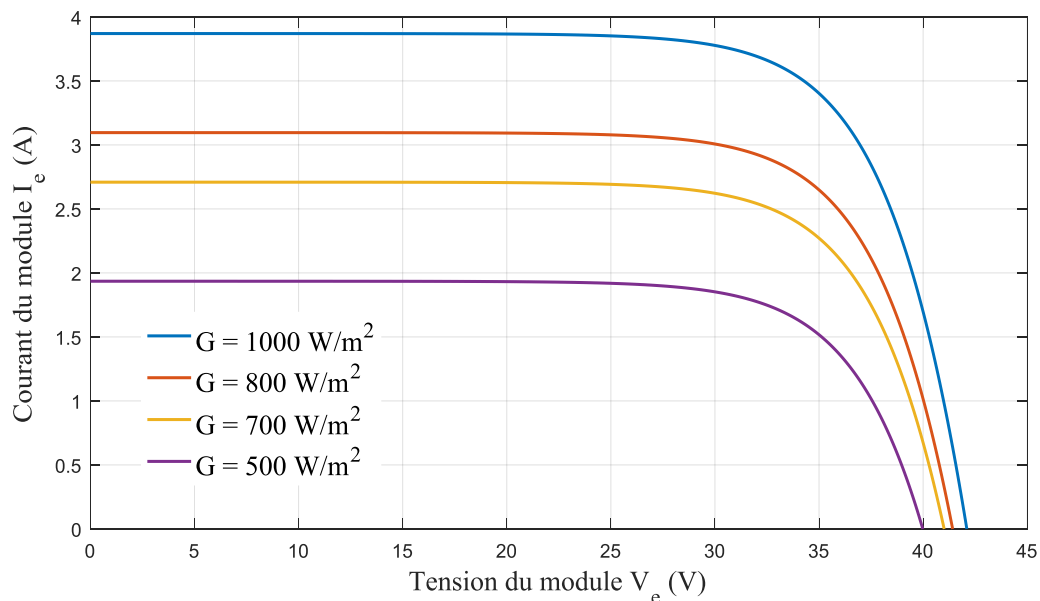


Figure II.14 – Caractéristique $I - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs d'éclairement.

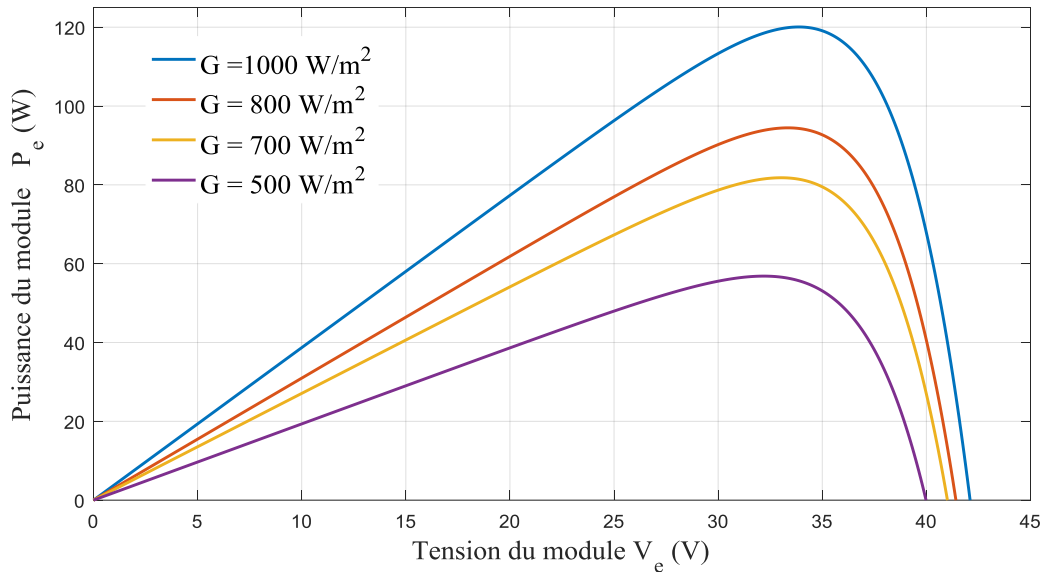


Figure II.15 – Caractéristique $P - V$ du module BP SX 120 pour différentes valeurs d'éclairement.

✓ Discussion

- La figure II.14 montre que le courant du module est considérablement influencé par le changement de l'éclairement ; tandis que la tension du module reste approximativement constante. C'est-à-dire la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.
- La puissance délivrée par le module photovoltaïque dépend de l'irradiation qu'il reçoit comme le montre la figure II.15, En effet, l'influence de l'éclairement représenté simplement par :
 - La puissance maximale du module photovoltaïque est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
 - Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

II.4.4 Simulation du module BP SX 120 connecté directement à une charge

On connecte maintenant le générateur photovoltaïque directement à une charge $R = 5\Omega$. On suppose que la température est constante ($T = 25^\circ\text{C}$) et que l'éclairement est variable. Le profil de variation de l'irradiation en fonction de temps est donné sur la figure II.16.

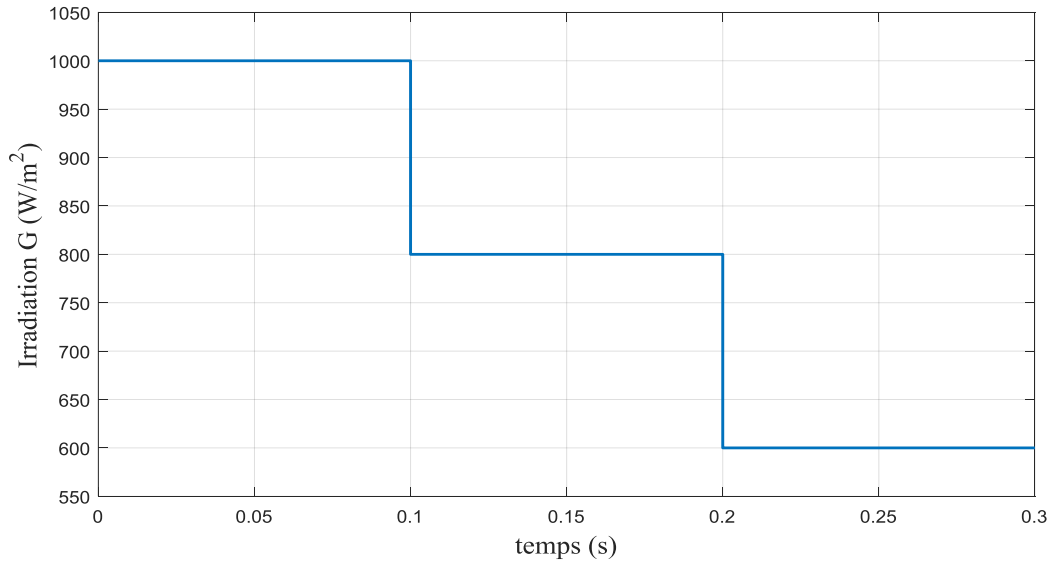


Figure II.16 – Variation de l'irradiation G en fonction du temps

La variation de la puissance du générateur photovoltaïque en fonction du temps est donnée sur la figure II.17.

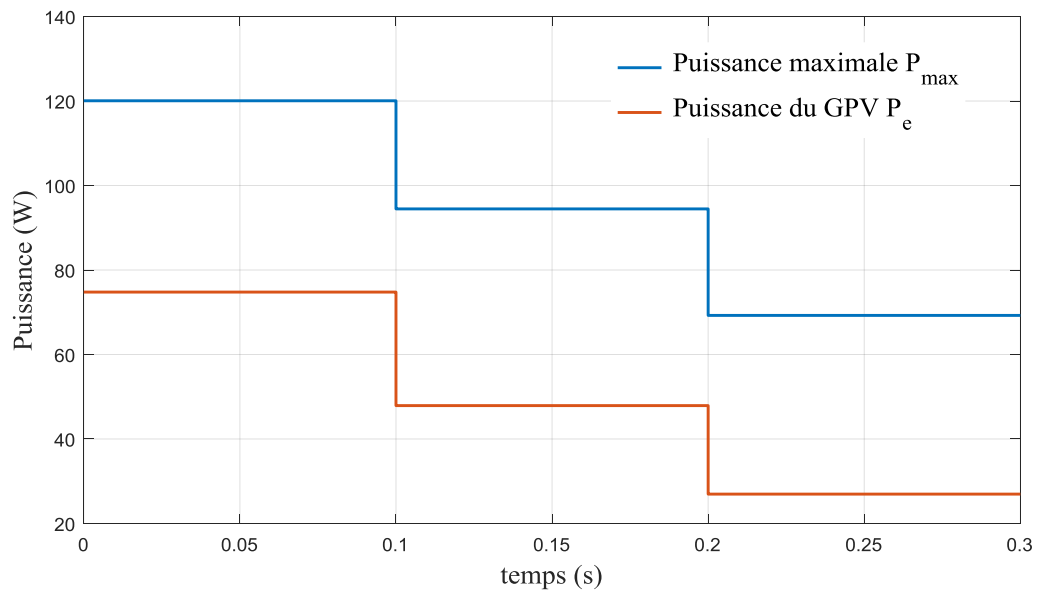


Figure II.17 – Puissance du générateur photovoltaïque connecté directement à une charge

✓ Discussion

- D'après le résultat obtenu sur la figure II.17, on remarque que la puissance du GPV est inférieure de la puissance maximale qu'il peut générer à chaque valeur de l'irradiation ;
- Le générateur photovoltaïque connecté directement à la charge ne fonctionne pas dans son point de fonctionnement optimal PPM et donc le gisement solaire n'est pas bien exploité.

II.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques modèles de la cellule photovoltaïque qui existent dans la littérature et nous avons opté pour le modèle réel à une seule diode avec négligence de la résistance parallèle R_p . On a ensuite récapitulé les équations permettant de calculer les paramètres de ce modèle dans des conditions atmosphériques quelconques. Ce modèle, a été, ensuite généraliser pour obtenir le modèle d'un GPV. Enfin, on a fait la simulation de notre GPV (module BP SX 120) pour différentes valeurs de températures et d'irradiations puis nous avons connecté ce GPV à une charge résistive.

On a conclu que le GPV ne fonctionne pas dans son point de fonctionnement optimal ce qui nécessite de mettre un étage d'adaptation ; entre le générateur photovoltaïque et la charge ; qui aura pour rôle de faire fonctionner le GPV à son PPM pour n'importe quelle valeur d'irradiation et de température. C'est les convertisseurs continu/continu (DC/DC) qui assurent cette tâche. Ils feront l'objet du chapitre suivant.

III.1 Introduction

Afin de faire la poursuite du point de puissance maximale du système photovoltaïque, la tension de sortie du générateur photovoltaïque est régulée, par un convertisseur continu/continu (étage d'adaptation) qui, lui-même, est contrôlé continuellement par son rapport cyclique qui varie suite aux changements des conditions météorologiques ou de la charge.

Dans ce sens, nous présentons dans ce chapitre les différents types de convertisseurs continu/continu qui constituent l'étage d'adaptation. Ensuite, nous allons expliquer le principe de fonctionnement des commandes permettant la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Finalement, nous présenterons les résultats de simulation du système photovoltaïque en boucle ouverte (rapport cyclique constant) puis en boucle fermée (rapport cyclique commandé par l'algorithme « Perturbation et Observation (P&O) » puis par l'algorithme « Incrément de conductance (IncCon) »), et ceci pour des variations de l'éclairement.

III.2 Convertisseurs continu – continu (DC/DC)

Les convertisseurs du type continu-continu, appelés aussi hacheurs, permettent de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements.

Dans ce qui suit, on notera :

- α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur ;
- T_c : la période des impulsions.

L'interrupteur peut être remplacé par un transistor MOSFET puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [Boukli-Hacene, 2011].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_c avec :

- Un temps de fermeture égal à $t_{on} = \alpha T_c$: [0 à αT_c]
- Un temps d'ouverture égal à $t_{off} = (1 - \alpha) T_c$: [αT_c à T_c].

- **Fonctionnement du transistor MOSFET (Interrupteur)**

Le transistor est contrôlé par le signal de type binaire suivant :

$$U_{MOSFET}(t) = \begin{cases} 1 & \text{Transistor saturé (Interrupteur fermé)} \\ 0 & \text{Transistor bloqué (Interrupteur ouvert)} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

La génération du signal $U_{MOSFET}(t)$ se fait en comparant un signal triangulaire de fréquence $\frac{1}{T_c}$ et d'amplitude 1 de circuit PWM (Pulse With Modulation) avec le rapport cyclique $\alpha(t) = \frac{t_{on}}{T_c}$ comme le montre la figure suivante :

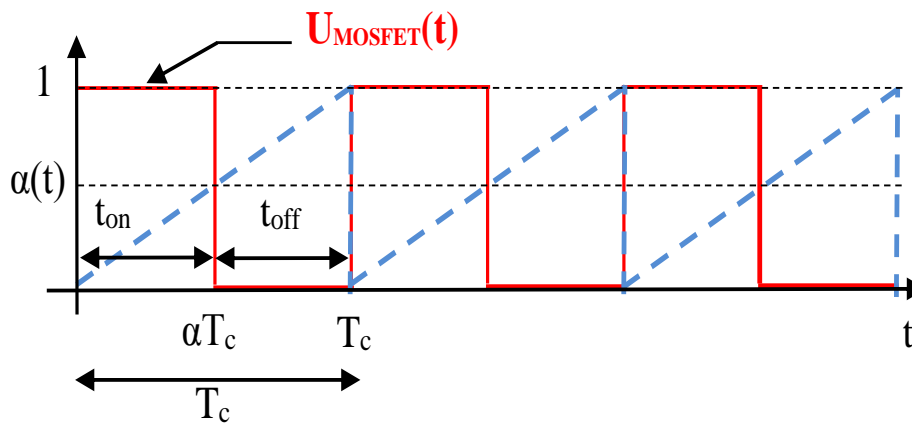


Figure III.1 – Forme d'impulsion générée par le circuit PWM

- **Élaboration du modèle moyen**

Pour une quantité Z dans un système dynamique dont les valeurs sont Z_1 à l'état fermé et Z_2 à l'état ouvert, sa valeur moyenne Z_m au cours de la période de commutation T_c est donnée comme:

$$Z_m = \alpha Z_1 + (1 - \alpha) Z_2 \quad (\text{III. 2})$$

Tout au long de ce mémoire, nous supposons que le circuit du système photovoltaïque fonctionne en Mode de Conduction Continue (MCC), puisque le courant de l'inductance ne peut pas s'annuler à cause du cycle de commutation de l'interrupteur. En MCC deux topologies, correspondant à l'état de l'interrupteur (fermé ou ouvert) sont possibles.

Il y a différents types de convertisseurs DC/DC que nous allons voir dans ce qui suit. Pour chaque convertisseur DC/DC nous allons expliquer le fonctionnement, ensuite donner le modèle dynamique et le modèle moyen.

III.2.1 Convertisseur abaisseur de tension Buck

Le convertisseur Buck peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée de ce convertisseur est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant (Figure III.2).

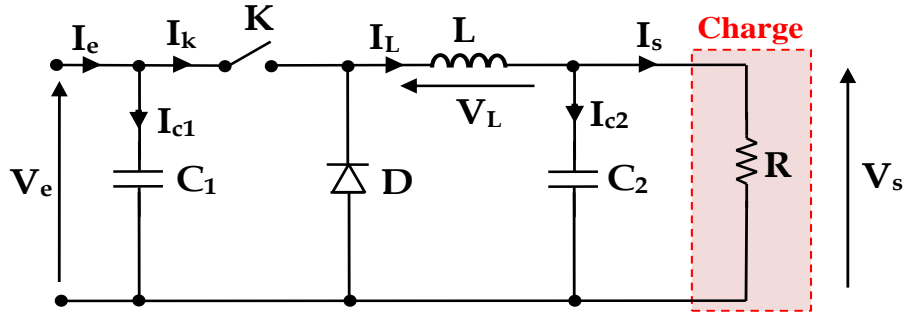


Figure III.2 – Représentation schématique d'un convertisseur Buck

III.2.1.1 Séquences de fonctionnement

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.

a) Première séquence $[0 \text{ à } \alpha T_c]$: interrupteur fermé

Dans cette séquence, l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_c , la tension appliquée aux bornes de la diode est V_e . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_c = \frac{1}{T_c}$. La source V_e fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. La figure III.3 montre le schéma du circuit équivalent du convertisseur Buck avec le commutateur fermé.

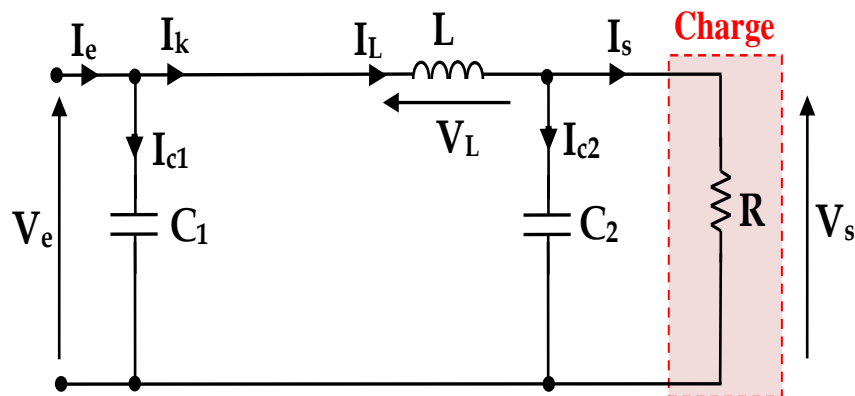


Figure III.3 – Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff des mailles et des nœuds sur le circuit de la figure III.3 on aura les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e - I_L \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_s \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = I_L - I_s \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Pour tous les convertisseurs DC/DC que nous allons voir par la suite le courant de sortie I_s obéit à l'équation :

$$I_s = \frac{V_s}{R} \quad (\text{III. 4})$$

Ainsi, on trouve le modèle dynamique suivant :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{1}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

b) Deuxième séquence $[\alpha T_c \text{ à } T_c]$: interrupteur ouvert

Pendant le temps $t \in [\alpha T_c, T_c]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. La figure III.4 représente le convertisseur Buck avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)T_s$.

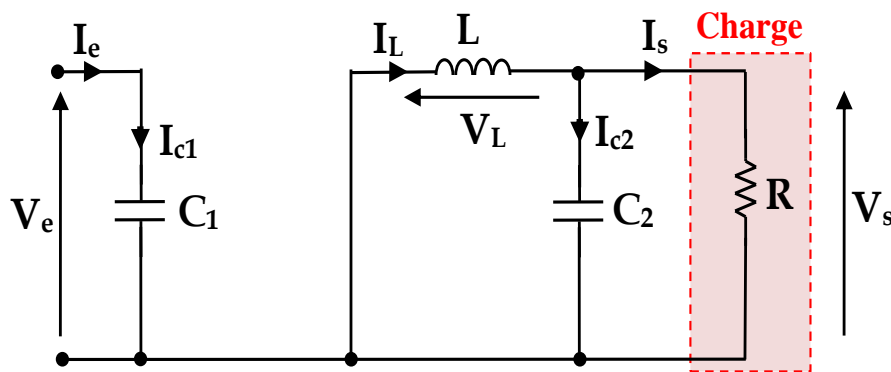


Figure III.4 – Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff des nœuds et des mails sur le circuit de la figure III.4, on aura les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = I_L - I_s \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = -V_s \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

Ainsi, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e \\ \dot{I}_L = -\frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

III.2.1.2 Modèle moyen

Le modèle moyen est obtenu en appliquant l'équation (III.2) sur (III.5) et (II.7) :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{\alpha}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{\alpha}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

III.2.1.3 Rapport cyclique

En régime permanent, les variables d'état deviennent constantes et donc leurs variations sont nulles. Par conséquent, à partir de l'équation (III.8), on obtient :

$$I_L = \frac{\alpha}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s = 0 \quad \Rightarrow \quad V_s = \alpha V_e \quad (\text{III. 9})$$

Ainsi, le rapport de conversion entre la tension sortie et la tension d'entrée est donné par la relation suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \alpha \quad \text{avec} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{III. 10})$$

III.2.2 Convertisseur élévateur de tension Boost

Le convertisseur Boost peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur survolteur ou hacheur parallèle. La source d'entrée est de type courant continu et la charge de sortie est de type tension continue (Figure III.5).

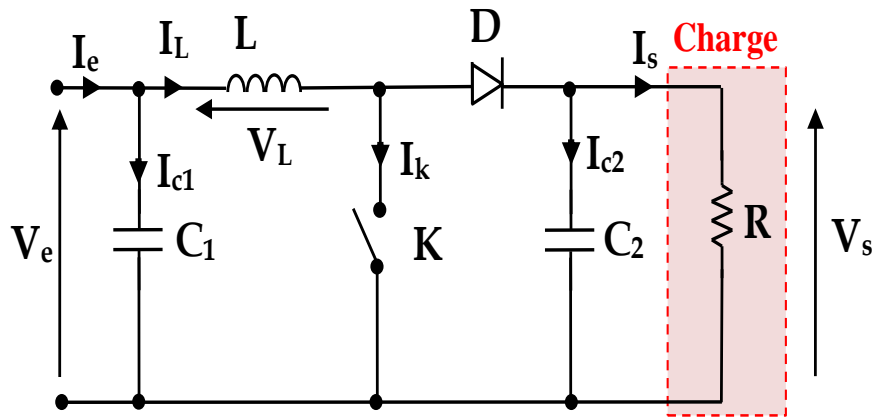


Figure III.5 – Représentation schématique d’un convertisseur Boost

III.2.2.1 Séquences de fonctionnement

a) Première séquence [0 à αT_c] : interrupteur fermé

Quand l’interrupteur est fermé pendant la durée αT_c , la diode D est bloquée. Cela entraîne l’augmentation du courant dans l’inductance et le stockage d’une quantité d’énergie sous forme magnétique, alors que la charge se trouve déconnecté. Le courant dans l’inductance croît linéairement. Cette séquence est illustrée sur la figure III.6.

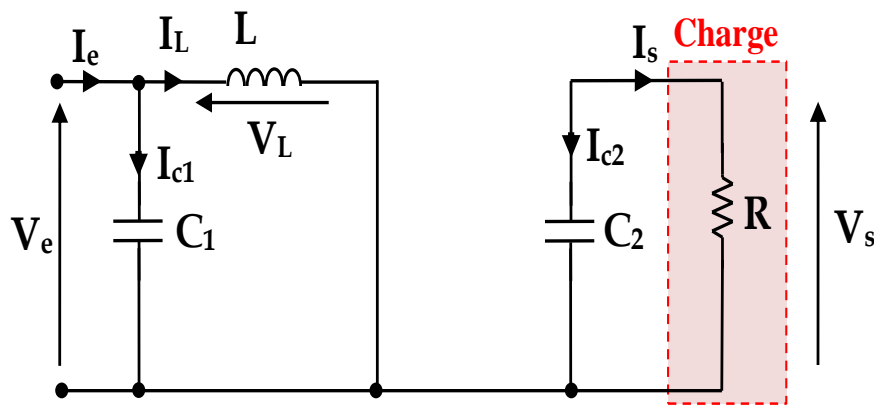


Figure III.6 - Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.

L’application de la loi de Kirchhoff des mailles et des nœuds sur le circuit de la figure III.6, donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e - I_L \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_e \\ I_{c2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = -I_s \end{array} \right. \quad (III. 11)$$

Ainsi, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{1}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e \\ \dot{V}_s = -\frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

b) Deuxième séquence $[\alpha T_c \text{ à } T_c]$: interrupteur ouvert

L'interrupteur s'ouvre pendant le temps $t \in [\alpha T_c, T_c]$, et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_s$. Cette séquence est illustrée sur la figure III.7.

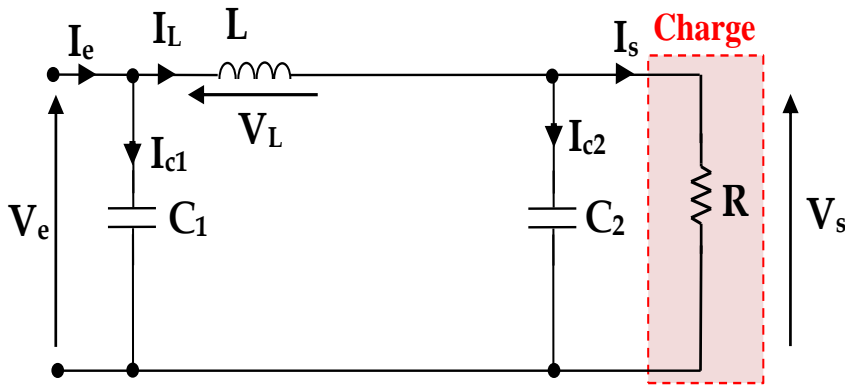


Figure III.7 – Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert.

En appliquant la loi de Kirchhoff, on trouve :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e - I_L \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_s \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = I_L - I_s \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{1}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

III.2.2.2 Modèle moyen

Le modèle moyen peut être obtenu en appliquant l'équation (III.2) sur (III.14) et (II.12) :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{1}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e - \frac{1-\alpha}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1-\alpha}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

III.2.2.3 Rapport cyclique

En régime permanent, les variables d'état deviennent constantes et donc leurs variations sont nulles. Par conséquent, à partir de l'équation (III.15), on obtient :

$$\dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e - \frac{1-\alpha}{L} V_s = 0 \quad \Rightarrow \quad V_e = (1-\alpha)V_s \quad (\text{III.16})$$

Ainsi, le rapport de conversion entre la tension sortie et la tension d'entrée est donné par la relation suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{avec} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{III.17})$$

III.2.3 Convertisseur Buck-Boost

La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de tension. La représentation schématique d'un convertisseur Buck-Boost est donnée sur la figure III.8.

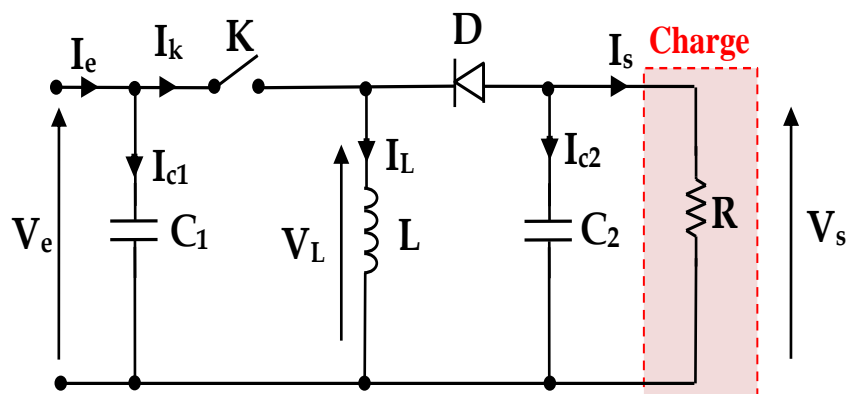


Figure III.8 – Représentation schématique d'un convertisseur Buck-Boost

III.2.3.1 Séquences de fonctionnement

a) Première séquence $[0 \text{ à } \alpha T_c]$: interrupteur fermé

Quand l'interrupteur K est fermé pendant la durée αT_c , le courant augmente linéairement et la tension est égale à V_e . Le circuit équivalent est montré sur la figure III.9.

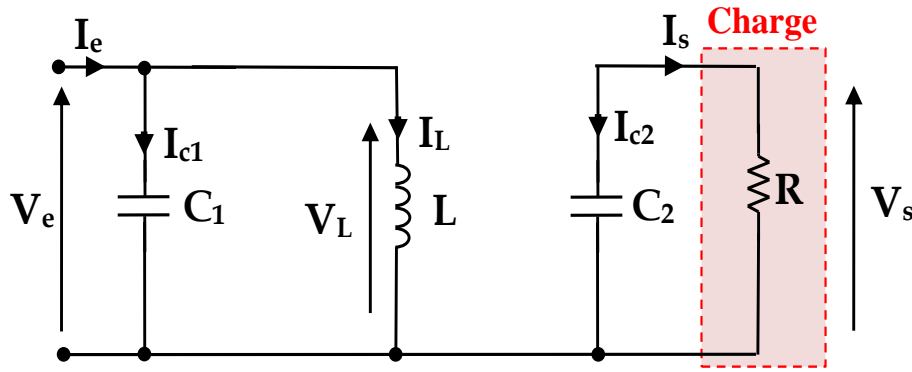


Figure III.9 – Schéma électrique d'un hacheur Buck-Boost fermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur le circuit de la figure III.8 donne :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e - I_L \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_e \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = -I_s \end{cases} \quad (\text{III. 18})$$

Ainsi, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{1}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_e \\ \dot{V}_s = -\frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 19})$$

b) Deuxième séquence $[\alpha T_c \text{ à } T_c]$: interrupteur ouvert

L'interrupteur s'ouvre pendant le temps $t \in [\alpha T_c, T_c]$, la diode prend le relais et la tension est égale à $-V_s$. Cette séquence est illustrée sur la figure III.10.

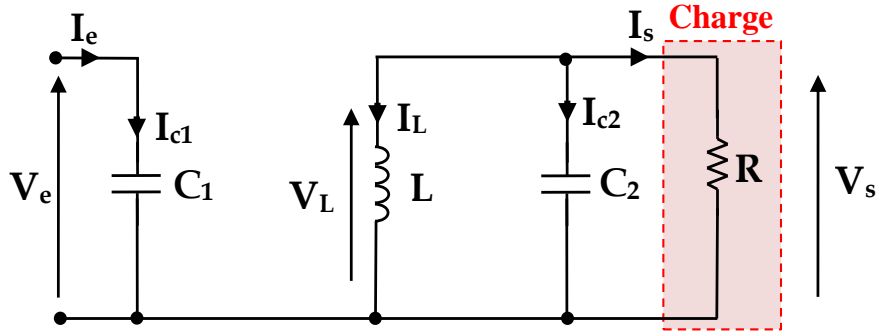


Figure III.10 – Schéma électrique d'un hacheur Buck-Boost ouvert

Le modèle d'équation dans cette configuration est donné par :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \frac{dV_e}{dt} = I_e \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_s \\ I_{C2} = C_2 \frac{dV_s}{dt} = -I_L - I_s \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

Ainsi, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e \\ \dot{I}_L = \frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = -\frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

III.2.3.2 Modèle moyen

Le modèle moyen peut être obtenu en appliquant l'équation (III.2) sur (III.19) et (III.21) :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{\alpha}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{\alpha}{L} V_e + \frac{1-\alpha}{L} V_s \\ \dot{V}_s = -\frac{1-\alpha}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

III.2.3.3 Rapport cyclique

En régime permanent, les variables d'état deviennent constantes et donc leurs variations sont nulles. Par conséquent, à partir de l'équation (III.22), on obtient :

$$i_L = \frac{\alpha}{L}V_e + \frac{1-\alpha}{L}V_s = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha V_e = (1-\alpha)V_s \quad (\text{III. 23})$$

Ainsi, le rapport de conversion entre la tension sortie et la tension d'entrée est donné par la relation suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{avec} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{III. 24})$$

- Quand $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur Boost ;
- Quand $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-Boost fonction comme un hacheur Buck.

III.3 Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT)

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale [Chekirad, 2008], [Obeidi, 2006].

III.3.1 Principe de la commande MPPT

La figure III.11 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

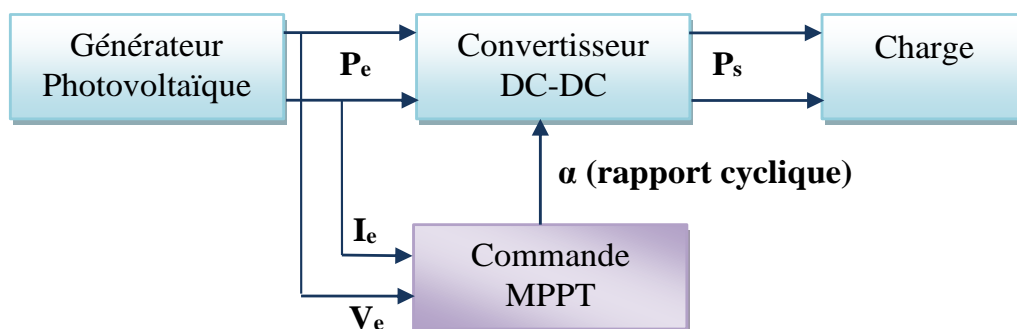


Figure III.11 – Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle MPPT consiste à agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir (Variation de l'ensoleillement, de température ou de charge).

III.3.2 Commande « Perturbation et Observation » (P&O)

La méthode de P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques MPPT, car elle est simple. Elle exige seulement des mesures sur la tension aux bornes du panneau et son courant de sortie.

III.3.2.1 Principe de la méthode P&O

Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau et l'observation de son impact sur le changement de la puissance à sa sortie. Le principe de cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique α et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque [Motahhir et al, 2015].

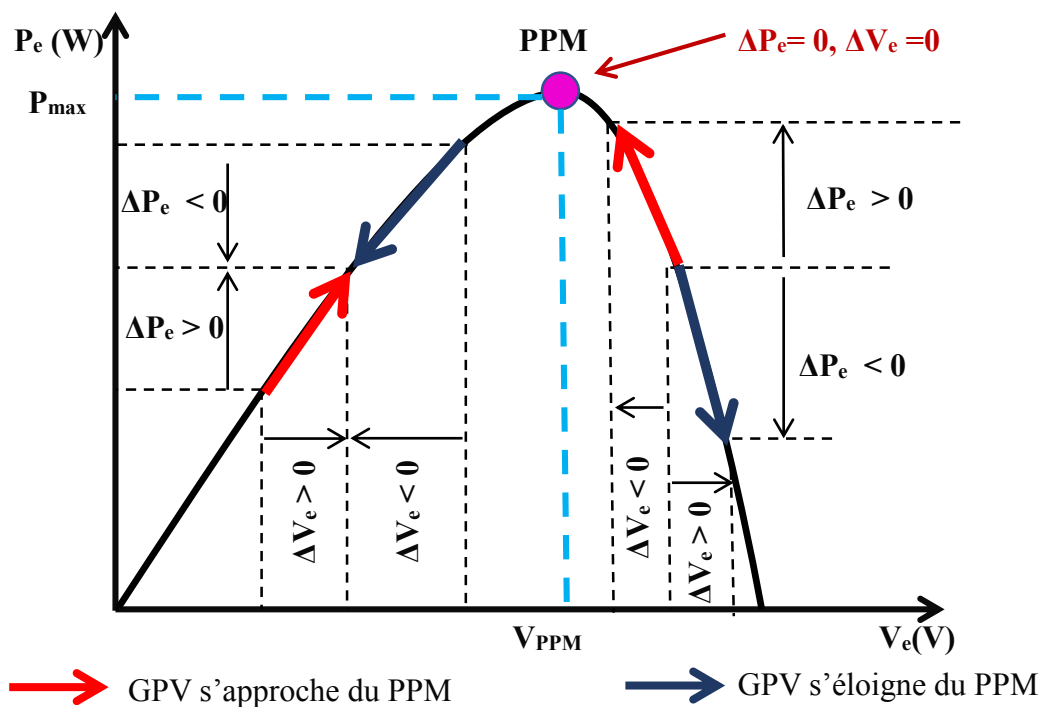


Figure III.12 – Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.

III.3.2.2 Algorithme de la méthode P&O

La figure III.13 montre l'organigramme de l'algorithme P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un calculateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, le courant et la tension du panneau sont mesurés pour calculer $P(k)$. Cette valeur de $P(k)$ est comparée avec celle de $P(k - 1)$ déjà calculée à l'itération précédente [Rezzouk, 2010].

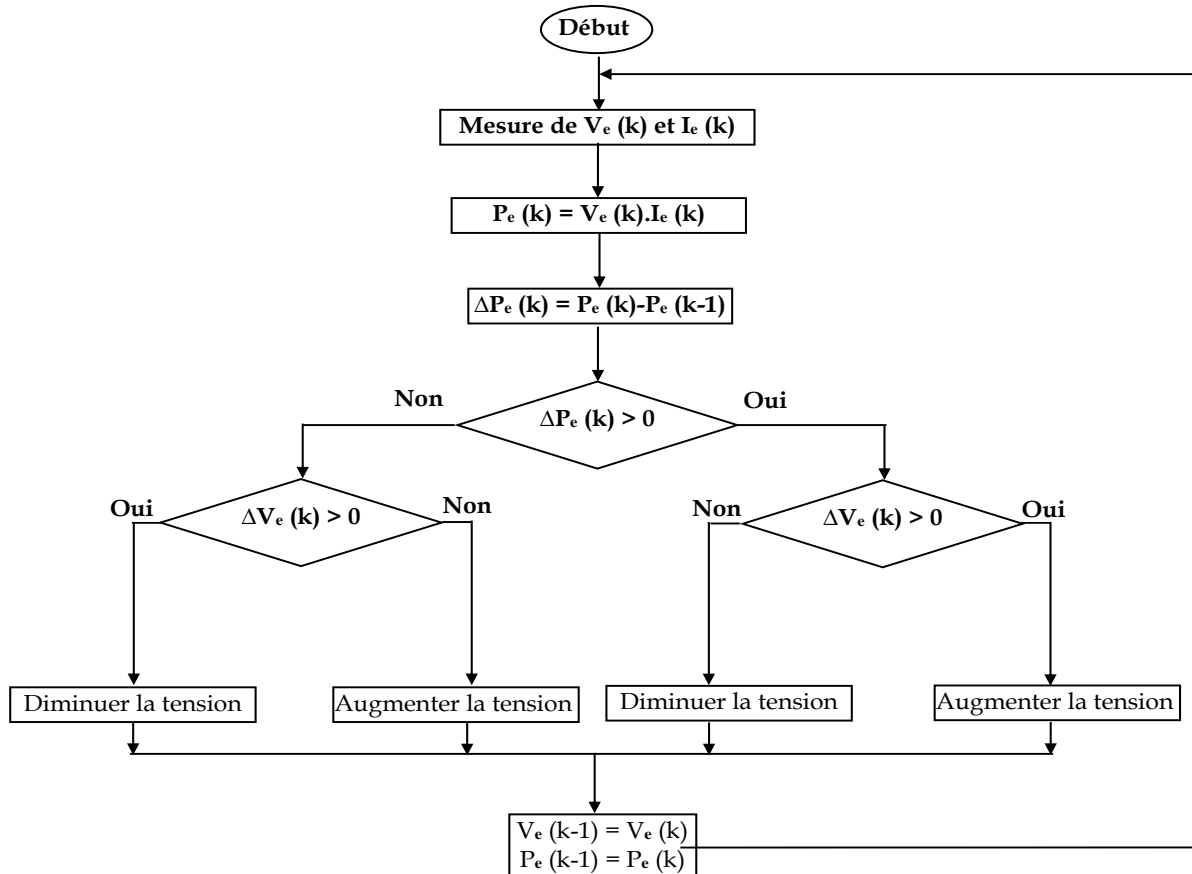


Figure III.13 – Organigramme de l’algorithme P&O.

Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, c’est-à-dire le point de puissance maximale n’est pas atteint, la perturbation de la tension continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la tension du panneau oscille autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. Une fois la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, c’est-à-dire le point de puissance maximale est dépassé, la tension est perturbée dans la direction opposée de celle de l’itération précédente.

III.3.3 Commande « Incrément des conductances » (IncCond)

III.3.3.1 Principe de la méthode IncCond

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par [Abouda, 2015] :

$$C_o = \frac{I_e}{V_e} \quad (\text{III. 25})$$

$$dCo = \frac{dI_e}{dV_e} \quad (\text{III. 26})$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_e}{dV_e} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dP_e}{dV_e} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_e}{dV_e} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM,

En utilisant la relation (III.26), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dP_e}{dV_e} = \frac{d(V_e I_e)}{dV_e} = I_e \frac{dV_e}{dV_e} + V_e \frac{dI_e}{dV_e} = I_e + V_e \frac{dI_e}{dV_e} \quad (\text{III. 27})$$

On peut donc avoir d'autres conditions sur la variation de la conductance :

- Si $I_e + V_e \frac{dI_e}{dV_e} = 0 \Rightarrow \frac{dI_e}{dV_e} = -\frac{I_e}{V_e}$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $I_e + V_e \frac{dI_e}{dV_e} > 0 \Rightarrow \frac{dI_e}{dV_e} > -\frac{I_e}{V_e}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $I_e + V_e \frac{dI_e}{dV_e} < 0 \Rightarrow \frac{dI_e}{dV_e} < -\frac{I_e}{V_e}$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

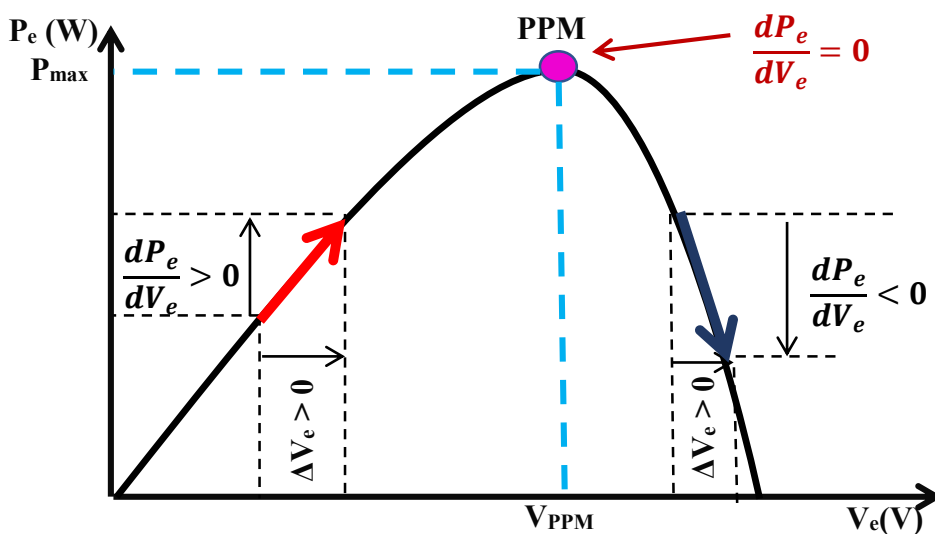


Figure III.14 – Principe de fonctionnement de l'algorithme IncCond.

III.3.3.2 Algorithme de la méthode IncCond

La figure III.14 montre l'organigramme de l'algorithme IncCond.

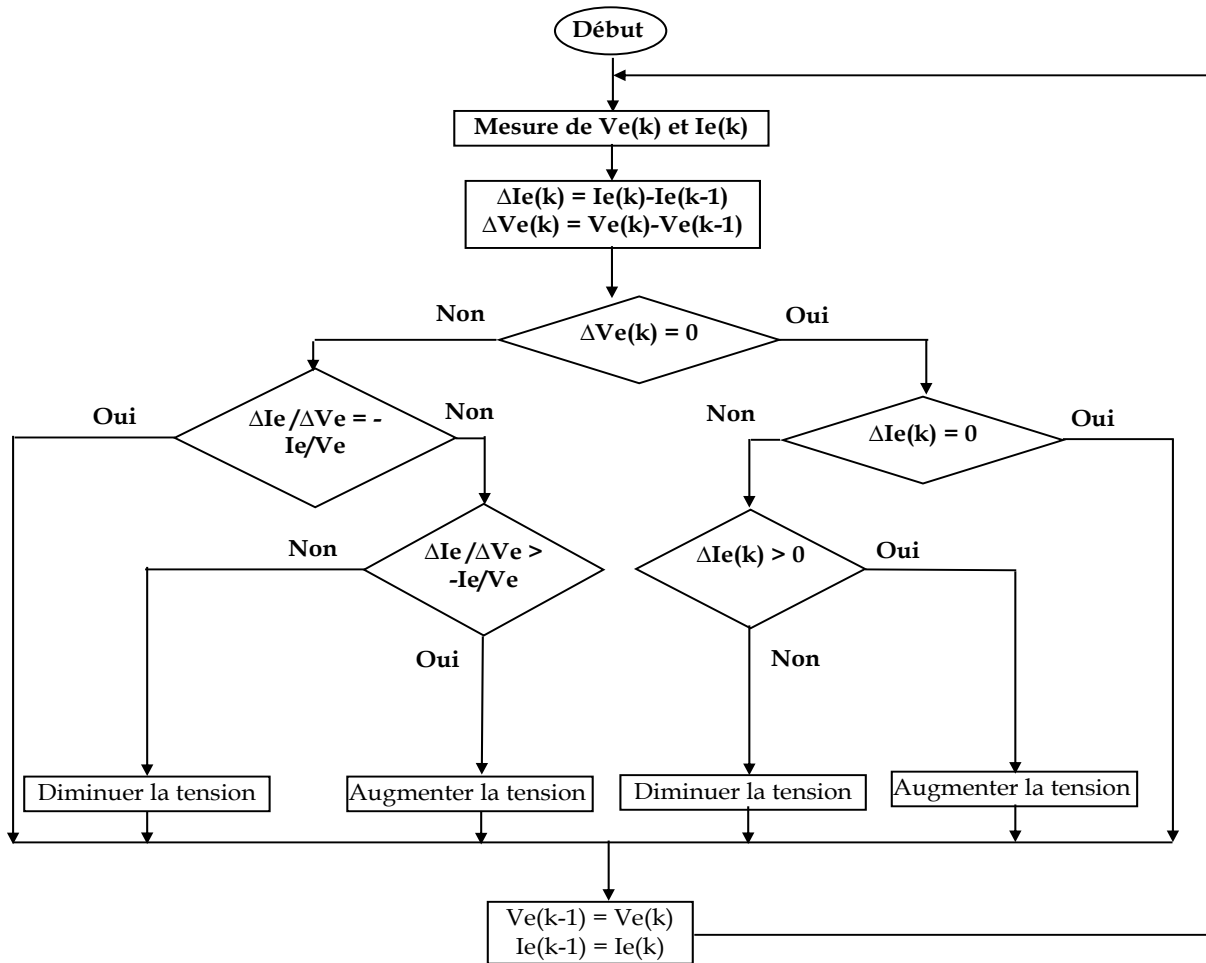


Figure III.15 – Organigramme de l'algorithme IncCond.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition $\frac{dP_e}{dV_e} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

III.4 Simulation du système photovoltaïque

Cette section est consacrée à la simulation de notre système photovoltaïque : Générateur photovoltaïque, convertisseur DC/DC (buck) et la charge, en boucle ouverte puis en boucle fermée.

III.4.1 Système photovoltaïque en boucle ouverte

Pour les conditions initiales $[V_e \ I_L \ V_s] = [15 \ 1 \ 7]$, $C_1 = 15\mu F$, $C_2 = 20\mu F$, $L = 5mH$ et $R = 5\Omega$, une température constante $T = 25^\circ C$, et l'éclairement qui change comme suit : $G = 1000W/m^2$ pour $t \in [0 \ 0.02]$, $G = 800W/m^2$ pour $t \in [0.02 \ 0.04]$, et $G = 600W/m^2$ pour $t \in [0.04 \ 0.06]$., les réponse du systèmes pour $\alpha = 0.72$ sont données sur les figures III.16-III.19.

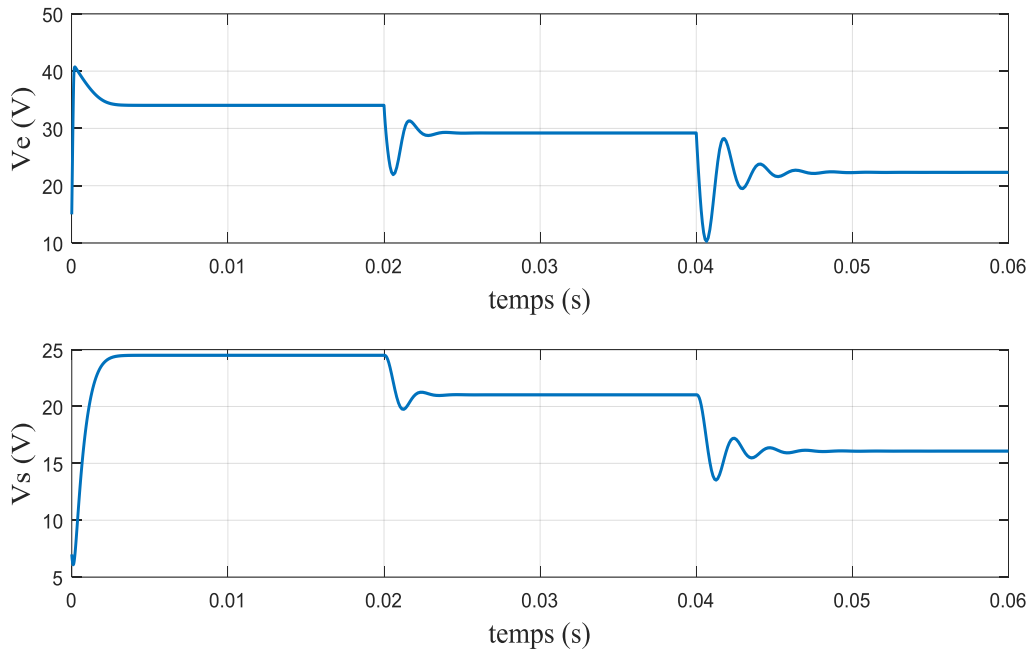


Figure III.16 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$ en BO

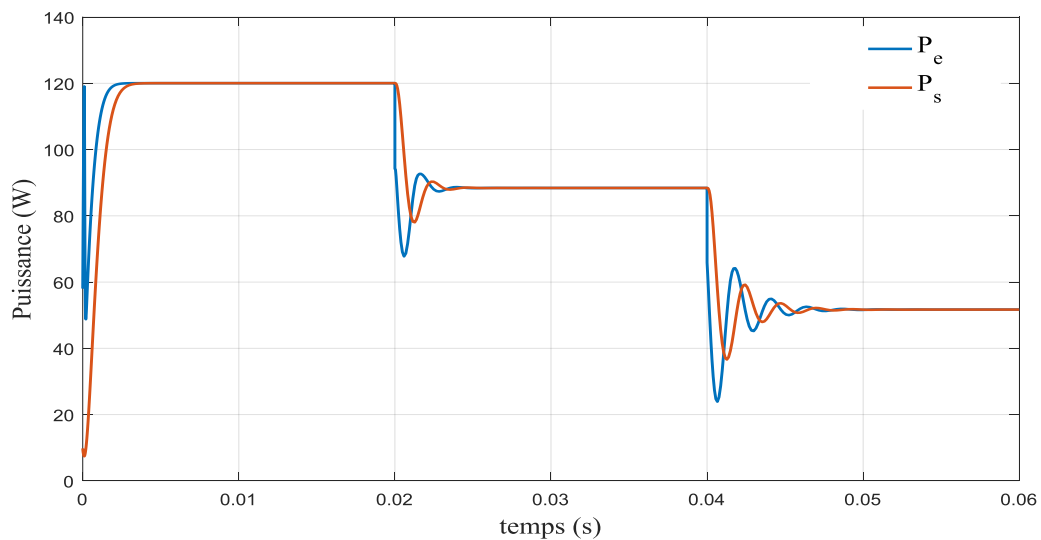


Figure III.17 – Évolution de la puissance d'entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$ en BO

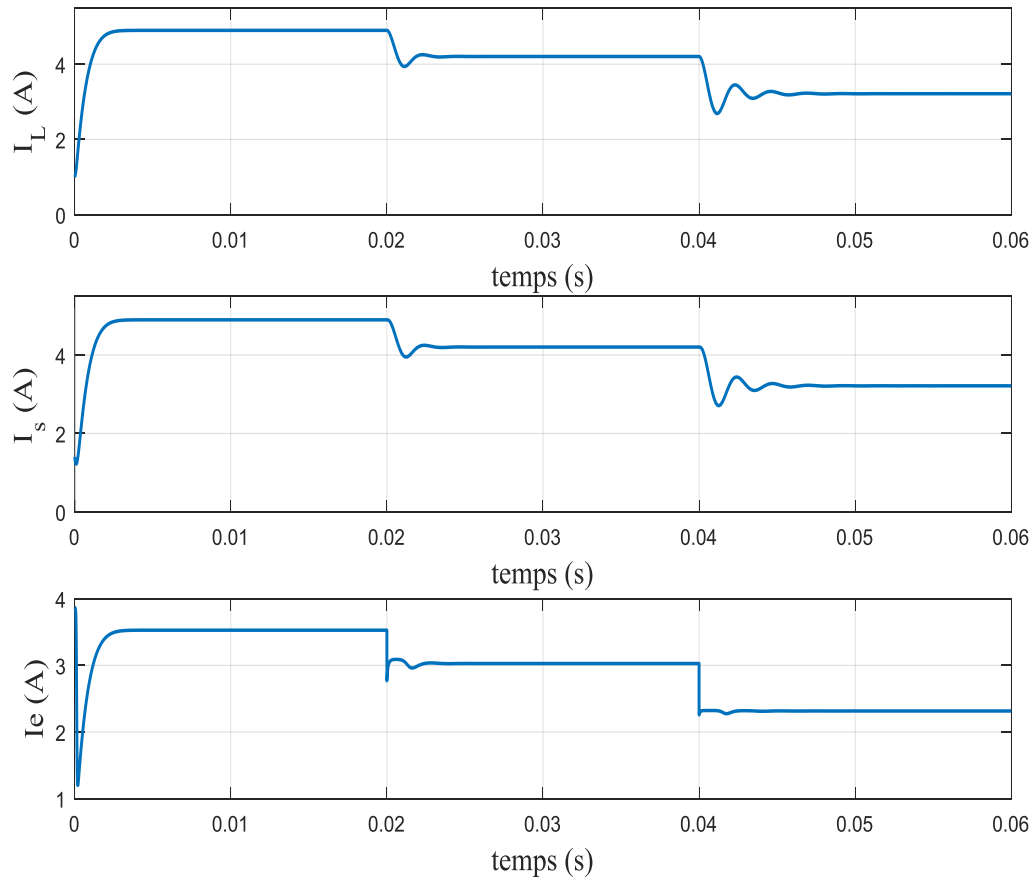


Figure III.18 – Évolution des courants d'entrée $I_e(t)$, de sortie $I_s(t)$ et d'inductance $I_L(t)$ en BO

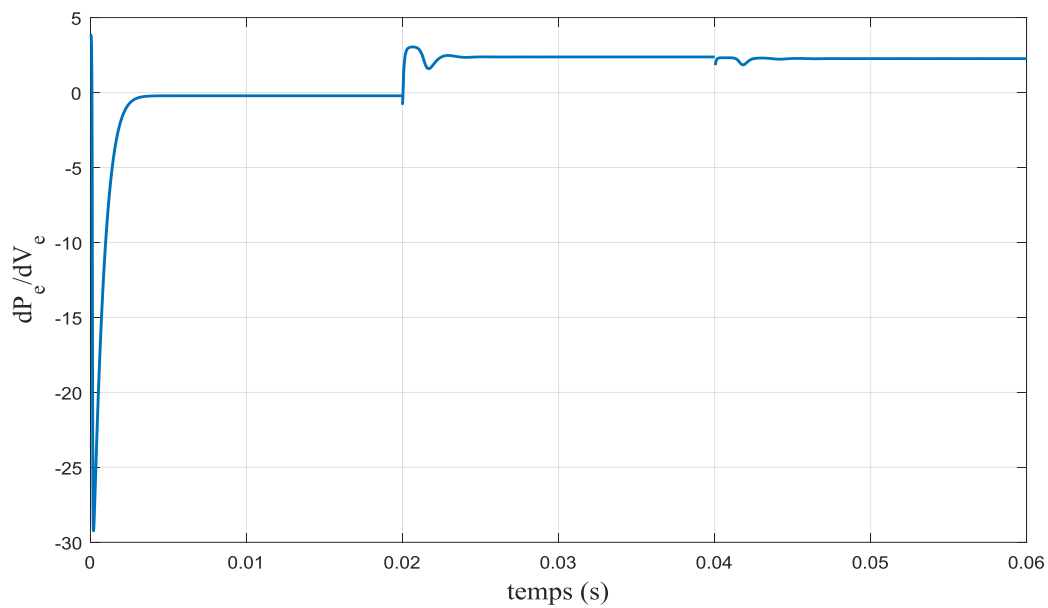


Figure III.19 – Évolution de la dérivée de la puissance par rapport à la tension $\frac{dP_e}{dV_e}$ en BO

✓ **Discussion**

- D'après les résultats obtenus lors de la simulation du système en BO, on peut constater que notre système est stable, même avec la variation de l'éclairement (Figure III.16-III.18).
- Au début de la simulation ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ pour $t \in [0 \text{ } 0.02]$), on remarque que la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle ($\frac{dP_e(t)}{dV_e(t)} = 0$) (figure III.19), ce qui correspond au PPM. Cela veut dire que le système est dans son point de fonctionnement optimal.
- Après, suite aux changements de l'éclairement ($G = 800 \text{ W/m}^2$ pour $t \in [0.02 \text{ } 0.04]$ et $G = 600 \text{ W/m}^2$ pour $t \in [0.04 \text{ } 0.06]$), on remarque que cette condition n'est plus vérifiée ($\frac{dP_e(t)}{dV_e(t)} \neq 0$). Ainsi, on constate que la commande en BO n'arrive pas à maintenir en permanence le fonctionnement du système au point de fonctionnement optimal PPM.

III.4.2 Système photovoltaïque en boucle fermée avec P&O et IncCond

Pour les conditions initiales $[V_e \ I_L \ V_s] = [15 \ 1 \ 7]$, $C_1 = 15\mu\text{F}$, $C_2 = 20\mu\text{F}$, $L = 5\text{mH}$ et $R = 5\Omega$, une température constante $T = 25^\circ\text{C}$, et l'éclairement qui change : $G = 1000\text{W/m}^2$ pour $t \in [0 \text{ } 0.02]$, $G = 800\text{W/m}^2$ pour $t \in [0.02 \text{ } 0.04]$, et $G = 900\text{W/m}^2$ pour $t \in [0.04 \text{ } 0.06]$. Les réponses du système sont données sur les figures suivantes.

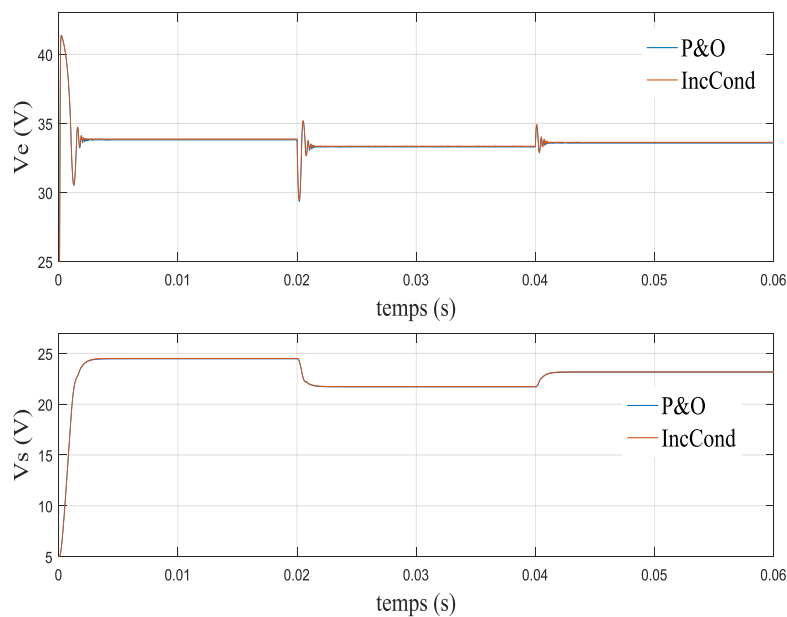


Figure III.20 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$ en BF

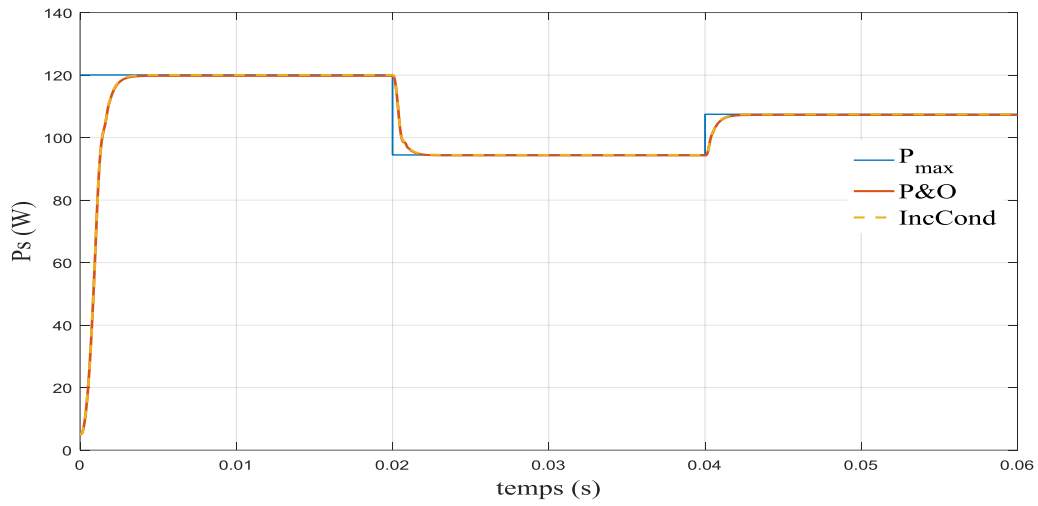
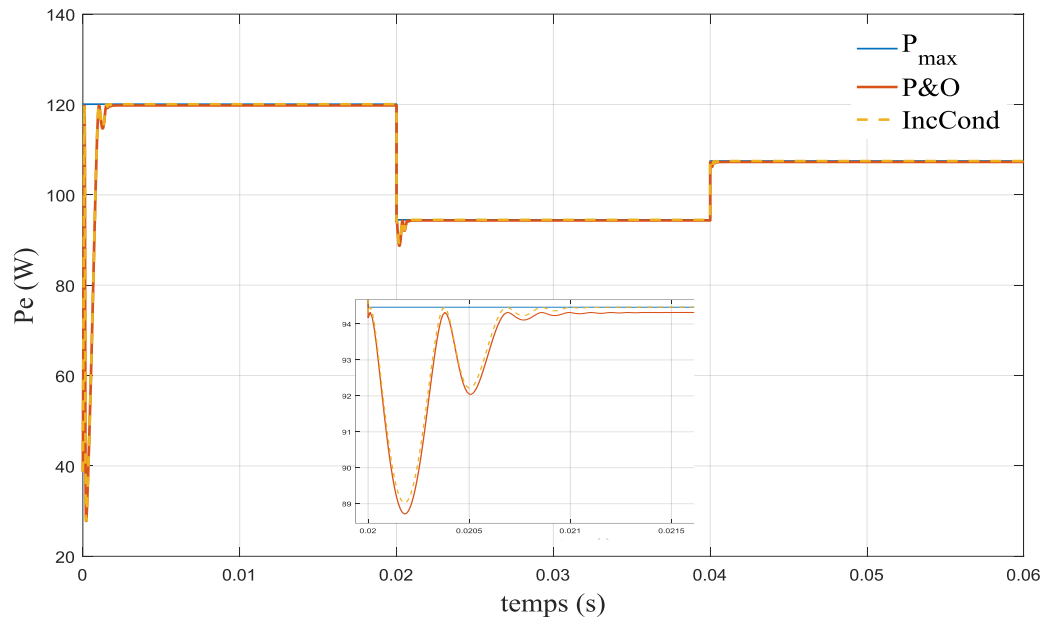


Figure III.21 – Évolution de la puissance d’entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$ en BF

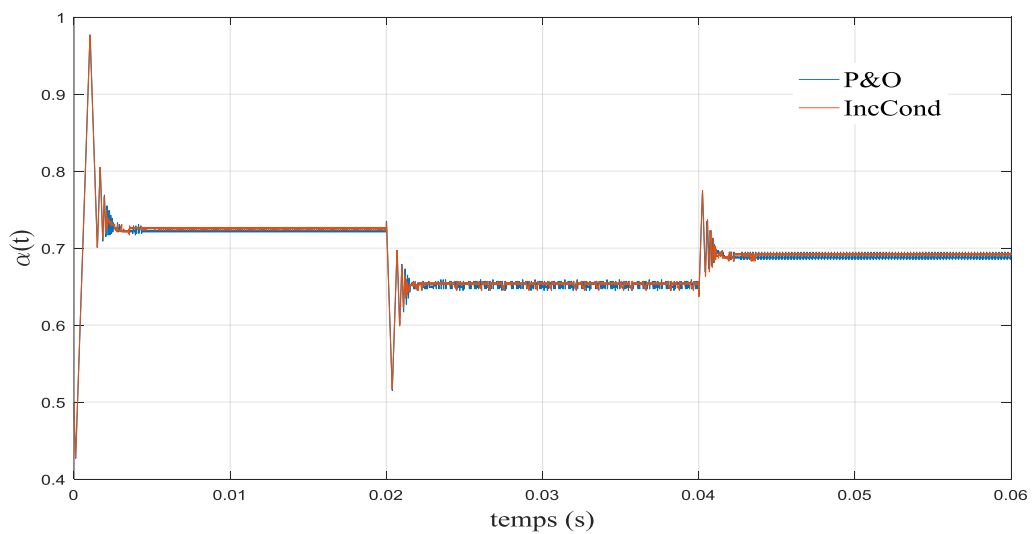


Figure III.22 – Évolution du rapport cyclique α en BF

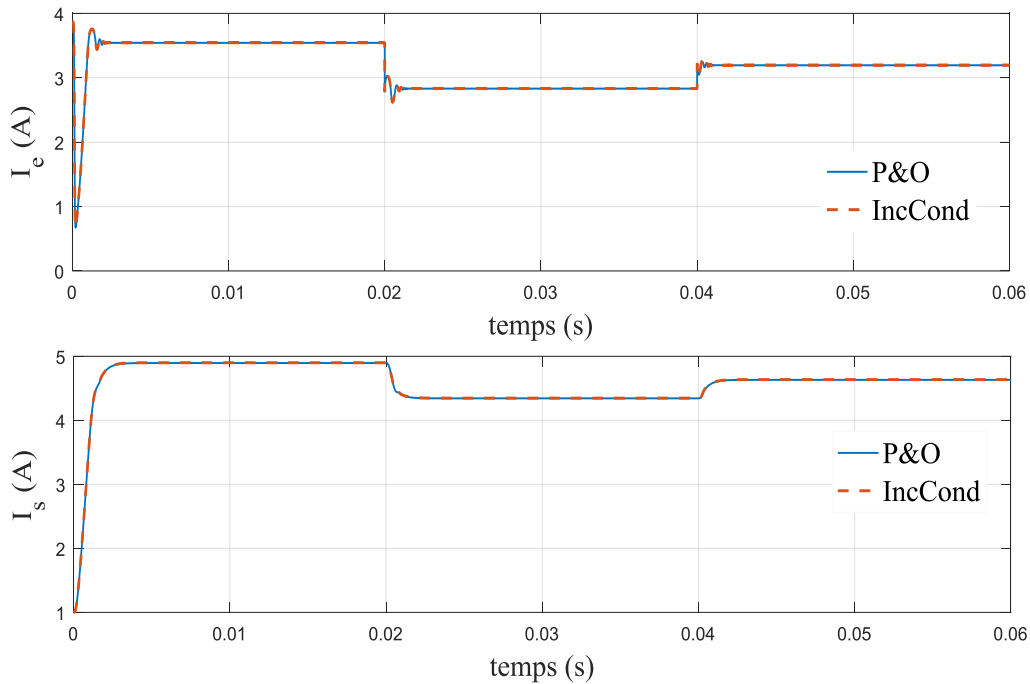


Figure III.23 – Évolution des courants d’entrée $I_e(t)$ et de sortie $I_s(t)$ en BF

III.4.3 Discussion des résultats

D’après les résultats de simulation obtenus, on remarque que :

- La variation de l’éclairement provoque une légère variation de la tension d’entrée du convertisseur tandis que l’augmentation du courant est importante. La faible variation de la tension d’entrée est justifiée par le point de fonctionnement imposé par la commande MPPT qui garantit un fonctionnement autour du PPM.
- L’algorithme P&O a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il a permis de déterminer le point de puissance maximale pour différentes valeurs d’ensoleillement. Cependant, il possède les inconvénients suivants :
 - L’oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales. Ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d’incrémentacion comme dans cette simulation ($\Delta\alpha = 0.001$) mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.
 - Dans le cas d’une diminution brutale de l’ensoleillement on aura une diminution de la puissance du panneau, l’algorithme réagit comme si cette diminution est produite par l’effet de perturbation précédente, alors il continue

dans la même direction, qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale.

- On remarque que la commande IncCond, donne les mêmes résultats que la méthode P&O, par contre on voit que la puissance ne présente pas de pertes, donc la méthode IncCond permet aussi de rechercher le point de puissance maximale fidèlement.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les techniques de commandes MPPT les plus utilisées. Deux méthodes ont été présentées : la méthode « Perturb and Observe » (P&O) et la méthode « Incrément de Conductance » (IncCond). Dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport aux variations climatiques, plus précisément l'éclairement, nous avons simulé le système photovoltaïque pour différentes valeurs de l'ensoleillement. Les résultats de simulation montrent que le système est stable, et les méthodes P&O et IncCon lui ont permis de fonctionner au PPM même face aux changements de l'éclairement.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. L'intérêt de cette commande ne cesse d'augmenter en raison de sa simplicité d'élaboration et ses multiples applications dans l'automatique ou de l'électronique de puissance. Le but de cette commande est de rendre le fonctionnement du système au voisinage du PPM.

IV.2 Systèmes à structures variables

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(x) & \text{si la condition 1 est vérifiée} \\ \vdots & \\ f_n(x) & \text{si la condition n est vérifiée} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Où f_i sont des fonctions appartenant à un ensemble de sous-systèmes.

IV.3 Théorie des modes glissants

Dans les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle il se produit, est dit mouvement de glissement. Cette commande est appliquée aux systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas de deux modes de fonctionnement $n = 2$) [Loucif, 2016]:

$$\dot{x} = f = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{si } S(x, t) > 0 \\ f^-(x, u^-) & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Les champs de vecteurs de la loi de commande u^+ et u^- sont définis par :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x, t) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

Où $S(x, t)$ est la surface de commutation (ou de glissement).

La surface de commutation S_0 est définie comme suit :

$$S_0 = \{x(t)/S(x, t) = 0\} \quad (\text{IV.4})$$

IV.4 Principe de la commande par mode glissant

La technique de la commande par modes glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes Figure IV.1 :

- **Mode de convergence (MC)**

Dans le mode de convergence (reaching mode), la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial x_0 dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- **Mode de glissement (MG)**

Pour le mode de glissement (sliding mode), la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x)$.

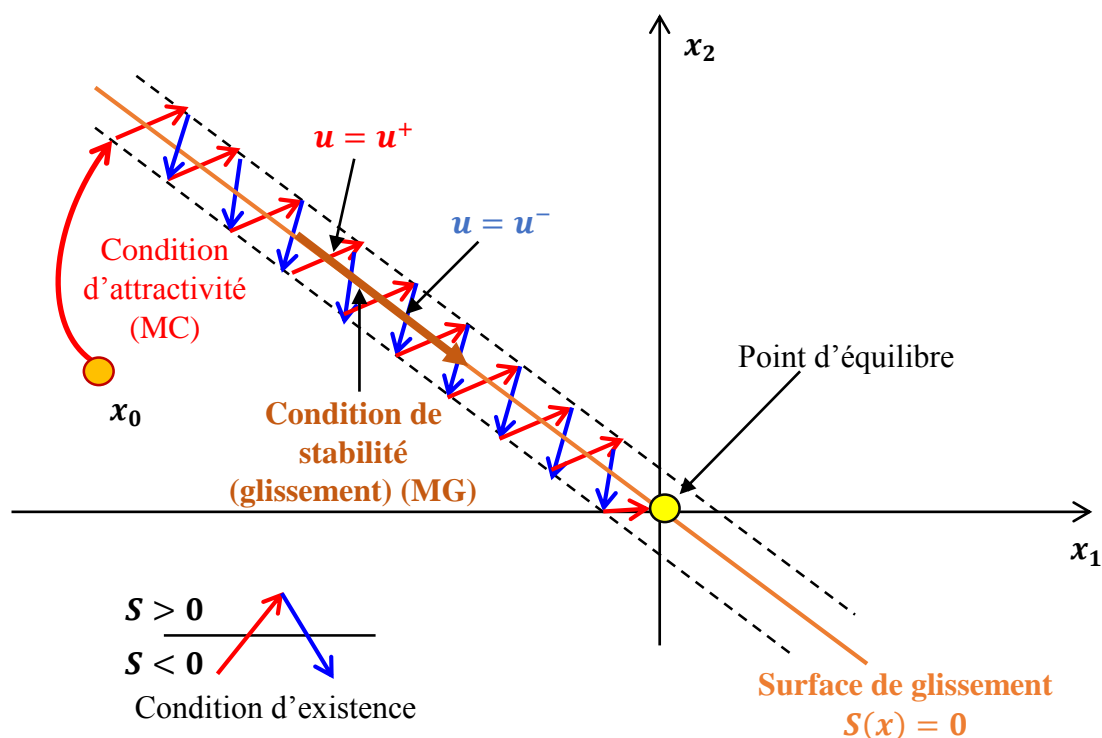


Figure IV.1 – Principe de la commande par mode glissant

Théorème 1 [Loucif, 2016] : Soit $V(x)$ une fonction dite fonction de Lyapunov qui vérifie les conditions suivantes :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 & \forall x \neq 0 \\ \dot{V}(x) \leq 0 & \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Si ces trois conditions sont satisfaites, $x = 0$ est un point d'équilibre stable. Si de plus $\dot{V}(x) < 0$ (strictement négative) pour $\forall x \neq 0$, le point $x = 0$ est asymptotiquement stable.

La fonction de Lyapunov est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. Elle peut prendre la forme suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV.6})$$

Ainsi, sa dérivée vérifie l'équation suivante :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (\text{IV.7})$$

IV.5 Conception de la commande par mode de glissement

La conception de la commande par mode glissant passe par trois étapes principales et complémentaires :

- Choix de la surface de glissement $S(x)$,
- Établissement des conditions d'existence de la convergence,
- Détermination de la loi de commande u .

IV.5.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaires. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (\text{IV.8})$$

La surface $S(x)$ représente le comportement dynamique désiré du système. Une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée est donnée par [Belkaid, 2015] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \beta \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

- $e(x)$: écart de la variable à régler $e(x) = x_{ref} - x$,
- β : constante positive,
- r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande. Ainsi, on trouve :
 - ✓ pour $r = 1$, $S(x) = e(x)$,
 - ✓ pour $r = 2$, $S(x) = \beta e(x) + \dot{e}(x)$.
- $S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

IV.5.2 Condition d'existence du glissement

Cette condition représente le critère permettant à la dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester même face aux perturbations. Cela est assuré quand la fonction de Lyapunov est décroissante. Ainsi, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative ce qui est équivalent à :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV.10})$$

IV.5.3 Calcul de la loi de commande : Méthode de la commande équivalente

Après le choix de la surface de glissement et du critère de convergence, il faut déterminer la commande nécessaire qui a pour but de ramener la variable à contrôler vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre une valeur maximale u^+ et une valeur minimale u^- en fonction du signe de la surface de glissement (figure IV.2). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées 'broutement' ou 'Chattering' apparaissent dans le mode de glissement.

La structure d'un contrôleur par mode glissant comporte deux parties :

- Une commande discontinue en fonction du signe de la surface de glissement u_n ;
- Une commande dite équivalente u_{eq} caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement.

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{IV.11})$$

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.8).

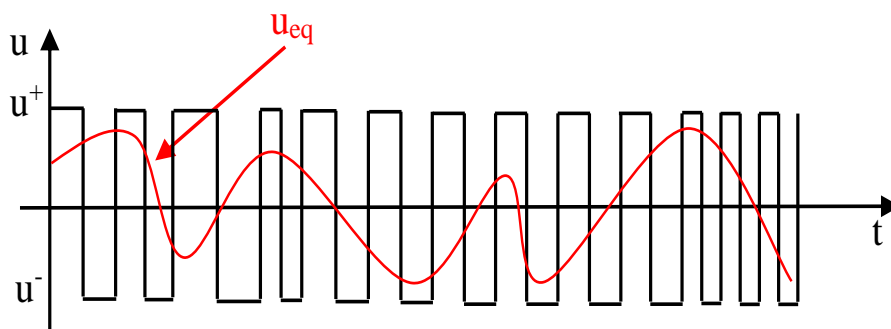


Figure IV.2 – Commande équivalente

IV.5.3.1 Commande équivalente u_{eq}

La commande équivalente u_{eq} est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement. Elle peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre u^+ et u^- .

À partir de (IV.8), (IV.11), nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n \quad (IV.12)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle ($\dot{S}(x) = 0$ car la surface est égale à zéro). Cette condition permet de déterminer la commande équivalente :

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right), \quad u_n = 0 \quad (IV.13)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur tirée de l'équation (IV.13) dans l'équation (IV.12). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n \quad (IV.14)$$

IV.5.3.2 Commande discontinue u_n

La commande u_n est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et satisfaire la condition de convergence donnée par l'équation (IV.10) ($S(x) \dot{S}(x) < 0$). Ainsi, à partir de l'équation (IV.14), le problème revient à trouver u_n tel que :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n < 0 \quad (IV.15)$$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est donnée par la fonction signe illustrée sur figure IV.3.

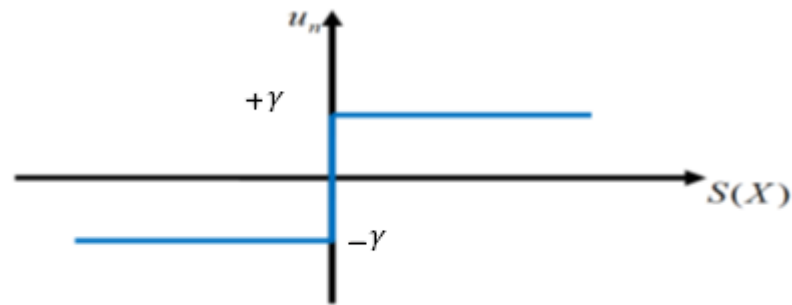


Figure IV.3 – Représentation de la fonction " Signe "

Dans ce cas, la commande u_n s'écrit comme suit :

$$u_n = \gamma \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (\text{IV.16})$$

En remplaçant l'expression (IV.16) dans (IV.15), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \cdot \gamma \cdot \text{sign}(S(x)) < 0 \quad (\text{IV.17})$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité (IV.17), le signe du gain γ doit être opposé au signe du facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$.

IV.6 Phénomène de broutement

En mode de glissement, la commande discontinue u_n commute entre deux valeurs ($\pm\gamma$) à une fréquence théoriquement infinie. Ceci est impossible à réaliser en vue de la présence d'un temps de retard pour le calcul de la commande. Par conséquent, ces oscillations à hautes fréquences se produisent, ce phénomène est dit phénomène de broutement (phénomène de Chattering ou de réticence).

Les réticences sont l'inconvénient majeur de la technique de commande par mode glissant. En effet, dans ce mode, la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le long de la surface, mais elle tend à osciller au voisinage de celle-ci. Ceci est néfaste pour le bon fonctionnement du système, en particulier pour les éléments d'électronique de puissance.

Le choix du gain γ de la fonction signe (IV.16) est très influant et peut minimiser ces oscillations :

- Si γ est très petit, les oscillations seront faibles par contre le temps de réponse sera long ;
- Si γ est très grand, nous aurons un temps de réponse petit mais des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande qui peuvent détériorer l'organe de commande.

IV.7 Réduction du phénomène de broutement

Différentes méthodes ont été développées dans la littérature pour réduire le broutement. Puisque, le problème de broutement est dû au terme discontinu (u_n) de la commande, précisément la fonction discontinue « $sign(S(x))$ », ces méthodes sont basées sur le remplacement de cette fonction par d'autres fonctions continues qui l'approximent comme la fonction de saturation (figure IV.4) et la fonction Smooth (figure IV.5).

IV.7.1 Fonction saturation (Sat)

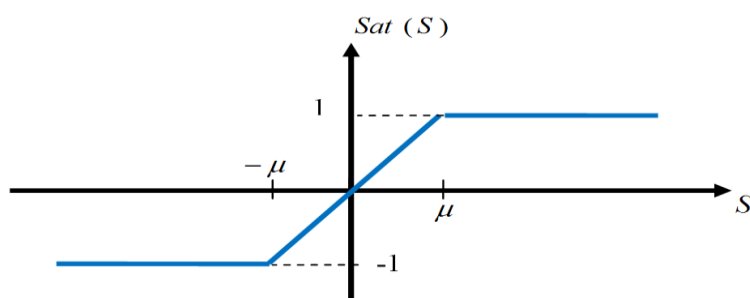


Figure IV.4 – Fonction saturation

La fonction saturation est donnée par :

$$\begin{cases} Sat(S) = 1 & \text{si } S > \mu \\ Sat(S) = -1 & \text{si } S < -\mu \\ Sat(S) = \frac{S}{\mu} & \text{si } S < |\mu| \end{cases} \quad (\text{IV.18})$$

Où μ est un paramètre petit et positif.

IV.7.2 Fonction smooth

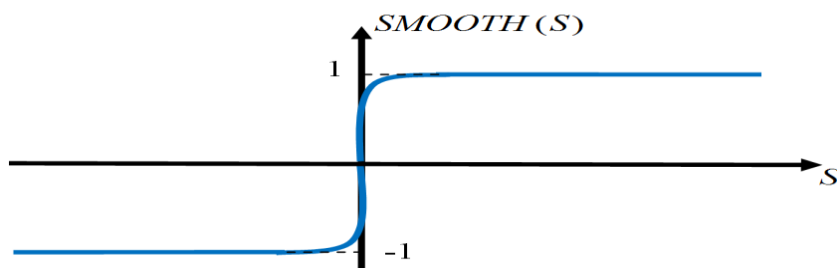


Figure IV.5 – Fonction Smooth

La fonction smooth est donnée par :

$$Smooth(S) = \frac{S}{S + \mu} \quad (\text{IV.19})$$

IV.8 Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque étudié dans notre mémoire est donné par (III.8) :

$$\begin{cases} \dot{V}_e = \frac{1}{C_1} I_e - \frac{\alpha}{C_1} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{\alpha}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{cases} \quad (IV.20)$$

Il peut être réécrit sous la forme (IV.8) où :

$$f(x, t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} I_e \\ -\frac{1}{L} V_s \\ \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{bmatrix}, g(x, t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1} I_L \\ \frac{1}{L} V_e \\ 0 \end{bmatrix}, u = \alpha = \alpha_{eq} + \alpha_n, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_e \\ I_L \\ V_s \end{bmatrix} \quad (IV.21)$$

IV.8.1 Choix de la surface de glissement

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, la condition du point de puissance maximale PPM est donnée par :

$$\frac{dP_e}{dV_e} = 0 \quad (IV.22)$$

La première étape de la conception de la commande par mode glissant consiste à choisir la surface de glissement. Puisque la commande MPPT a pour objectif de faire fonctionner le système photovoltaïque à son point de puissance maximale, $S(x)$ est choisie de la façon suivante :

$$S(x) = \frac{dP_e}{dV_e} = I_e + \frac{dI_e}{dV_e} V_e \quad (IV.23)$$

L'expression (II.23) donne la relation entre le courant I_e et la tension V_e . Pour qu'on puisse rendre utile cette expression, on fait quelques hypothèses simplificatrices.

Dans le cas idéal, R_s étant négligeable, l'expression (II.23) devient :

$$I_e = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_e}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (IV.24)$$

En court-circuit, $V_e = 0$ et $I_e = N_p I_{cc}$, on remplace dans (IV.24), on aura :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (IV. 25)$$

Où I_{cc} est le courant de court-circuit du module PV.

Si on suppose que $\exp\left(\frac{V_e}{nV_T}\right) \gg 1$, on peut écrire :

$$I_e = N_p I_{cc} - N_p I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_e}{nV_T}\right) \right) \quad (IV. 26)$$

En circuit ouvert, $I_e = 0$ et $V_e = N_s V_{co}$. On remplace dans (IV. 26), on aura

$$I_{sat} = I_{cc} \left(\exp\left(\frac{-N_s V_{co}}{nV_T}\right) \right) \quad (IV. 27)$$

En remplaçant (IV.27) dans (IV.26), on aura une nouvelle expression du courant I_e .

$$I_e = N_p I_{cc} - N_p I_{cc} \exp\left(\frac{V_e - N_s V_{co}}{nV_T}\right) \quad (IV. 28)$$

Ainsi, la dérivée du courant par rapport à la tension est donnée par :

$$\frac{dI_e}{dV_e} = -\frac{N_p I_{cc}}{nV_T} \exp\left(\frac{V_e - N_s V_{co}}{nV_T}\right) \quad (IV. 29)$$

Substituant (IV.28) et (IV.29) dans (IV.23) on trouve :

$$S(x) = \frac{dP_e}{dV_e} = I_e + \frac{dI_e}{dV_e} V_e = N_p I_{cc} - \left(N_p I_{cc} + \frac{N_p I_{cc}}{nV_T} \right) \exp\left(\frac{V_e - N_s V_{co}}{nV_T}\right) \quad (IV. 30)$$

IV.8.2 Détermination de la commande équivalente

Pour déterminer la condition de stabilité sur la surface de glissement, on se sert de la notion de la commande équivalente. En utilisant les conditions d'invariance $S(x) = 0$ et $\dot{S}(x) = 0$, on calcule l'expression de la commande équivalente u_{eq} donnée par (IV.13) :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial S}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \frac{\partial S}{\partial x_3} \dot{x}_3 \quad (IV. 31)$$

L'expression (IV.30) montre que $S(x)$ est fonction de V_e et non de I_L et V_s , alors on peut écrire:

$$\frac{\partial S}{\partial x_2} = \frac{\partial S}{\partial x_3} = 0 \text{ et } \frac{\partial S}{\partial x_1} \neq 0 \quad (IV. 32)$$

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 = 0 \quad (IV. 33)$$

D'où :

$$\dot{x}_1 = \dot{V}_e = \frac{I_e}{C_1} - \frac{I_L}{C_1} u_{eq} = 0 \quad (IV.34)$$

Donc, l'expression de la commande équivalente est la suivante :

$$u_{eq} = \frac{I_e}{I_L} \quad (IV.35)$$

On conclut que le régime de glissement existera si le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue (MCC) ($I_L > 0$).

IV.8.3 Détermination de la commande discontinue

Une approche de commande explicite doit être formulée pour amener la trajectoire sur la surface de glissement pendant le mode de convergence. Cette approche est appelée la loi d'atteinte. La loi d'atteinte à taux constant donnée par :

$$u_n = -\gamma \text{sign}(S(x)) \quad (IV.36)$$

Cette approche de contrôle s'appelle : la commande par mode glissant équivalente à taux constant.

IV.8.4 Détermination de la loi de commande

La loi de commande regroupe les deux composantes u_{eq} et u_n . Par conséquent, elle est donnée par :

$$u = u_{eq} - \gamma \cdot \text{sign}(S(x)) = \frac{I_e}{I_L} - \gamma \cdot \text{sign}\left(I_e + \frac{dI_e}{dV_e} V_e\right) \quad (IV.37)$$

IV.8.5 Vérification de l'existence du mode glissant

Pour que la surface $S(x) = 0$ soit attractive sur tout le domaine de fonctionnement, il suffit que la dérivée par rapport au temps de la fonction de la Lyapunov $V(x)$ soit négative (condition suffisante appelée : condition d'attractivité ou d'atteignabilité) :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x) S(x) < 0 \quad \forall x \neq 0 \quad (IV.38)$$

Pour démontrer ce théorème d'existence du mode de glissement, on considère les deux zones de la figure IV.6. À partir de (IV.30), on calcule la dérivée de $S(x)$

$$\dot{S}(x) = -\left(2 \frac{V_e}{n V_T}\right) \frac{N_p I_{cc}}{n V_T} \exp\left(\frac{V_e - N_s V_{co}}{n V_T}\right) \frac{dV_e}{dt} \quad (IV.39)$$

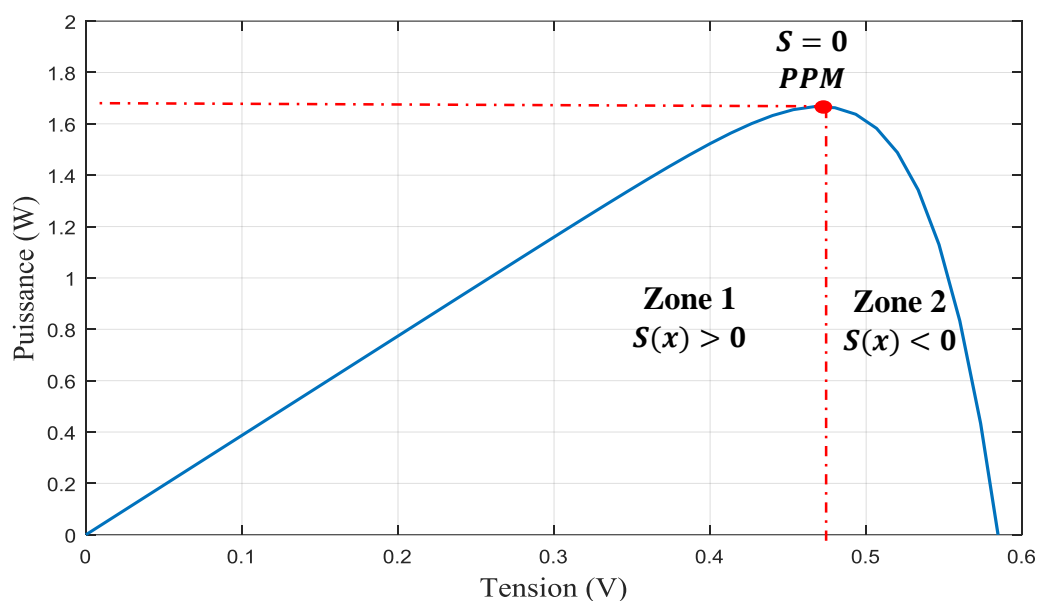


Figure VI.6 – Caractéristique $P - V$ typique

- **Zone 1 : $S(x) > 0$**

Si le PF se situe dans la zone 1, la tension doit être augmentée pour atteindre le PPM. Cela signifie que $\frac{dv_e}{dt} > 0$. En remplaçant dans (IV.39), on aura $\dot{S}(x) < 0$, ce qui implique que $\dot{S}(x) s(x) < 0$.

- **Zone 2 : $S(x) < 0$**

Si le système fonctionne dans la zone 2, la tension doit être diminuée pour atteindre le PPM. Cela signifie que $\frac{dv_e}{dt} < 0$. En remplaçant dans (IV.39), il vient que $\dot{S}(x) > 0$, ce qui implique que $\dot{S}(x) s(x) < 0$.

On conclut que le mode de glissement existe et que le système est asymptotiquement stable, quel que soit la localisation du PF. La loi de commande appliquée oblige la trajectoire du système de se déplacer à partir de n'importe quel état initial de la surface de glissement en un temps fini, et par la suite, de rester sur elle.

IV.9 Résultats de simulation

Pour les conditions initiales $[V_e \ I_L \ V_s] = [15 \ 1 \ 7]$, $C_1 = 15\mu F$, $C_2 = 20\mu F$, $L = 5mH$ et $R = 5\Omega$, une température constante $T = 25^\circ C$, et l'éclairement qui change : $G = 1000W/m^2$ pour $t \in [0 \ 0.02]$, $G = 800W/m^2$ pour $t \in [0.02 \ 0.04]$, et $G = 900W/m^2$ pour $t \in [0.04 \ 0.06]$. Les réponses du système en appliquant la commande MPPT par mode glissant sont données sur les figures IV.7-IV.10. On notera MG1 la commande par mode glissant avec la fonction signe et MG2 avec la fonction saturation avec $\mu = 1$.

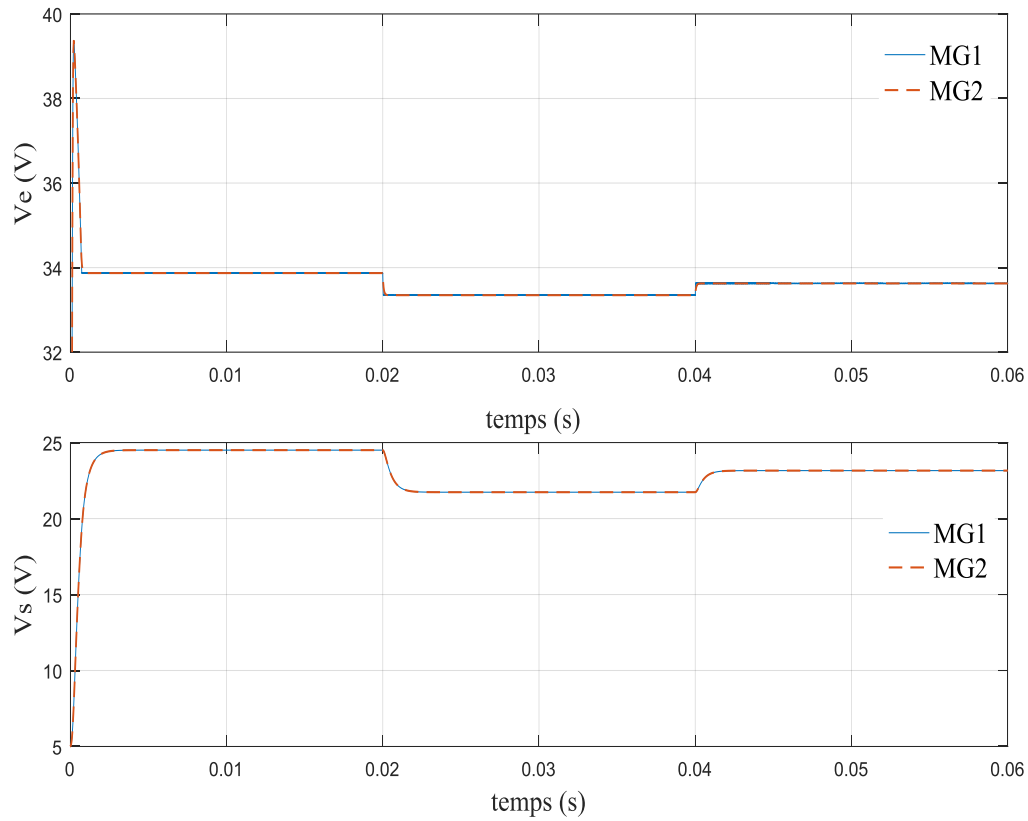


Figure IV.7 – Évolution de la tension de GPV $V_e(t)$ et de la tension de sortie $V_s(t)$

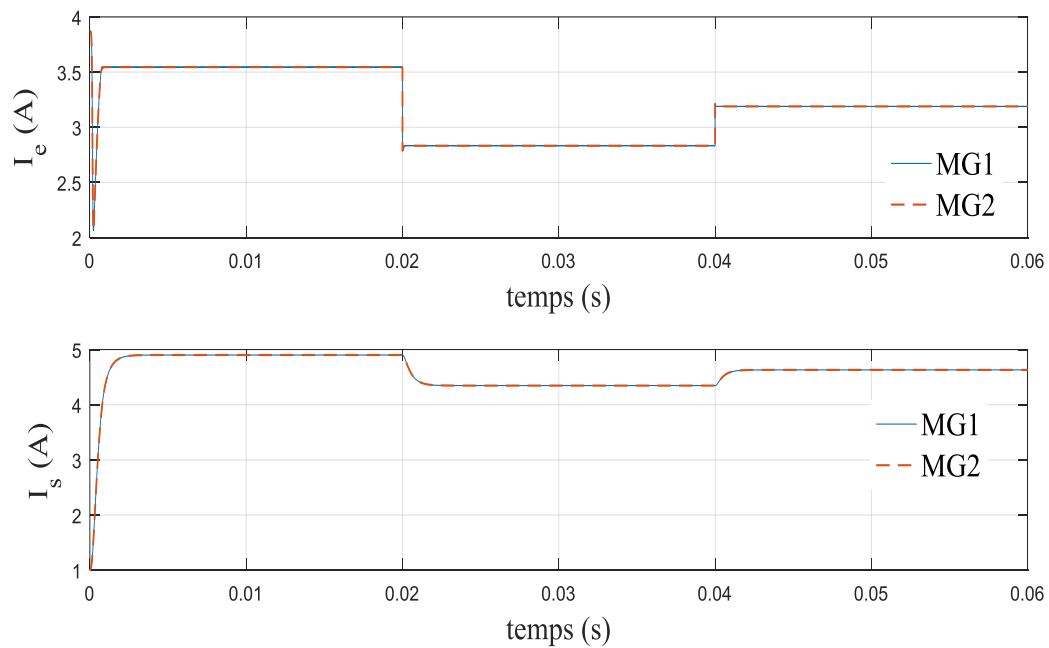


Figure IV.8 – Évolution du courant du GPV $I_e(t)$ et du courant de sortie $I_s(t)$

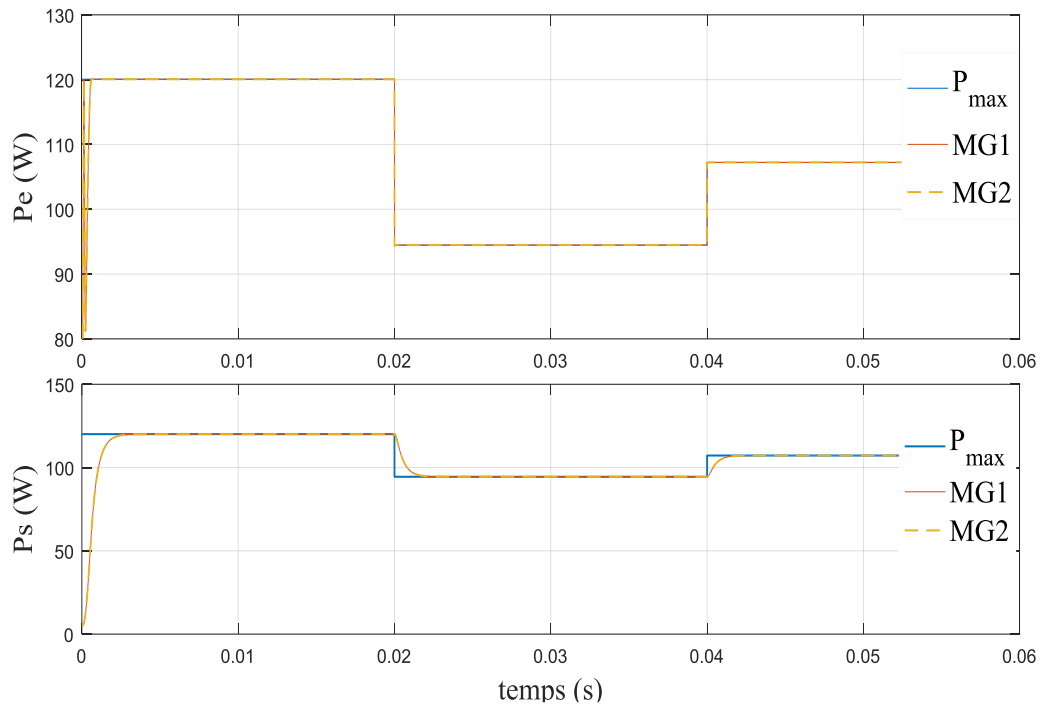


Figure IV.9 – Évolution de la puissance d'entrée $P_e(t)$ et de sortie $P_s(t)$

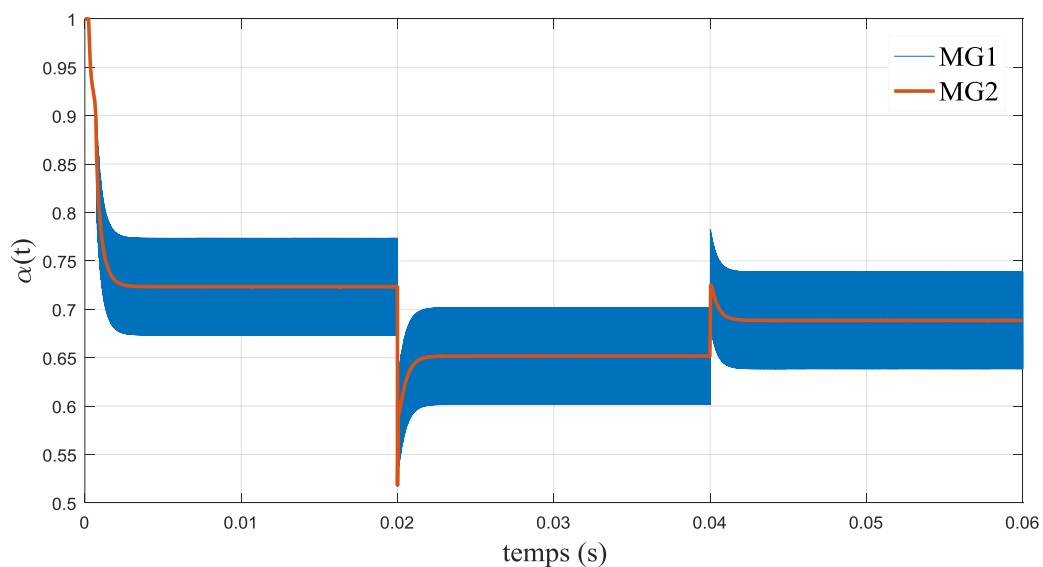


Figure IV.10 – Évolution de la commande $\alpha = u$

IV.10 Discussion des résultats

D'après les résultats de simulation obtenu on remarque que :

- Pour les deux commandes MG1 et MG2, le système photovoltaïque finit toujours par rejoindre son PPM à chaque changement de l'éclairement, et ce, après un régime transitoire.

- Le phénomène des réticences est très clair dans la figure IV.10 pour MG1. Ainsi, la commande MG2 qui a fait appel à la fonction saturation au lieu de la fonction signe l'a considérablement minimisé.

IV.11 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque que nous étudions. Comparant avec la méthode P&O, cette commande est très robuste et permet au système de rejoindre son PPM rapidement même face aux changements rapides de l'éclairement.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque autonome. L'énergie produite est utilisée pour alimenter des charges à courant-continu à travers un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur est appelé convertisseur de Buck.

Premièrement, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques et le potentiel solaire en Algérie.

Ensuite, nous avons élaboré ; en détail ; la synthèse du modèle mathématique de chaque organe constituant le système photovoltaïque, à savoir les générateurs photovoltaïques et les hacheurs. Nous nous sommes ensuite intéressés aux techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT qui permettent d'assurer le fonctionnement du système photovoltaïque au PPM. Deux méthodes conventionnelles ont été d'abord introduite : perturber et observer (P&O) et conduction incrémentale (IncCond). Nous avons remarqué que le problème de la technique P&O est la déviation du vrai point de puissance maximale lors d'un changement brusque de l'ensoleillement.

Finalement, à travers le dernier chapitre, on a présenté l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. Cette commande permet d'assurer un fonctionnement au PPM et une robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement. Cependant, le problème majeur de cette commande est le phénomène de réticence. Ce problème a été atténué en utilisant une version modifiée la commande par mode glissant qui consiste à remplacer la fonction discontinue signe par la fonction saturation, mais cela a nécessité un compromis avec le temps de réponse.

Les résultats de simulation exposés montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques.

Références bibliographiques

[**Abdilmoula, 2017**] M. Abdilmoula, « Phénomènes non linéaires et chaos dans les systèmes d'énergie renouvelable – Application à une installation photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2017.

[**Abouda, 2015**] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2015.

[**Ait-cheikh, 2007**] S. Ait-cheikh, « Étude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2007.

[**Belkaid, 2015**] A. Belkaid, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, 2015.

[**Bencherif, 2014**] M. Bencherif, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid -Tlemcen, 2014.

[**Bendjellouli, 2009**] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Thèse de doctorat, Université de BECHAR, 2009.

[**Boukli-Hacene, 2011**] O. Boukli-Hacene, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » ; Mémoire de magistère en Automatique productique informatique, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen 2011.

[**BP Solar, 2001**] BP Solar, BP SX120 – 120 W Multi-crystalline Photovoltaic Module Datasheet, 2001.

- [**Cabal, 2008**] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [**Chekirad, 2008**] F. Chekirad, « Étude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [**Dang, 2009**] MT. Dang, « élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2009.
- [**Diaf, 2009**] S. Diaf « Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2009.
- [**Faranda et Leva, 2008**]. R. Faranda and S. Leva, « Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems». WSEAS Transactions on Power Systems, 3, 446-455, 2008.
- [**Francisco, 2005**], M. Francisco and L. « Gonzalez Model of photovoltaic module in matlab », CIBELEC, 2005.
- [**Helali, 2012**] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque. Étude comparative » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.
- [**Loucif, 2016**] M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen, 2016.
- [**Madani, 2006**] M. Madani, « Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces », thèse de magister en physique, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen, 2006.
- [**Mekemeche, 2017**] A. Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis, Mostaganem, 2017.
- [**Motahhir et al, 2015**] S. Motahhir, A. El Ghzizal, et A Derouich « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM », CIGIMS 2015, EST de Fès, 2015.

[Obeidi, 2006] G. Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger 2006.

[Pétion, 2009] S. Pétion « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat, université de Toulouse 2009.

[Rezzouk, 2010] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université de Jijel 2010.

[Walker, 2000] G. Walker, « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane, 2000.