

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Réalisé par :

LAZREG SIRINE

BOUNABI ZOUINA ANFEL

Sujet

Commande MPPT-synergétique optimisée d'un système photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 30/06/2026, devant le jury composé de :

M. Khatir Abdelfateh	MCB	Univ-BBA	Président
M. Talhaoui Hicham	Pr	Univ-BBA	Examineur
M. Bouchama Ziyad	Pr	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Allah qui nous a accordé la réussite, l'aide, la force et la détermination nécessaires pour mener à bien ce modeste travail, À Lui reviennent toute louange et toute gratitude pour Ses innombrables bienfaits.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à notre encadrant le Professeur Docteur **Ziad Bouchama** pour ses orientations, son suivi et ses précieux conseils, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, pour avoir accepté de l'examiner et pour leurs remarques constructives qui contribueront à son enrichissement.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement tous les enseignants du Département des Sciences et de la Technologie pour les connaissances, l'encadrement et le savoir qu'ils nous ont transmis tout au long de notre formation universitaire.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail et nous ont apporté leur aide et leur soutien durant son élaboration.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts et la flamme de mon cœur, ma chère maman que j'adore. Merci pour ton amour inconditionnel, tes sacrifices, ta patience et ton soutien constant qui m'ont donné la force d'avancer et de réaliser ce travail.

À mon père, ma source de motivation et de force, pour ses efforts, sa présence constante et ses précieux conseils qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours et m'ont appris la persévérance.

À mes très chers frères Youcef et Haithem, qui occupent une place précieuse dans mon cœur.

À ma binôme Anfel, pour sa collaboration, son sérieux et les efforts que nous avons partagés tout au long de la réalisation de ce travail.

À mes amies et à mes camarades d'études, pour les moments partagés et l'entraide durant ces années universitaires.

Enfin, à toute ma famille et à mes proches, pour leur soutien moral et leur bienveillance.

Sirine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents, mon plus grand soutien. Aucune parole ne saurait exprimer toute ma gratitude, mon profond respect et mon immense affection envers eux. Merci pour tous vos sacrifices, votre amour inconditionnel et votre soutien constant. Que Dieu vous préserve et vous accorde santé et bonheur.

Mon frère et ma sœur, pour leur soutien, leur présence à mes côtés et les moments heureux que nous avons partagés qui ont contribué à ma réussite.

Ma binôme avec qui j'ai partagé cette expérience académique Sirine. Merci pour ton engagement, ta collaboration, ton soutien et tous les efforts que nous avons fournis ensemble pour mener à bien ce travail.

Tous mes amis ainsi que toute ma famille pour leurs encouragements, leur confiance et leur soutien tout au long de ce parcours.

Avec toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance.

Anfel

Résumé :

Ce mémoire propose d'étudier un contrôleur non linéaire synergétique (SNC) pour optimiser et déterminer efficacement le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque adapté à une charge via un convertisseur CC-CC de type Élévateur. L'équation dynamique du contrôleur synergétique conventionnel est modifiée afin d'ajuster la macro-variable synergétique et d'atteindre ainsi le point de puissance maximale optimal (PPM). Cette nouvelle approche, implémentée sous Matlab/Simulink, présente une convergence accrue en régime permanent et transitoire. Par conséquent, elle offre de meilleures performances que le contrôleur conventionnel par mode glissant (SMC) dans différentes conditions climatiques.

Mots clés : Système photovoltaïque (PV), Suivi du point de puissance maximale (MPPT), Convertisseur CC-CC Élévateur, Commande par mode glissant (SMC), Commande synergétique (SNC)

Abstract:

This thesis proposes to study a nonlinear synergistic controller (SNC) to optimize and efficiently determine the maximum power point (MPP) of a photovoltaic generator connected to a load via a DC-DC boost converter. The dynamic equation of the conventional synergistic controller is modified to adjust the synergistic macro-variable and thus achieve the optimal maximum power point (MPP). This new approach, implemented in Matlab/Simulink, exhibits increased convergence in both steady-state and transient regimes. Consequently, it offers better performance than the conventional sliding mode controller (SMC) under various climatic conditions.

Keywords: Photovoltaic system (PV), Maximum power point tracking (MPPT), DC-DC Boost converter, Sliding mode control (SMC), Synergistic control (SNC)

ملخص:

هذه المذكرة تهدف إلى دراسة متحكم لا خطي تآزري (SNC) من أجل تحسين وتحديد نقطة القدرة العظمى (MPP) بكفاءة لمولد كهروضوئي مرتبط بحمل عبر محول تيار مستمر-تيار مستمر من نوع رافع الجهد (Boost). تم تعديل المعادلة الديناميكية للتحكم التآزري التقليدي بهدف ضبط المتغير الكلي التآزري وتحقيق نقطة القدرة العظمى المثلى. وقد تم تنفيذ هذه المقاربة الجديدة باستخدام برنامج Matlab/Simulink ، حيث أظهرت تقارباً أسرع وأداءً أفضل في كل من النظامين الانتقالي والدائم. كما بينت نتائج المحاكاة أن هذه الطريقة توفر أداءً متفوقاً مقارنةً بمتحكم نمط الانزلاق التقليدي (SMC) تحت مختلف الظروف المناخية.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، تتبع نقطة القدرة العظمى، محول رافع الجهد، التحكم بنمط الانزلاق، التحكم التآزري.

Liste des nomenclatures et abréviations

Nomenclature

α : rapport cyclique.

β : Paramètre d'optimisation du contrôleur SNC.

B : facteur d'idéalité de la diode

C : Capacité du convertisseur Boost (F).

d : Rapport cyclique du convertisseur Boost.

D : Diode du convertisseur Boost.

ΔI : Variation du courant (A).

ΔP : Variation de la puissance (W).

ΔV : Pas de perturbation de la tension (V).

e : Erreur de poursuite.

E_{g0} : Énergie de bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule photovoltaïque (eV).

$f(x)$: Fonction non linéaire représentant la dynamique du système.

$g(x)$: Fonction de commande du système.

G : Irradiation solaire (W/m²).

G_0 : Irradiance solaire de référence (1000 W/m²)

I_L : Courant dans l'inductance (A).

I_D : Courant direct de la diode (A).

I_0 : Courant de saturation inverse (A).

I_{ph} : Courant photogénéré par la cellule photovoltaïque (A).

I_{PV} : Courant du générateur photovoltaïque (A).

I_{SH} : Courant de fuite (shunt) de la diode (A).

k : Gain de commutation.

K : Constante de Boltzmann (J/K).

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit (A/K)

L : Inductance du convertisseur Boost (H).

η : Rendement du convertisseur.

P_{PV} : Puissance du générateur photovoltaïque (W).

q : Charge de l'électron (C).

R : Résistance de charge (Ω).

R_{eq} : Résistance équivalente de charge (Ω).

R_p : Résistance photovoltaïque (Ω).

R_s : Résistance série de la cellule photovoltaïque (Ω).

R_{SH} : Résistance shunt intrinsèque (Ω).

S : Entrée de commande du système.

$S(\mathbf{x})$: Surface de glissement.

t : Temps (s).

t_r : Temps d'atteinte de la surface de glissement.

T : Température de la cellule photovoltaïque (K ou °C).

T_d : période de découpage.

T_r : Température de référence de la cellule (K).

u : Signal de commande.

u_{eq} : Commande équivalente.

$V(\mathbf{x})$: Fonction de Lyapunov.

V_C : Tension aux bornes du condensateur (V).

V_o : Tension de sortie du convertisseur (V).

V_{pv} : Tension du générateur photovoltaïque (V).

x : Vecteur d'état du système.

x_0 : État initial du système.

λ : Paramètre positif de conception de la surface de glissement.

τ : Constante de temps associée à la dynamique synergétique.

ψ : Macro-variable synergétique.

Abréviations

DC : Courant Continu (Direct Current).

DC-DC : Convertisseur Continu-Continu.

MPP : Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point).

MPPT : Suivi du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking).

PV : Photovoltaïque.

PVG : Générateur Photovoltaïque.

PWM : Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse Width Modulation).

SCT : Théorie de la Commande Synergétique (Synergetic Control Theory).

SMC : Commande par Mode Glissant (Sliding Mode Control).

SMC-MPPT : Commande par mode glissant pour la recherche du point de puissance maximale.

STC : Conditions Standard d'Essai (Standard Test Conditions).

Table des matières

CHAPITRE I : Modélisation et commande conventionnelle des systèmes photovoltaïques

I.1	Introduction	4
I.2	Définitions	4
I.2.1	Énergie	4
I.2.2	Energies renouvelables	4
I.2.3	Rayonnement solaire	4
I.2.4	Energie solaire photovoltaïque.....	5
I.3	Système photovoltaïque	5
I.3.1	Différents types de systèmes photovoltaïques	6
I.3.1.1	Système isolé ou autonome.....	6
I.3.1.2	Système raccordé au réseau	6
I.3.1.3	Systèmes hybrides	6
I.3.2	Principaux composants d'un système photovoltaïque	6
I.3.3	Avantages et inconvénients des systèmes PV	7
a)	Avantages	7
b)	Inconvénients.....	7
I.3.4	Modélisation du système photovoltaïque	7
I.3.5	Convertisseur DC/DC	8
–	Convertisseur élévateur (boost)	9
a)	Structure avec interrupteur fermé (MODE ON)	9
b)	Structure avec interrupteur ouvert (MODE OFF).....	10
•	Modèle d'état :.....	11
I.4	Commande des systèmes PV	11
I.4.1	MPPT (Maximum Power Point Tracking)	11
I.4.2	Méthodes MPPT	12
I.4.3	Algorithme conventionnel de conductance incrémentale (IC)	13
I.4.3.1	Avantages et inconvénients de la méthode IC	14
a)	Avantages	14
b)	Inconvénients	15
I.4.4	Algorithme Perturbation et Observation (P&O)	15
I.4.4.2	Avantages et Inconvénients de la méthode P&O	17
I.4.4.3	Influence du pas de perturbation ΔV sur les performances de l'algorithme P&O	17
I.5	Conclusion	19

CHAPITRE II : Commande MPPT par mode glissant

II.1	Introduction	21
II.2	Systèmes à structures variables	21
II.3	La commande par Mode glissant	21
II.4	Conception de la commande par mode de glissement	22
II.4.1	Surface de glissement	22
II.4.1.1	Mode de convergence (MC).....	22
II.4.1.2	Mode de glissement (MG)	22
II.4.1.3	Le mode du régime permanent (MRP).....	23
II.4.2	Méthode de la commande équivalente u_{eq}	23
II.5	La fonction de Lyapunov :.....	24
II.6	Synthèse de la commande SMC.....	25
II.7	Commande MPPT par mode glissant d'un système PV	28
II.8	Résultats de la simulation	31
	<i>Scénario 1</i>	31
	<i>Scénario 2</i>	33
	<i>Scénario 3</i>	35
II.9	Conclusion	37

CHAPITRE III : Commande MPPT synergétique d'un système photovoltaïque

III.1	Introduction :	39
III.2	Bref historique de la commande synergétique	39
III.2.1	Système non linéaire	39
III.2.2	Commande synergétique	40
III.2.3	Conception d'une loi de commande synergétique	40
III.2.4	Conception d'un contrôleur non linéaire synergétique (SCT)	41
III.2.5	Contrôleur non linéaire synergétique avancée (SNC).....	42
III.3	Résultat et discussion	43
	<i>Scénario 1</i>	47
	<i>Scénario 2</i>	48
	<i>Scénario 3</i>	50
	Synthèse des résultats.....	52
III.4	Analyse comparative des méthodes de suivi du point de puissance maximale	52
III.5	Conclusion	53

Liste des figures

CHAPITRE I : Modélisation et commande conventionnelle des systèmes photovoltaïques

Figure I.1 Panneau photovoltaïque.....	5
Figure I.2 Modèle électrique de la cellule PV.....	8
Figure I.3 Modèle de convertisseur élévateur.....	9
Figure I.4 Structure avec interrupteur fermé.....	9
Figure I.5 Structure avec interrupteur ouvert.....	10
Figure I.6 Principe de la commande MPPT.....	12
Figure I.7 Configuration globale d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT.....	12
Figure I.8 Principe de la méthode IC.....	13
Figure I.9 Organigramme de l'algorithme IC.....	14
Figure I.10 Diagramme de convergence vers le MPP utilisant P&O.....	15
Figure I.11 Organigramme de l'algorithme P&O.....	16
Figure I.12 Évolution de la puissance pour différentes valeurs de ΔV	17
Figure I.13 Évolution des tensions V_{pv} et V_o pour différentes valeurs de ΔV	18
Figure I.14 Évolution de courant I_{pv} pour différentes valeurs de ΔV	18
Figure I.15 Évolution du rapport cyclique D pour différentes valeurs de ΔV	18

CHAPITRE II : Commande MPPT par mode glissant

Figure II.1 Principe de la commande par mode glissant.....	23
Figure II.2 Commande équivalente.....	24
Figure II.3 Évolution de Puissance P_{pV} (scénario 1).....	32
Figure II.4 Évolution des tensions (scénario 1).....	32
Figure II.5 Évolution du courant I_{pV} (scénario 1).....	32
Figure II.6 Évolution du rapport cyclique d (scénario 1).....	33
Figure II.7 Évolution de Puissance P_{pV} (scénario 2).....	34
Figure II.8 Évolution des tensions (scénario 2).....	34
Figure II.9 Évolution du courant I_{pV} (scénario 2).....	34
Figure II.10 Évolution du rapport cyclique d (scénario 2).....	35
Figure II.11 Évolution de Puissance P_{pV} (scénario 3).....	35
Figure II.12 Évolution des tensions (scénario 3).....	36
Figure II.13 Évolution du courant I_{pV} (scénario 3).....	36
Figure II.14 Évolution du rapport cyclique d (scénario 3).....	36

CHAPITRE III : Commande MPPT synergétique d'un système photovoltaïque

Figure III.1 Caractéristiques I-V du système PV pour différentes valeurs d'éclairement.....	43
Figure III.2 Caractéristiques P-V du système PV pour différentes valeurs d'éclairement.....	44
Figure III.3 Schéma fonctionnel Simulink du SCT.....	45
Figure III.4 Schéma fonctionnel Simulink du SNC.....	46
Figure III.5 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{pV} (scénario 1).....	47
Figure III.6 Évolution des tensions (scénario 1).....	47

Figure III.7 Évolution du courant photovoltaïque I_{PV} (scénario 1)	48
Figure III.8 Évolution du rapport cyclique d (scénario 1).	48
Figure III.9 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{PV} (scénario 2).	49
Figure III.10 Évolution des tensions (scénario 2).	49
Figure III.11 Évolution du courant photovoltaïque I_{PV} (scénario 2).	49
Figure III.12 Évolution du rapport cyclique d (scénario 2).	50
Figure III.13 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{PV} (scénario 3).	50
Figure III.14 Évolution des tensions (scénario 3).	51
Figure III.15 Évolution du courant photovoltaïque I_{PV} (scénario 3).	51
Figure III.16 Évolution du rapport cyclique d (scénario 3).	51

Liste des tableaux

Tableau III.1 Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP MSX 60	44
Tableau III.2 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.	46

Introduction générale

Introduction générale

La pollution environnementale est un problème mondial persistant depuis plusieurs années et le besoin croissant en énergie propre demeure un défi permanent. Ce défi exige des moyens considérables pour développer différentes sources d'énergie renouvelables [1-3]. Ces sources d'énergie présentent l'avantage d'être économiques, abondantes, inépuisables et plus respectueuses de l'environnement. L'énergie solaire, parmi les énergies renouvelables les plus couramment utilisées et répondant généralement aux exigences précitées, offre une alternative écologique à la production classique d'électricité à partir de combustibles fossiles [3-4]. Malgré ces avantages, les performances des systèmes photovoltaïques (PV) restent souvent limitées, leur faible rendement de conversion énergétique dépendant de plusieurs facteurs tels que l'irradiation solaire, les variations de température, les fluctuations de charge et les caractéristiques physiques des modules PV.

Afin d'améliorer le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques dans diverses conditions de fonctionnement, de nombreuses stratégies de contrôle ont été développées, parmi lesquelles les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle primordial. Ces algorithmes garantissent une extraction de puissance optimale en ajustant en continu le point de fonctionnement du système photovoltaïque. Cependant, les techniques MPPT traditionnelles, telles que Perturber et Observer (P&O) et la conductance incrémentale (IC) [5-6], présentent un inconvénient majeur : à savoir les oscillations persistantes autour du point de puissance maximale.

Compte tenu de la nature non linéaire de la dynamique des systèmes photovoltaïques, des stratégies de commande non linéaires avancées et des méthodes de commande intelligentes ont été explorées pour pallier ces limitations. Parmi les techniques non linéaires, la commande par modes glissants (SMC) est reconnue pour sa robustesse et sa capacité à rejeter les perturbations [7]. Cependant, la SMC souffre d'oscillations à haute fréquence (broutement) susceptibles d'endommager les composants du système et de dégrader ses performances globales. Face à cet effet indésirable, la théorie de commande synergétique (SCT) est considérée comme une méthodologie puissante de conception de commande non linéaire. Sa facilité de mise en œuvre en pratique [8] met en avant cette approche de contrôle relativement nouvelle. La commande synergétique n'a évolué que ces dernières années ; similaire dans son approche conceptuelle à la

commande par mode glissant, elle s'en distingue par le fait que la commande y est toujours continue. Ce mémoire propose et évalue une stratégie de commande MPPT qui améliore à la fois les performances et la praticité du MPPT pour les systèmes photovoltaïques [8], et la principale contribution réside dans le développement d'une technique de commande MPPT synergétique pour l'optimisation du fonctionnement d'un système PV.

L'ensemble du travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est regroupé essentiellement en trois chapitres, en plus d'une introduction et d'une conclusion générales.

Le premier chapitre est consacré à l'introduction et à la modélisation des systèmes PV, tandis que le deuxième chapitre donne un aperçu de la commande par mode glissant et de son application à la commande d'un système PV. Le troisième chapitre est dédié à l'étude d'une nouvelle stratégie de commande synergétique dans le cadre de la conception d'un contrôleur MPPT robuste aux variations paramétriques et climatiques, surmontant les inconvénients inhérents à la commande SMC. Enfin, une conclusion générale résume le travail présenté dans ce mémoire et propose des perspectives pour des travaux futurs.

CHAPITRE I

*Modélisation et commande conventionnelle des
systèmes photovoltaïques.*

I.1 Introduction

La modélisation des systèmes photovoltaïques constitue une étape fondamentale pour l'analyse, la simulation et la conception de stratégies de commande robustes. Elle permet notamment de représenter les caractéristiques et le comportement dynamique de ces systèmes, ainsi que leur interaction lors du raccordement aux convertisseurs DC-DC et/ou au réseau électrique. Une telle représentation mathématique est indispensable pour le développement et l'évaluation des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), visant à optimiser l'extraction de l'énergie solaire. Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à la présentation des modèles mathématiques des systèmes photovoltaïques, ainsi qu'à l'étude de quelques méthodes de commande MPPT conventionnelles associées, à savoir la méthode par perturbation et observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IC).

I.2 Définitions

I.2.1 Énergie : L'énergie est la source ou le facteur déclencheur de toute modification ou altération constatée dans un système. On la définit souvent comme la capacité d'une force, qu'elle soit d'origine gravitationnelle, électromagnétique ou autre, à accomplir un travail. Du fait de la variété des forces en présence, l'énergie prend plusieurs formes. Dans le Système International (SI), son unité est le joule. [9]

I.2.2 Energies renouvelables : Il s'agit d'énergies qui ne s'épuisent pas avec le temps et qui sont disponibles en abondance. Elles ne génèrent pas d'émissions polluantes durant la phase d'exploitation, contribuant ainsi à combattre l'impact du changement climatique. Les cinq principales sources d'énergies renouvelables comprennent la géothermie, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque. [10]

I.2.3 Rayonnement solaire : Le soleil, à l'instar de toutes les étoiles génère son énergie par le biais de réactions de fusion nucléaire qui ont lieu en son noyau. L'énergie solaire est la source principale d'énergie naturelle accessible sur notre planète. Il a une influence cruciale sur divers phénomènes naturels et anthropiques, affectant de nombreux aspects de l'existence et de la société humaine. Ces effets incluent l'influence sur le climat, la croissance des plantes, la santé humaine, la conception architecturale, la production énergétique ainsi que l'usure et la détérioration des matériaux. Ainsi, la lumière du soleil est vitale pour préserver la vie et favoriser l'expansion des activités

humaines. [10]

I.2.4 Energie solaire photovoltaïque : Le mot « photovoltaïque » peut faire référence soit à l'effet physique (identifié par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) [10], soit à la méthode qui lui est liée. L'avantage de cette méthode est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. L'électricité photovoltaïque est l'énergie produite par la conversion d'une fraction du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, qui est produit à partir d'une matière première d'une pureté exceptionnelle. Malgré sa contribution minime à la production globale d'électricité (approximativement 2% en 2017 selon l'AIE) [10], le solaire photovoltaïque est promis à un avenir radieux grâce aux avancées anticipées, la réduction des coûts, sa facilité d'utilisation et son adaptabilité. Elle est capable de fonctionner en étant raccordée ou non à un réseau électrique, et peut ainsi subvenir aux besoins énergétiques d'un foyer (avec des capteurs installés sur le toit) ou d'une industrie.[10]

I.3 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque désigne un dispositif de production d'énergie électrique qui utilise des panneaux photovoltaïques comme source principale d'alimentation comme l'illustre-la (Figure I.1). Il repose sur la conversion directe du rayonnement solaire en électricité à travers l'effet photovoltaïque, permettant ainsi de générer une énergie propre et renouvelable.[11]



Figure I.1 Panneau photovoltaïque.

I.3.1 Différents types de systèmes photovoltaïques

I.3.1.1 Système isolé ou autonome

Un système photovoltaïque isolé fournit de l'électricité à l'utilisateur sans nécessiter de connexion au réseau électrique. C'est fréquemment la seule solution pour s'alimenter en électricité lorsque le courant du réseau est indisponible : les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne... Ce genre de dispositif requiert le recours à des batteries pour l'accumulation de l'énergie électrique et à un régulateur de charge afin de garantir la durabilité des batteries.[12]

I.3.1.2 Système raccordé au réseau

Par un système photovoltaïque connecté au réseau, on entend un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système facilite grandement la tâche du producteur et du consommateur, étant donné que c'est le réseau qui se charge d'ajuster l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Pour les systèmes branchés au réseau, il est essentiel de transformer le courant continu généré par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau électrique. Un onduleur est utilisé pour réaliser cette conversion. La performance habituelle d'un onduleur est approximativement de 95%. Il y a différentes puissances disponibles et les onduleurs sont spécialement fabriqués pour les applications liées au photovoltaïque.

L'onduleur est aussi doté d'une fonctionnalité de découplage du réseau qui empêche l'envoi de courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas opérationnel, ainsi que d'une fonction de protection contre les surtensions. [12]

I.3.1.3 Systèmes hybrides

Il est indépendant par rapport aux réseaux de fourniture d'électricité. À utiliser lorsque la demande d'énergie est élevée. C'est une association de deux technologies complémentaires ou plus pour améliorer la production d'énergie, à l'instar de la fusion de modules photovoltaïques avec des turbines éoliennes ou un générateur à combustible. Un système hybride photovoltaïque maximise l'usage conjoint de diverses sources d'énergies, qu'elles soient renouvelables ou fossiles, ainsi que des dispositifs de stockage associés. [12].

I.3.2 Principaux composants d'un système photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent du type d'application. Les principaux sont [13] :

- Panneaux photovoltaïques (Panneau solaire)

- Convertisseur DC-DC
- Système de stockage (batteries, condensateurs, ...)
- Système de commande MPPT.

I.3.3 Avantages et inconvénients des systèmes PV

a) Avantages

- Indépendance énergétique : Même sans raccordement au réseau électrique public.
- Économies financières : L'installation de panneaux solaires permet de réaliser d'importantes économies.
- Réduction des coûts énergétiques : Diminution significative des dépenses énergétiques.
- Génération de revenus supplémentaires : En vendant le surplus ou la totalité de l'électricité produite.
- Impact environnemental réduit : Une solution écologique qui minimise l'impact des activités et de la consommation d'énergie.
- Haute recyclabilité : Actuellement, 94 % des panneaux solaires sont recyclables.
- Facilité d'entretien. [14]

b) Inconvénients

- Coût d'investissement initial élevé
- Les systèmes d'énergie solaire dépendent des conditions météorologiques : sans soleil, les panneaux solaires ne fonctionnent pas
- La durée de vie des panneaux solaires est limitée (estimée à 30 ans, les panneaux les plus durables pouvant durer jusqu'à 50 ans)
- Impact visuel
- Pollution : comme pour tout produit, la fabrication des panneaux solaires nécessite de l'énergie et des ressources. [14]

I.3.4 Modélisation du système photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être représentée par un modèle électrique équivalent, comme le montre la (Figure I.2)

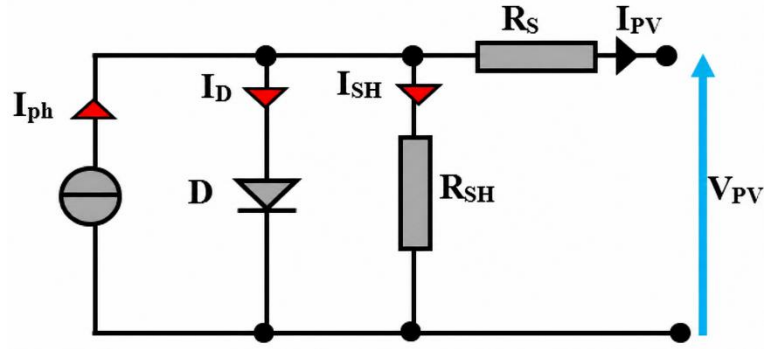


Figure I.2 Modèle électrique de la cellule PV.

On peut facilement déterminer le courant de sortie fourni par la cellule photovoltaïque en utilisant la deuxième loi de Kirchhoff comme suit :[8]

$$I_{PV} = I_{PH} - I_D - I_{SH} . \quad (I.1)$$

Le photocourant est donné par la formule :

$$I_{PH} = [I_0 + K_i(T - T_r)][G/G_0] \quad (I.2)$$

Le courant de saturation de la cellule PV dépend de la température et s'exprime comme suit :

$$I_D = I_0 \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{qE_{g0}}{BK} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} \quad (I.3)$$

$$\text{Avec : } I_0 = \frac{I_D}{\frac{qV_{oc}}{eN_sKaT} - 1}$$

En appliquant la première loi de Kirchhoff à la grille de sortie de (FigureI.2), le courant de shunt de la diode s'écrit :

$$I_{SH} = (V_{PV} + I_{PV}R_S)/R_{SH} \quad (I.4)$$

En substituant les équations (I.2), (I.3), (I.4) et (I.5) dans l'équation (I.1), on obtient l'expression littérale du courant fourni par la cellule PV (I_{PV}), tandis que I_0 est défini dans (l'équation (I.3)) :

$$I_{PV} = [I_0 + K_i(T - T_r)] \left[\frac{G}{G_0} \right] - I_0 \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{qE_{g0}}{BK} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} - (V_{PV} + I_{PV}R_S)/R_{SH} \quad (I.5)$$

I.3.5 Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC transforme la tension de la batterie ou du module en une autre tension DC afin de fournir l'énergie nécessaire à la charge. Il autorise la gestion de la puissance électrique dans des circuits à courant continu avec une grande flexibilité et une efficacité élevée.

On identifie trois sortes de convertisseurs : boost, buck-boost et buck. Dans notre recherche, nous avons opté pour le modèle boost : [15]

– Convertisseur élévateur (boost)

Le fonctionnement de ce convertisseur Boost se déroule comme suit : quand l'interrupteur T est fermé, l'inductance s'emplit et le courant I_L généré par le panneau solaire croît graduellement pendant $t \in [0, \alpha T_d]$. Lorsque T s'ouvre, l'interruption du flux de courant engendre une surtension. C'est là que la diode D entre en jeu, elle protège T en empêchant le retour du courant.

Le rôle du condensateur C_2 est de stabiliser la tension en sortie V_o . L'inductance L dégage une énergie qui s'additionne à celle provenant de la source pour fournir de l'énergie à la charge par le biais de la diode D durant $t \in [\alpha T_d, T_d]$ (Figure I.3). [15]

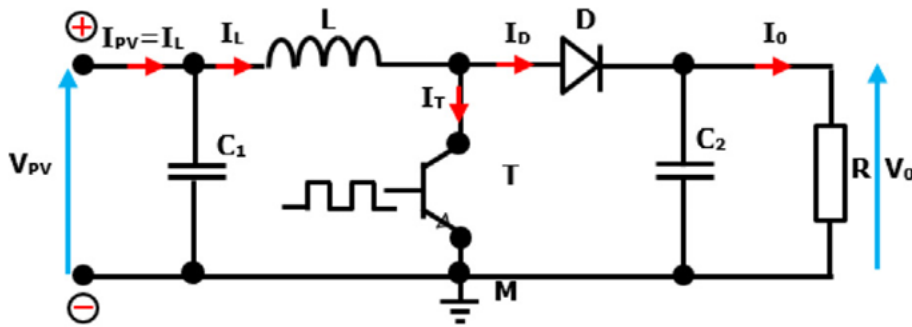


Figure I.3 Modèle de convertisseur élévateur.

a) Structure avec interrupteur fermé (MODE ON)

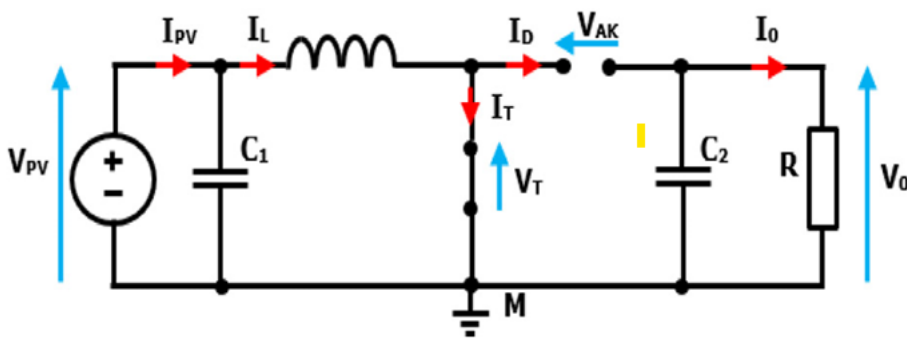


Figure I.4 Structure avec interrupteur fermé.

Dans cet état, l'interrupteur T est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), et la diode D est polarisée en inverse (la diode se comporte comme un circuit ouvert). Le courant I_L augmente exponentiellement à travers l'inductance L qui stocke de l'énergie électromagnétique. C2 est

déchargé, grâce à la diode de roue libre D, à travers la charge R. Le circuit équivalent est illustré sur (Figure I.4). [8]

D'après loi des mailles on a :

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (I.6)$$

Il en résulte que :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} \quad (I.7)$$

D'après loi des nœuds on a : $I = I_0 + I_C$

Où : $I_0 = -I_C$

Donc :

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{R_{C2}} \quad (I.8)$$

On en déduit que :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} \\ \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{R_{C2}} \end{cases} \quad (I.9)$$

b) Structure avec interrupteur ouvert (MODE OFF)

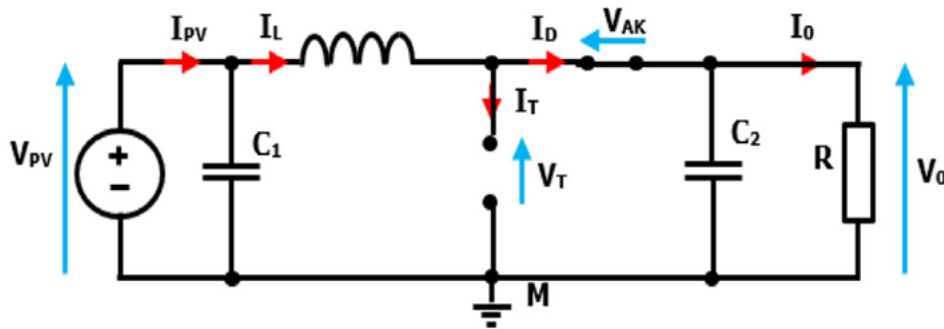


Figure I.5 Structure avec interrupteur ouvert.

L'interrupteur T est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$) et la diode D est polarisée en direct (la diode se comporte comme un court-circuit). Le condensateur C2 se décharge, grâce à la diode de roue libre D, à travers la charge R, comme illustré sur (Figure I.5). On peut en déduire que [8]

D'après loi des mailles on a

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_o \quad (I.10)$$

Alors

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} V_o \quad (I.11)$$

D'après loi des nœuds on a :

$$I_{PV} = I_L + I_{C1} \quad (I.12)$$

$$\text{Avec } I_L = I_D + I_T \quad I_D = I_0 + I_C \quad I_D = I_L = I_0 + I_{C2}$$

Où :

$$I_L = \frac{V_o}{R} + C_2 \frac{dV_o}{dt} \quad (I.13)$$

Donc :

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_o \quad (I.14)$$

Il en résulte que :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} V_o \\ \frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_o \end{cases} \quad (I.15)$$

- **Modèle d'état :**

Le modèle complet du convertisseur élévateur peut donc être exprimé par l'équation (I.22) :

$$\frac{dI_L}{dt} = d \left(\frac{1}{L} V_{PV} \right) + (1-d) \left(\frac{1}{L} (V_{PV} - V_o) \right) \quad (I.16)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = d \left(\frac{1}{L} V_{PV} \right) + \frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} V_o - d \frac{1}{L} V_{PV} + d \frac{1}{L} V_o \quad (I.17)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} (1-d) V_o \quad (I.18)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = d \left(-\frac{1}{RC_2} V_o \right) + (1-d) \left(\frac{I_L}{C_2} - \frac{V_o}{RC_2} \right) \quad (I.19)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -d \frac{V_o}{RC_2} + \frac{I_L}{C_2} - \frac{V_o}{RC_2} - d \frac{I_L}{C_2} + d \frac{V_o}{RC_2} \quad (I.20)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C_2} (1-d) I_L - \frac{1}{RC_2} V_o \quad (I.21)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} (1-d) V_o \\ \frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C_2} (1-d) I_L - \frac{1}{RC_2} V_o \end{cases} \quad (I.22)$$

Où d représente le rapport cyclique. [8]

I.4 Commande des systèmes PV

I.4.1 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technologie largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

Chaque panneau solaire possède un point de puissance maximale qui fluctue selon les conditions environnementales, comme l'ensoleillement (irradiation solaire) et la température. Le but principal du MPPT est de déterminer et de garder le système d'exploitation à ce point, dans l'objectif de maximiser la puissance extraite des panneaux solaires. [16]

(Figure I.6) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

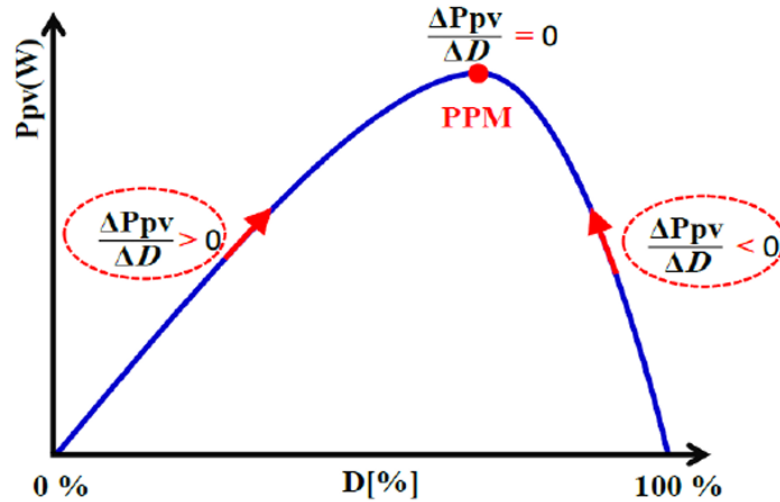


Figure I.6 Principe de la commande MPPT.

I.4.2 Méthodes MPPT

Les méthodes MPPT peuvent être classées en méthodes indirectes et directes. Quelle que soit la méthode utilisée, la configuration globale du système suit le schéma de la (Figure I.7).

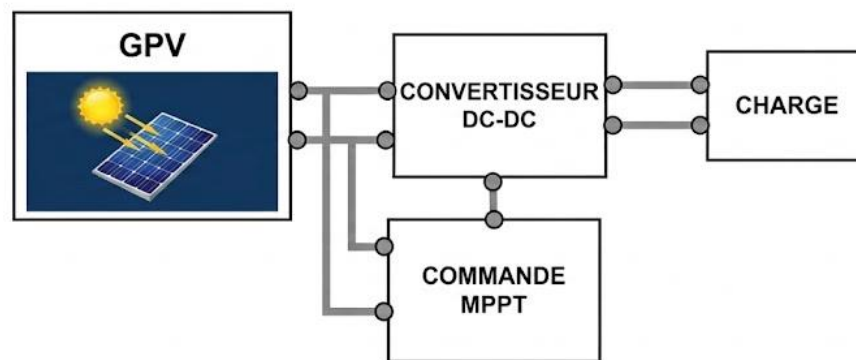


Figure I.7 Configuration globale d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT.

Les méthodes directes sont des méthodes qui reposent sur la mesure en temps réel de la tension et du courant des panneaux photovoltaïques, leur principe étant basé sur l'analyse des variations de ces grandeurs. L'un de leurs principaux avantages est qu'elles ne nécessitent aucune

connaissance préalable des caractéristiques du générateur PV. Parmi ces méthodes, on distingue notamment :

- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe) [16]

I.4.3 Algorithme conventionnel de conductance incrémentale (IC)

L'algorithme de l'incrémental de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du module PV. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance P de sortie par rapport à la tension V du module PV est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP) (Figure I.8). [17][18].

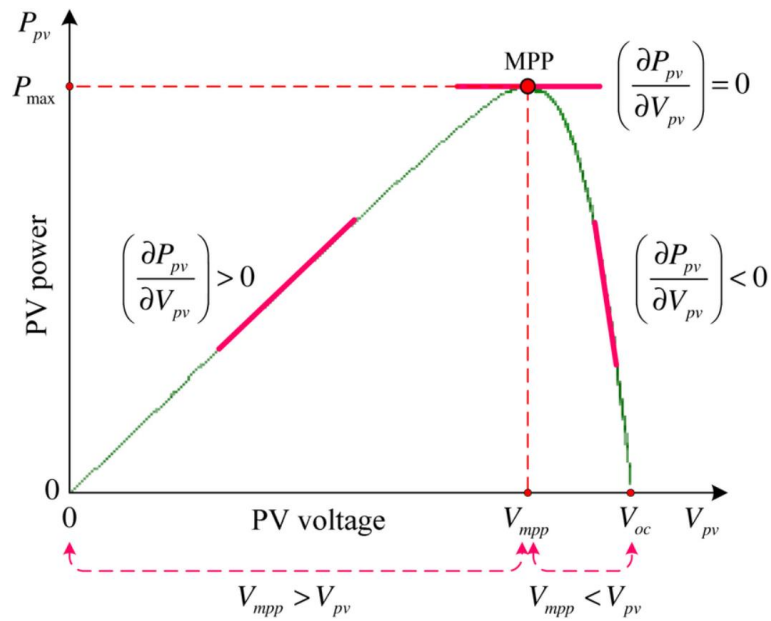


Figure I.8 Principe de la méthode IC.

Donc on a l'ensemble d'équations suivant : [19][20]

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire

$$P = V \cdot I \quad (I.23)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (I.24)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (I.25)$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} = 0 & \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{(a) Au point de MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \quad \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{(b) À gauche de MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \quad \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{(c) À droite de MPP} \end{aligned} \quad (I.26)$$

Les deux équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction du déplacement de points de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

L'organigramme correspondant à cet algorithme est illustré dans la (Figure I.9).

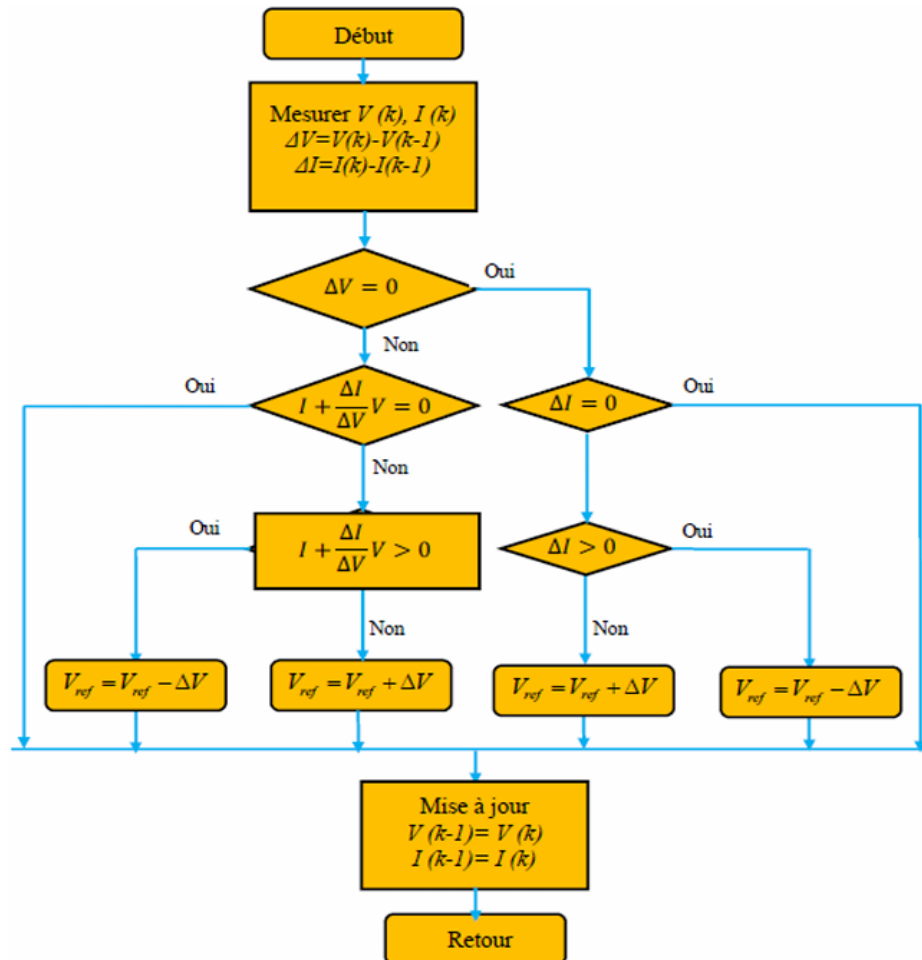


Figure I.9 Organigramme de l'algorithme IC

I.4.3.1 Avantages et inconvénients de la méthode IC

a) Avantages

- Plus précise que la technique P&O, en particulier dans des conditions environnementales changeantes.

- Permet de déterminer la position exacte du MPP (en vérifiant : $\frac{dP}{dV} = 0$)
- Diminution des fluctuations autour du point de puissance maximale une fois atteint.
- Performances optimisées lors de variations rapides d'éclairement.[21]

b) Inconvénients

- Plus compliqué à appliquer que la technique P&O.
- Exige des capteurs capables de mesurer avec précision les fluctuations de courant et de tension.
- Nécessite un peu plus de puissance de traitement.[22]

I.4.4 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV (Figure I.10). [21]

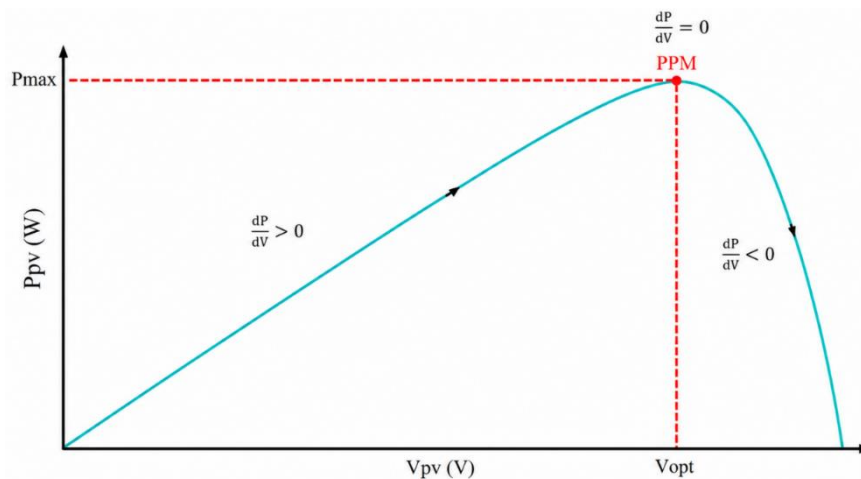


Figure I.10 Diagramme de convergence vers le MPP utilisant P&O

I.4.4.1 Description et mécanisme de l'algorithme P&O

Le principe de l'algorithme P&O repose sur l'application d'une petite perturbation à la tension ou au courant du système, suivie de la mesure de la puissance résultante :

- **Si la puissance augmente** : la perturbation est maintenue dans la même direction.
- **Si la puissance diminue** : la direction de la perturbation est inversée.

En d'autres termes, l'algorithme ajuste continuellement la tension dans le même sens tant que la puissance croît, et inverse sa trajectoire dès que la puissance commence à chuter. [22]

Pour concrétiser ce mécanisme, l'algorithme suit cycliquement les étapes successives suivantes : [22]

1. **Mesure initiale** : Évaluation de la tension et du courant générés par le panneau solaire afin de déterminer la puissance de sortie initiale.
2. **Perturbation** : Introduction d'une légère fluctuation volontaire de la tension (hausse ou baisse).
3. **Nouveau calcul et comparaison** : Réévaluation de la puissance après perturbation et comparaison avec l'ancienne valeur. Si la puissance actuelle dépasse l'ancienne, l'algorithme poursuit dans la même tendance ; sinon, il inverse le sens de la perturbation.
4. **Itération** : Répétition incessante de ce processus afin de maintenir le système au point de puissance maximale (MPP), tout en s'ajustant aux variations des conditions environnementales.

L'organigramme correspondant à cet algorithme est illustré dans la (Figure I.11).

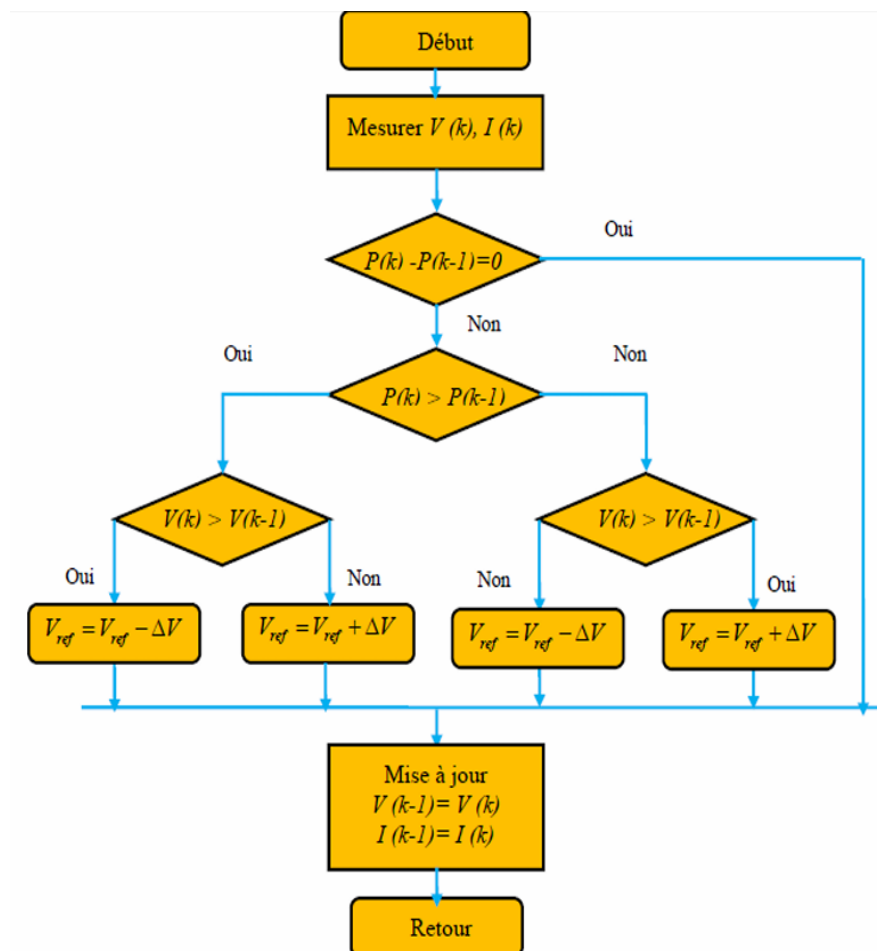


Figure I.11 Organigramme de l'algorithme P&O

I.4.4.2 Avantages et Inconvénients de la méthode P&O

a) Avantages

- Facile à mettre en pratique.
- Nécessite peu de puissance de calcul.
- Fréquemment employée dans les systèmes photovoltaïques.
- Aucune connaissance préalable en caractéristiques photovoltaïques n'est requise.[21]

b) Inconvénients

- Peut osciller autour du point de puissance maximale (MPP), notamment en régime permanent.
- Résultats insatisfaisants lors de changements rapides d'éclairement.
- Risque de se tromper en cas de fluctuation brusque d'éclairement.[21]

I.4.4.3 Influence du pas de perturbation ΔV sur les performances de l'algorithme P&O

Ces simulations ont été réalisées sous une irradiation de $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température de $T = 25^\circ\text{C}$ afin d'évaluer l'influence du pas de perturbation ΔV sur les performances de l'algorithme P&O. Deux valeurs ont été considérées : $\Delta V = 5 \times 10^{-5}$ et $\Delta V = 5 \times 10^{-4}$. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures (Figure (I.12), Figure (I.13), Figure (I.14), Figure (I.15)).

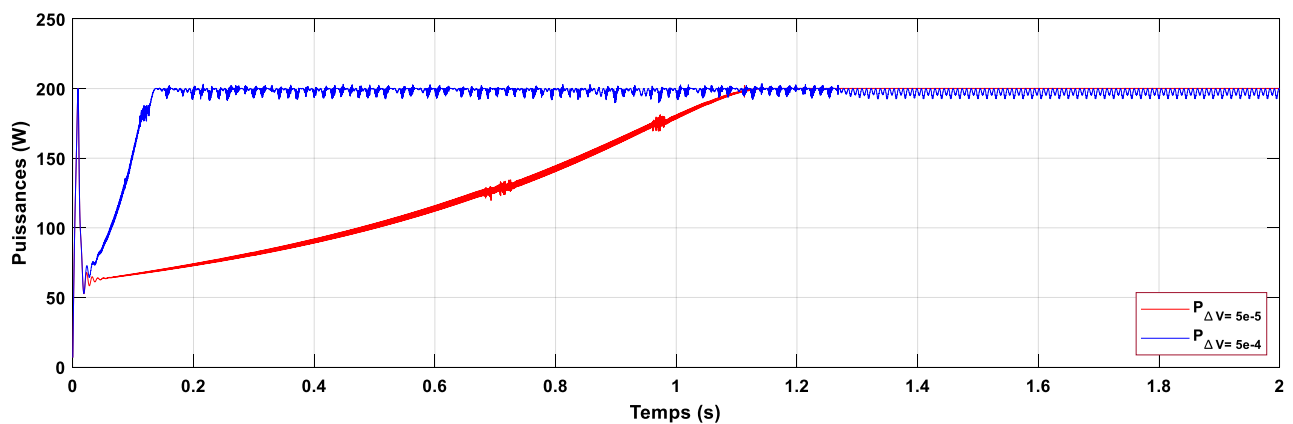


Figure I.12 Évolution de la puissance pour différentes valeurs de ΔV

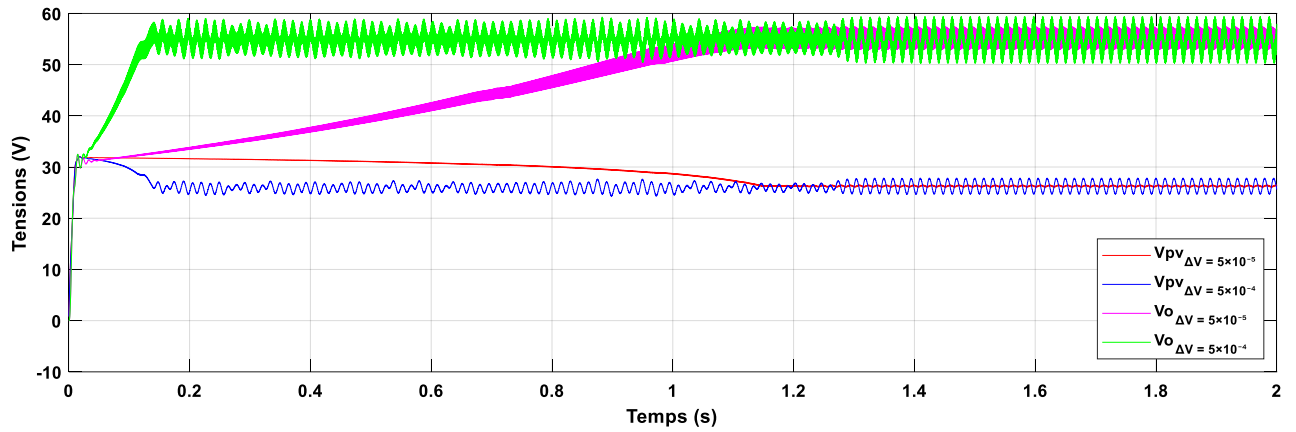


Figure I.13 Évolution des tensions V_{pv} et V_o pour différentes valeurs de ΔV

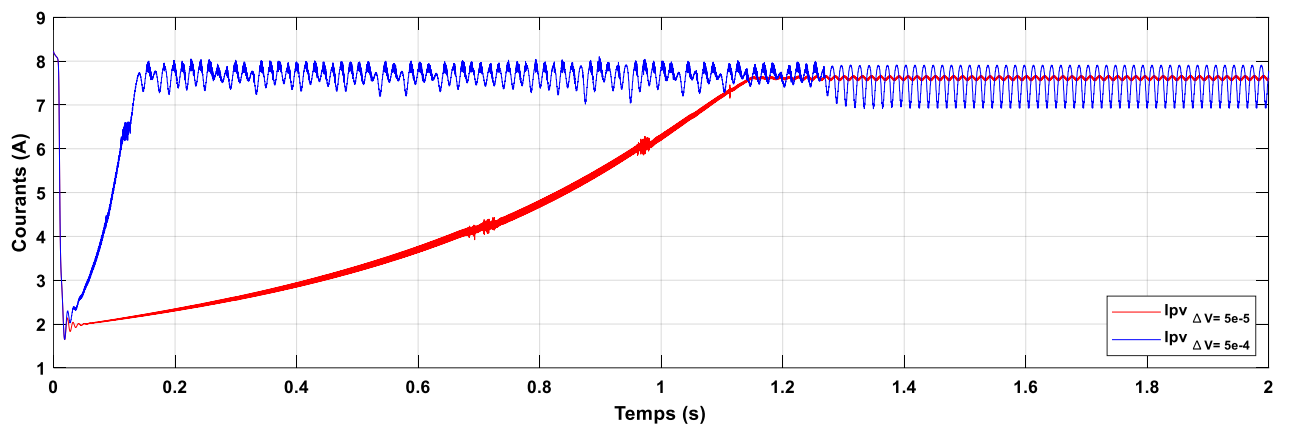


Figure I.14 Évolution de courant I_{pv} pour différentes valeurs de ΔV

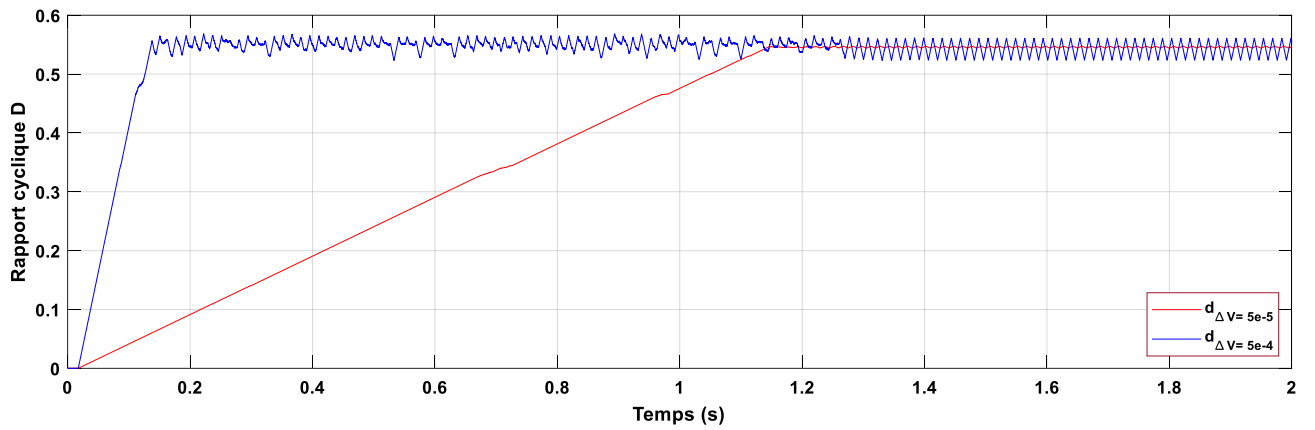


Figure I.15 Évolution du rapport cyclique D pour différentes valeurs de ΔV

D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que les deux valeurs de ΔV permettent au système de converger vers le point de puissance maximale. La courbe de puissance montre que pour $\Delta V = 5 \times 10^{-4}$, la puissance maximale est atteinte plus rapidement, mais avec des oscillations plus marquées autour du MPP. En revanche, pour $\Delta V = 5 \times 10^{-5}$, la convergence est légèrement plus lente mais la puissance est plus stable en régime permanent.

Concernant la tension photovoltaïque V_{pv} , on remarque qu'elle converge vers sa valeur optimale dans les deux cas. Toutefois, les fluctuations sont plus importantes lorsque ΔV est élevé, tandis qu'une faible valeur de ΔV permet d'obtenir une tension plus stable. Les courbes du rapport cyclique confirment également ce comportement, avec des variations plus importantes pour $\Delta V = 5 \times 10^{-4}$.

Ces résultats mettent en évidence l'influence du pas de perturbation sur les performances du P&O, où un pas élevé améliore la rapidité de suivi au détriment de la stabilité, alors qu'un pas faible favorise la précision et réduit les oscillations autour du point de fonctionnement optimal.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des systèmes photovoltaïques ainsi que les différentes méthodes conventionnelles de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Nous avons également étudié le fonctionnement du convertisseur Boost et les algorithmes P&O et IC, qui sont parmi les techniques les plus utilisées dans les systèmes photovoltaïques grâce à leur simplicité et leur facilité d'implémentation.

Cependant, malgré leurs avantages, ces méthodes conventionnelles présentent certaines limites, notamment en présence de variations rapides des conditions climatiques, ce qui peut réduire leurs performances et provoquer des oscillations autour du point de puissance maximale. Pour remédier à ces problèmes et améliorer la robustesse ainsi que la rapidité de la commande, nous allons présenter dans le chapitre suivant des techniques de commande plus avancées.

CHAPITRE II

Commande MPPT par mode glissant

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons comme une amélioration et une solution aux problèmes des techniques de commande précédentes, une commande permettant d'améliorer les performances du système photovoltaïque. La commande par mode glissant cette technique de commande non linéaire vise à garantir que la tension du générateur photovoltaïque suive la valeur optimale fournie par l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), tout en atténuant les perturbations dues aux variations climatiques. Ce contrôle sera expliqué et défini en détail.

II.2 Systèmes à structures variables

Les systèmes à structure variable (VSS) sont définis comme un ensemble de sous-systèmes continus caractérisés par une logique de commutation qui entraîne des actions de contrôle discontinues basées sur des perturbations de l'état du système et des entrées de référence [23], permettant aux trajectoires d'état de s'exécuter le long de surfaces de discontinuité dans l'espace d'état, Il se distingue par la sélection d'une structure de commande ainsi que par une loi de commutation adaptée. Il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\begin{cases} f_1(x) \text{ si la condition 1 est vérifiée} \\ \vdots \\ f_n(x) \text{ si la condition n est vérifiée} \end{cases}$$

Où f_i sont des fonctions appartenant à un ensemble de sous-systèmes. [24]

II.3 La commande par Mode glissant

Le contrôle par mode glissant (SMC) apparu en Union soviétique durant les années 60 et issu de la théorie des systèmes à structure variable (SSV), ce contrôle assure une stabilité même en présence de fortes variations de la source d'énergie ou de la charge, il offre également une bonne réponse dynamique ainsi qu'une facilité de mise en œuvre. [25]

La trajectoire d'état du système est d'abord dirigée vers une surface spécifique, appelée surface de glissement. Ensuite, grâce à une loi de commutation appropriée, cette trajectoire est contrainte de rester au voisinage de cette surface. Le déplacement du système le long de cette dernière est désigné par le terme de mouvement de glissement. Cette commande est appliquée aux systèmes décrits par l'équation suivante : [24]

$$\bullet \quad \dot{x} = f = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{si } S(x, t) > 0 \\ f^-(x, u^-) & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

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

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

II.4 Conception de la commande par mode de glissement

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

- Le choix de la surface de glissement $S(x)$, qui représente le comportement dynamique souhaité du système.
- L'établissement des conditions de convergence, permettant de garantir que les trajectoires du système atteignent la surface de glissement.
- La détermination de la loi de commande u , qui assure à la fois l'attraction des trajectoires vers la surface et leur maintien sur celle-ci malgré les perturbations et incertitudes. [25]

II.4.1 Surface de glissement

Si chaque point d'une surface S possède des trajectoires d'état issues de l'extérieur de cette surface, alors la surface S est appelée surface de glissement.

Ici le système de commande à structure variable vise à faire évoluer l'état du système approximativement de n'importe quel état initial $x(0) = x_0$ vers l'origine dans l'espace d'état lorsque $t \rightarrow \infty$. [26]

La trajectoire dans le plan de phase se compose de trois parties distinctes :

II.4.1.1 Mode de convergence (MC)

Durant le mode de convergence (*reaching mode*), la variable d'état évolue à partir d'une condition initiale quelconque x_0 dans le plan de phase, en direction de la surface de commutation définie par $S(x)=0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence. [26]

II.4.1.2 Mode de glissement (MG)

Une fois la surface de glissement atteinte, le système entre dans le mode de glissement (*sliding mode*). Dans cette phase, la trajectoire d'état reste contrainte sur la surface $S(x)=0$ et

évolue progressivement vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement (x). [26]

II.4.1.3 Le mode du régime permanent (MRP)

Il s'agit de l'étude de la réponse d'un système autour de son point d'équilibre (origine de phase) et il est caractérisé par la qualité et la performance du contrôle. [26]

Le principe fondamental de la commande par mode glissant ainsi que ses différentes phases et conditions sont illustrés graphiquement dans la (Figure II.1).

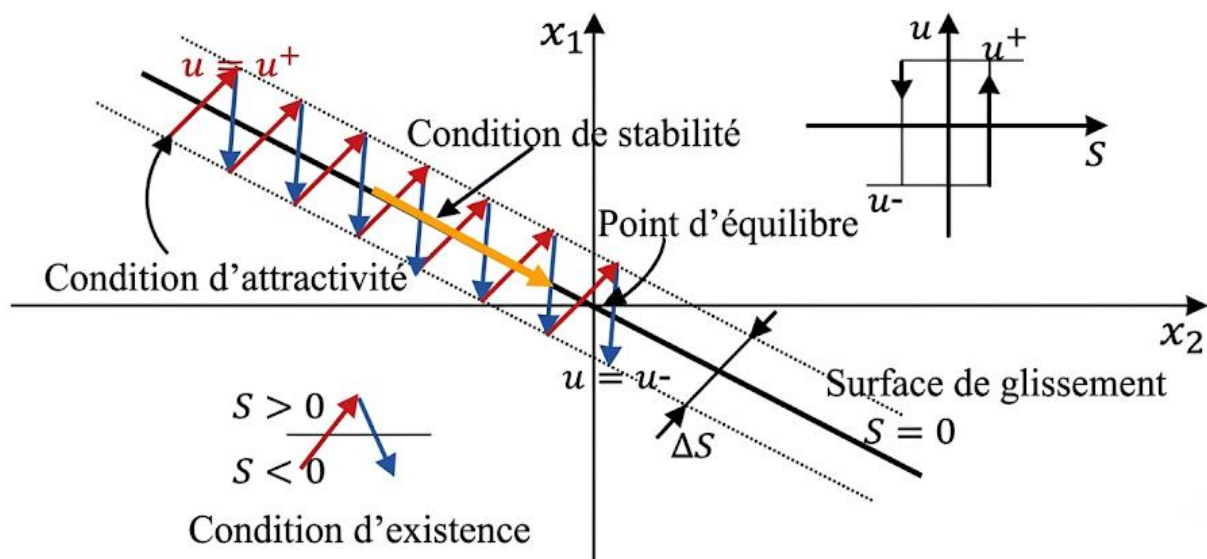


Figure II.1 Principe de la commande par mode glissant.

II.4.2 Méthode de la commande équivalente u_{eq}

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 II.2). [24]

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.

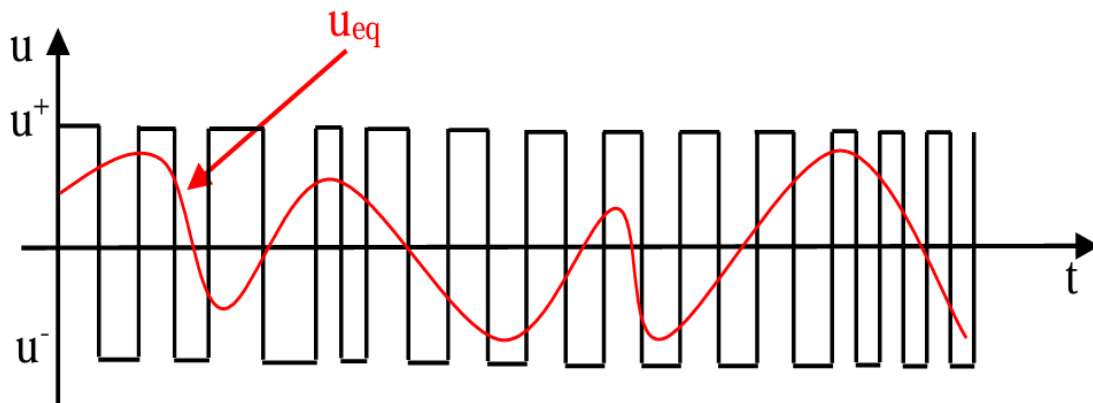


Figure II.2 Commande équivalente.

II.5 La fonction de Lyapunov :

Pour démontrer la stabilité d'un système contrôlé par un régime de glissement, nous utilisons la méthode de Lyapunov comme critère d'analyse.

Pour les variables d'état du système, la fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$) qui est positive. Il est nécessaire que la loi de commande réduise cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$).

Théorème 1 : Soit (x) une fonction dite fonction de Lyapunov qui vérifie les conditions suivantes [27] :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 \quad \forall x \neq 0 \\ \dot{V}(x) \leq 0 \quad \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

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

Nous choisissons une fonction de Lyapunov positive spécifique en définissant par exemple une fonction de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{II.4})$$

Et prouvons que sa dérivée temporelle est négative,

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (\text{II.5})$$

$$S(x) * \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{II.6})$$

Afin de montrer que les trajectoires du système convergent vers la surface de glissement et que le système reste stable autour du point de fonctionnement souhaité.

II.6 Synthèse de la commande SMC

Soit un système non linéaire décrit par l'équation d'état suivante :[7]

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x) + g(x)u \\ y = x \end{cases}, g(x) \neq 0 \quad (\text{II.7})$$

Où : $x^{(n)}$ représente la dérivée d'ordre n de l'état du système en fonction du temps, u la commande du système, tandis que $f(x)$ et $g(x)$ sont des fonctions non linéaires.

L'objectif de la commande est d'assurer la convergence du système vers l'état désiré $x_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]$. Pour ce faire, on définit avec le vecteur de l'erreur de poursuite comme

$$e = y - x_d = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T.$$

Une surface de glissement $S(x, t)$ varie en fonction du temps dans l'espace d'état R^n est donnée par :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (\text{II.8})$$

Où λ est une constante strictement positive et $S(x, t)$ un scalaire [7]

Le problème de poursuite de l'état désiré $y(t) = x_d(t)$ revient à maintenir les états du système sur la surface $S(x, t)$ pour tout $t > 0$, Pour garantir cette convergence, la surface de glissement doit vérifier la condition suivante :

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2(x, t) \leq -\eta |S(x, t)| \quad , \eta > 0 \quad (\text{II.9})$$

L'équation (II.10) est appelée condition d'attraction. Son rôle est d'orienter les trajectoires d'état vers la surface de glissement afin d'assurer l'établissement du régime de glissement. [7]

On note t_f le temps nécessaire pour qu'une trajectoire atteigne la surface $S(x, t)$. L'équation (II.9) peut alors être réécrite sous la forme :

$$\frac{d}{dt} S(x, t) \leq -\eta \quad (\text{II.10})$$

En intégrant l'équation (II.10) entre $t = 0$ et $t = t_f$, on obtient :

$$S(t_f) - S(0) \leq -\eta(t_f - 0) \quad (\text{II.11})$$

Comme $S(t_f) = 0$, l'équation (II.11) devient :

$$t_f \leq S(0)/\eta \quad (\text{II.12})$$

L'équation (II.12) garantit que si les trajectoires sont à l'extérieur de $S(x, t)$, elles atteindront la surface de glissement dans un temps fini inférieur à $|S(0)/\eta|$. [7]

Lorsque la surface de glissement $S = 0$ est atteinte, l'erreur tend vers zéro exponentiellement ($y = x_d$). Pour une condition permettant de donner à la surface de glissement une dynamique de convergence vers zéro, on utilise généralement la condition d'attractivité non-linéaire suivante :

$$S(x, t) \dot{S}(x, t) \leq -\eta |S(x, t)| \quad (\text{II.13})$$

La synthèse de la loi de commande repose sur le critère de stabilité de Lyapunov. Cette loi est choisie telle que la dérivée d'une fonction de Lyapunov soit négative. Pour cela, on choisit la fonction scalaire suivante :

$$V(x, t) = \frac{1}{2} S^T(x, t) S(x, t) \quad (\text{II.14})$$

Cette fonction est définie positive et constitue un candidat naturel de Lyapunov. Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V}(x, t) = S(x, t) \dot{S}(x, t) < 0 \quad (\text{II.15})$$

La loi de commande doit être satisfaire cette condition de stabilité (équation (II.15)), c'est-à-dire à rendre la dérivée de la fonction de Lyapunov strictement négative. [7]

La construction de cette loi de commande consiste à admettre qu'en mode de glissement le système piloté par une commande u_{eq} , solution de $\dot{S} = 0$, dite commande équivalente qui permet de maintenir l'état du système sur la surface $S = 0$.

Le calcul de la commande équivalente s'effectue en prenant en considération les conditions d'invariance suivantes :

$$\begin{cases} S(x, t) = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (II.16)$$

Considérons l'exemple d'un système non-linéaire avec une seule entrée, représenté par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (II.17)$$

L'existence du mode glissant implique que :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad (II.18)$$

En remplaçant (II.17) dans (II.18), on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) = 0 \quad (II.19)$$

En supposant que $\frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t))$ est inversible :

$$u_{eq} = \left[\frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t)) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x}(f(x, t)) \quad (II.20)$$

Cette relation permet de déterminer explicitement la commande équivalente nécessaire au maintien du système sur la surface de glissement. [7]

La dynamique du système en régime de glissement est alors donnée par :

$$\dot{x} = \left[1 - g(x, t) \left[\frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t)) \right]^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} \right] f(x, t) \quad (II.21)$$

En pratique, la commande équivalente seule ne permet pas de garantir l'atteinte de la surface de glissement. Il est donc nécessaire d'ajouter une composante discontinue appelée commande de commutation.

La forme la plus simple de cette commande est celle d'un relais :

$$u_n = -\eta \operatorname{sign}(S(x, t)) \quad , \eta > 0 \quad (\text{II.22})$$

Cette action discontinue a pour rôle de forcer les trajectoires à rejoindre la surface de glissement malgré les perturbations et les incertitudes du système.

La loi de commande globale peut alors être exprimée sous la forme :

$$u_{SMC} = u_n + u_{eq} \quad (\text{II.23})$$

La loi de commande (II.23) est certes robuste vis-à-vis des perturbations paramétriques et externes. [6]

II.7 Commande MPPT par mode glissant d'un système PV

Pour réaliser une commande SMC-MPPT, il est nécessaire de choisir une surface, de telle façon que si cette dernière est nulle le point de puissance maximale PPM est atteint, puis on calcule la loi de commande pour commander le convertisseur. Le système PV est constitué d'un module PV, un convertisseur DC-DC Boost et une charge résistive. La dynamique du système dans l'espace d'états du système peut s'écrire comme suit : [7]

$$\begin{aligned} \dot{I}_P &= -\frac{1-u}{L} V_o + \frac{V_P}{L} + W_1 \\ \dot{V}_o &= \frac{1-u}{C} I_P - \frac{V_o}{C_R} + W_2 \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

Où W_1 et W_2 sont des incertitudes paramétriques du système. Les composantes ainsi que la modélisation de ce système sont représentées dans le premier chapitre.

La condition permettant d'atteindre le point de puissance maximale est donnée par :

$$\frac{\partial P_P}{\partial I_P} = \frac{\partial R_P I_P^2}{\partial I_P} = I_P \left(2R_P + I_P \frac{\partial R_P}{\partial I_P} \right) = 0 \quad (\text{II.25})$$

Cette relation (II.25) constitue la surface de glissement utilisée dans la stratégie MPPT

Où $R_p = \frac{V_p}{I_p}$ représente la charge équivalente connectée au module photovoltaïque. [7]

Ainsi, lorsque les variables d'état convergent vers cette surface, le système évolue automatiquement vers le point de puissance maximale.

$$S \triangleq 2R_p + I_p \frac{\partial R_p}{\partial I_p} \quad (\text{II.26})$$

La commande par mode glissant comprend de deux termes

- La commande équivalente responsable du maintien de la dynamique sur la surface de glissement.
- La commande discontinue chargée de forcer les trajectoires à atteindre cette surface.

La commande totale s'écrit alors :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{II.27})$$

Pour déterminer la commande équivalente, on considère $W_1 = 0$

La condition suivante doit alors être vérifiée :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \left(\frac{\partial S}{\partial I_p} \right) \dot{I}_p \\ &= \frac{-(1-u_{eq})V_o + V_p}{L} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

La commande équivalente obtenue est donc :

$$u_{eq} = 1 - \frac{V_p}{V_o} \quad (\text{II.29})$$

La commande discontinue utilisée dans cette étude est définie par :

$$\begin{aligned} u_n &= \eta \cdot \text{sgn}(S) + k \cdot S \\ \eta &= \eta_0 (|S| + \delta) \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Où $\eta_0 > 0$, $k > 0$ et $\delta > 0$ sont des constantes de conception. On constate à la vue de l'équation (II.30) que l'amplitude de commande η dépend de la valeur de la surface de glissement. Par

conséquent, l'amplitude de chattering sera atténuée. À partir de l'équation (II.26), la valeur de $\frac{\partial S}{\partial I_P}$ peut être calculée comme suit :

$$\frac{\partial S}{\partial I_P} = 3 \frac{\partial R_P}{\partial I_P} + I_P \frac{\partial^2 R_P}{\partial I_P^2} \quad (\text{II.31})$$

En posant $R_P = \frac{V_P}{I_P}$, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_P}{\partial I_P} &= \frac{\partial}{\partial I_P} \left(\frac{V_P}{I_P} \right) = \frac{1}{I_P} \frac{\partial V_P}{\partial I_P} - \frac{V_P}{I_P^2} \\ \frac{\partial^2 R_P}{\partial I_P^2} &= 2 \frac{V_P}{I_P^3} + \frac{1}{I_P} \frac{\partial^2 V_P}{\partial I_P^2} - \frac{2}{I_P^2} \frac{\partial V_P}{\partial I_P} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

À partir l'équation (II.32), l'équation (II.31) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial S}{\partial I_P} = \frac{1}{I_P} \frac{\partial V_P}{\partial I_P} + \frac{\partial^2 V_P}{\partial I_P^2} - \frac{V_P}{I_P^2} < 0 \quad (\text{II.33})$$

D'après les équations (II.24), (II.27) et (II.28), on obtient :

$$\dot{I}_P = -\frac{1-u_{eq}-u_n}{L} V_o + \frac{V_P}{L} + W_1 = -\frac{1-(1-\frac{V_P}{V_o})-u_n}{L} V_o + \frac{V_P}{L} + W_1 = \left(\frac{V_o}{L} \right) u_n + W_1 \quad (\text{II.34})$$

Pour démontrer la stabilité du système commandé, on adopte la fonction de Lyapunov représentée dans l'équation (II.4).

Sa dérivée temporelle s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} = S \frac{\partial S}{\partial I_P} \left(\frac{V_o}{L} u_n + W_1 \right) \\ \dot{V} &= S \frac{\partial S}{\partial I_P} \left(\frac{V_o}{L} (\eta_0(|S| + \delta) \cdot \text{sgn}(S) + k \cdot S) + W_1 \right) \\ \dot{V} &= \frac{\partial S}{\partial I_P} \left(\frac{V_o}{L} \eta_0 S^2 + \frac{V_o}{L} \eta_0 \delta |S| + \frac{V_o}{L} k \cdot S^2 + S W_1 \right) \\ \dot{V} &\leq \frac{\partial S}{\partial I_P} \left(\frac{V_o}{L} \eta_0 S^2 + \frac{V_o}{L} \eta_0 \delta |S| + \frac{V_o}{L} k \cdot S^2 - |S| |W_1| \right) \\ \dot{V} &= \frac{\partial S}{\partial I_P} \left(\frac{V_o}{L} (\eta_0 S^2 + k \cdot S^2) + \frac{V_o}{L} \eta_0 \delta |S| - |S| |W_1| \right) < 0 \quad , S \neq 0 \end{aligned} \quad (\text{II.35})$$

À partir de l'équation (II.35) la condition de stabilité du système proposé est obtenue comme suit :

$$\eta_0 \delta > (L/V_o) |W_1| \quad (\text{II.36})$$

Afin de supprimer l'amplitude des incertitudes, les paramètres de conception sont sélectionnés de telle sorte que :

$$\eta_0 \gg \delta \quad (\text{II.37})$$

On conclut que le mode de glissement existe et que le système est asymptotiquement stable, quelle que soit la localisation du point de fonctionnement. La commande proposée force les trajectoires d'état à rejoindre la surface de glissement en un temps fini à partir de toute condition initiale, puis assure leur maintien sur cette surface, garantissant ainsi un comportement robuste et une convergence efficace vers l'objectif de commande. [7]

II.8 Résultats de la simulation

Afin de tester l'efficacité de la stratégie de contrôle SMC-MPPT, plusieurs simulations ont été réalisées dans un environnement Matlab/Simulink, en tenant compte des changements de conditions climatiques telles que l'éclairage et la température. Les simulations ont été réalisées à l'aide de panneaux solaires **BP MSX 60**. Les spécifications du système étudié sont présentées dans le chapitre trois.

Des perturbations sinusoïdales sont considérées, couramment utilisée dans l'analyse des systèmes non linéaire :

$$W_1(t) = 5 \sin(1000t) \quad (\text{II.38})$$

$$W_2(t) = 5 \cos(1000t) \quad (\text{II.39})$$

Scénario 1

Dans ce test, les performances du contrôle SMC-MPPT ont été évaluées pour des conditions de fonctionnement standard, sous un éclairage de $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température de 25°C . Les figures : (Figure II.3), (Figure II.4), (Figure II.5), (Figure II.6) montrent respectivement les résultats de simulation de puissance P_{PV} , des tensions V_{PV} et V_o , du courant I_{pv} et du rapport cyclique d en fonction du temps.

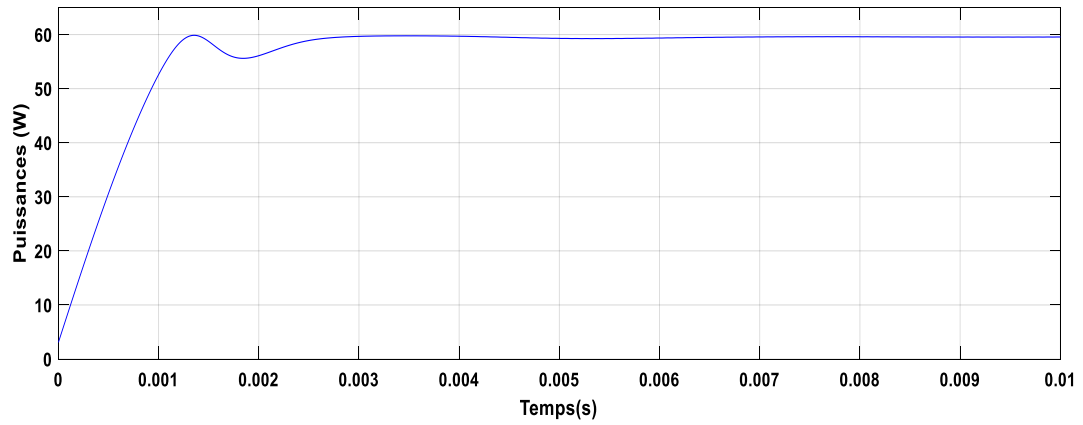


Figure II.3 Évolution de Puissance P_{pv} (scénario 1).

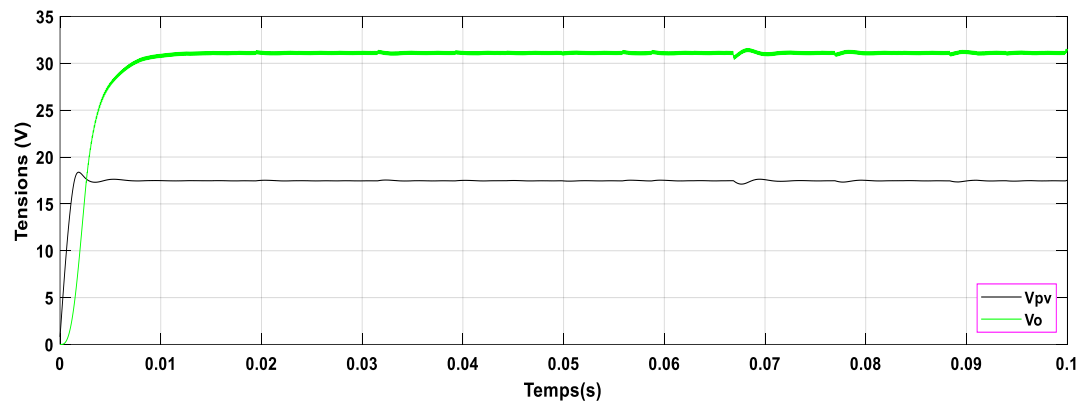


Figure II.4 Évolution des tensions (scénario 1).

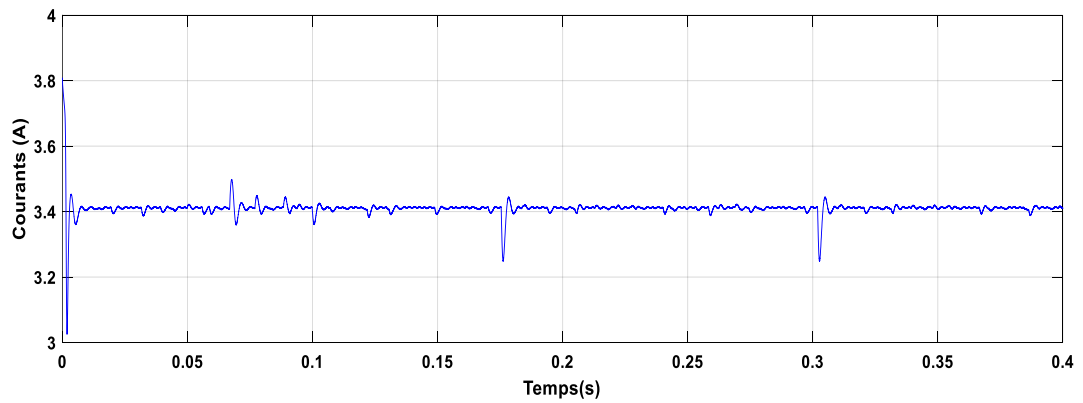


Figure II.5 Évolution du courant I_{pv} (scénario 1).

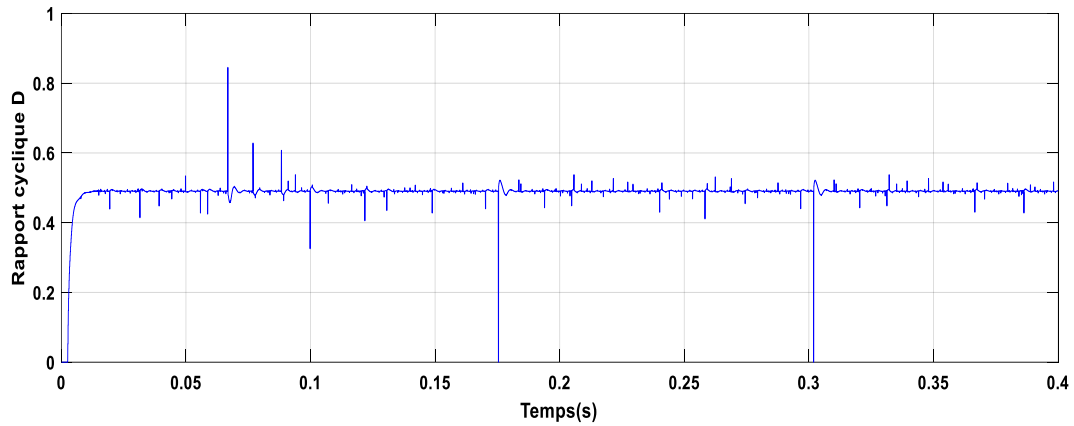


Figure II.6 Évolution du rapport cyclique d (scénario 1).

D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que la commande par mode glissant permet au système photovoltaïque d'atteindre rapidement son point de fonctionnement optimal. La puissance converge rapidement vers sa valeur maximale avec des oscillations très faibles, ce qui traduit une bonne précision de poursuite du MPP. Les tensions V_{pv} et V_o se stabilisent rapidement autour de leurs valeurs de référence, tandis que le courant photovoltaïque atteint son régime permanent sans dépassement significatif. De plus, le rapport cyclique s'adapte rapidement aux conditions de fonctionnement, confirmant ainsi la rapidité et la robustesse de la commande par mode glissant.

Scénario 2

Dans ce cas la température maintenue constante $T=25^{\circ}\text{C}$, et une variation périodique de l'éclairement entre $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $G = 500 \text{ W/m}^2$.

Les figures : (Figure II.7), (Figure II.8), (Figure II.9), (Figure II.10) montrent respectivement les résultats de simulation de puissance P_{PV} , des tensions V_{PV} et V_o , du courant I_{pv} et du rapport cyclique d en fonction du temps.

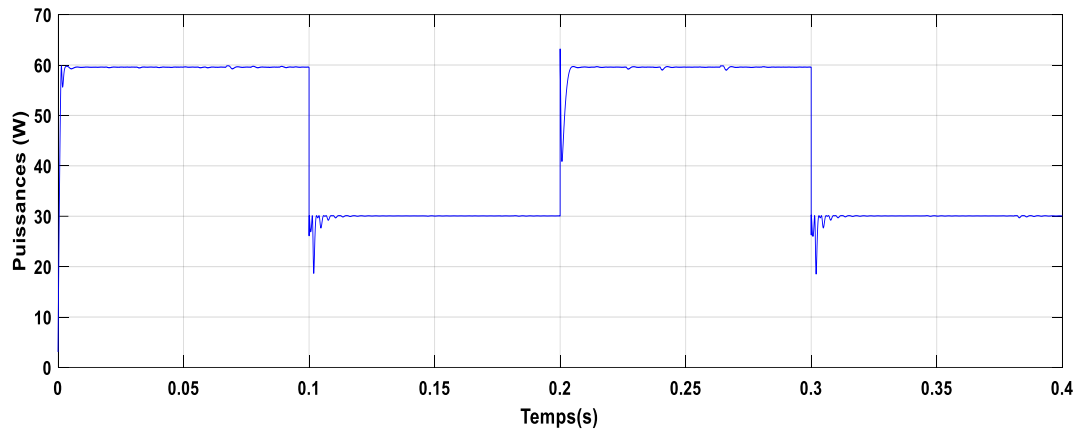


Figure II.7 Évolution de Puissance P_{pv} (scénario 2).

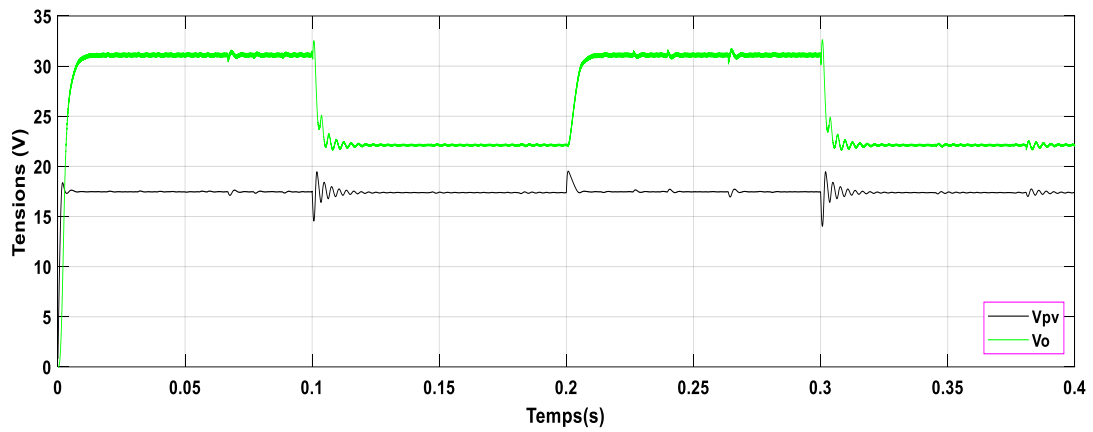


Figure II.8 Évolution des tensions (scénario 2).

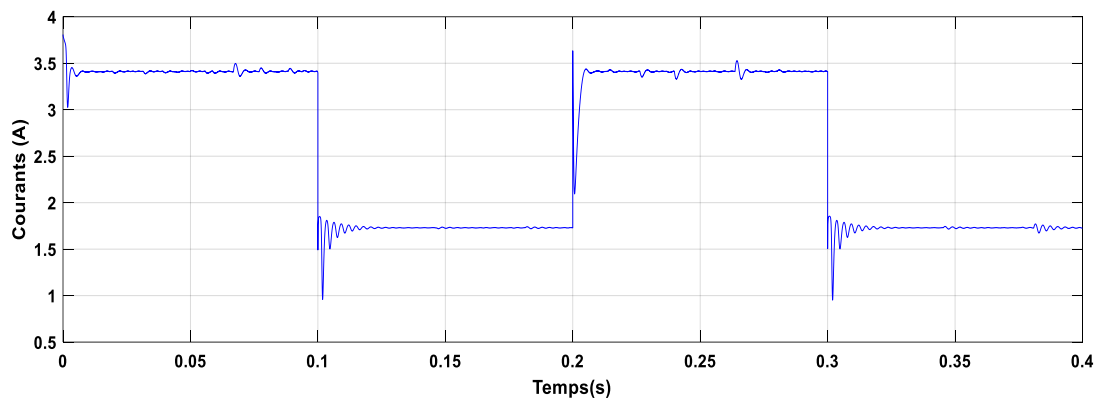


Figure II.9 Évolution du courant I_{pv} (scénario 2).

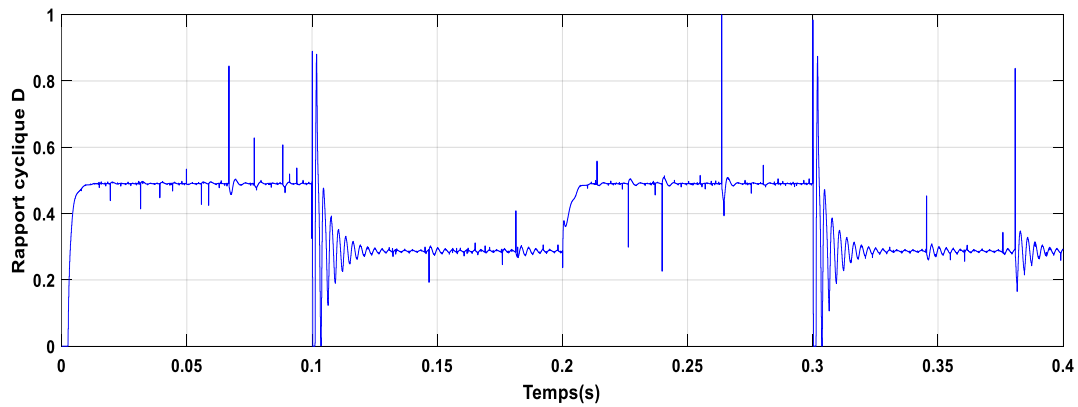


Figure II.10 Évolution du rapport cyclique d (scénario 2).

Les résultats montrent que malgré la variation brusque de l'irradiation solaire, la commande par mode glissant maintient de bonnes performances dynamiques. On remarque une augmentation de la puissance lorsque l'irradiation passe de 500 à 1000 W/m², suivie d'une convergence rapide vers le nouveau point de puissance maximale. Les tensions et le courant s'adaptent rapidement à cette variation sans oscillations importantes, ce qui met en évidence la robustesse de la commande face aux perturbations climatiques. Le rapport cyclique évolue automatiquement afin d'assurer le maintien du fonctionnement au voisinage du MPP.

Scénario 3

Dans le dernier cas, nous avons modifié la température à $T = 45^\circ\text{C}$ et le changement périodique d'éclairement est resté compris entre $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $G=500 \text{ W/m}^2$.

Les figures : (Figure II.11), (Figure II.12), (Figure II.13), (Figure II.14) montrent respectivement les résultats de simulation de puissance P_{PV} , des tensions V_{PV} et V_o , du courant I_{pv} et du rapport cyclique d en fonction du temps.

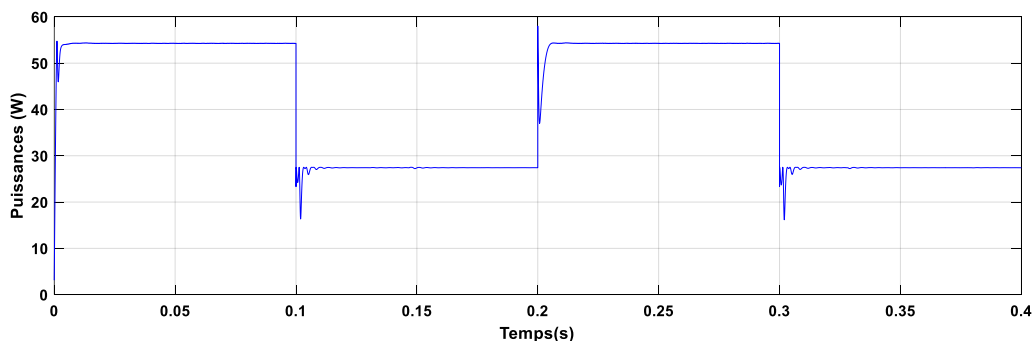


Figure II.11 Évolution de Puissance P_{PV} (scénario 3).

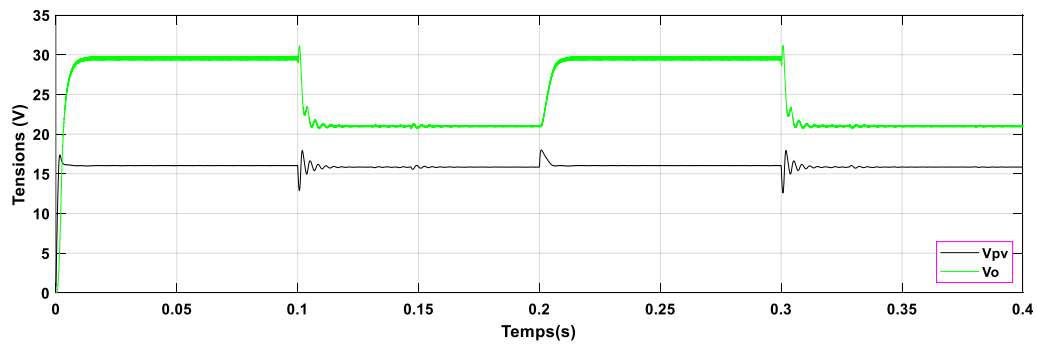
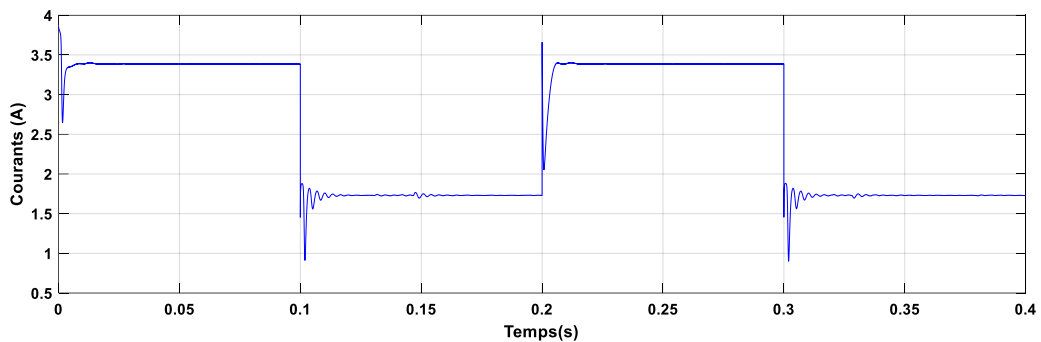
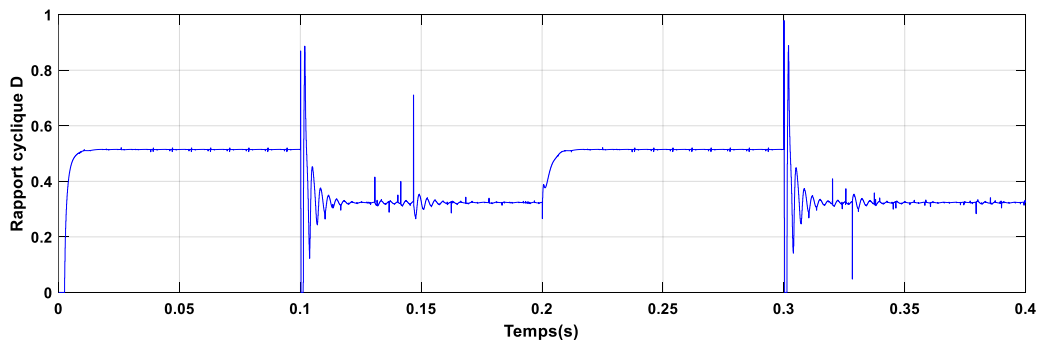


Figure II.12 Évolution des tensions (scénario 3).

Figure II.13 Évolution du courant I_{PV} (scénario 3).Figure II.14 Évolution du rapport cyclique d (scénario 3).

D'après les courbes obtenues, la commande par mode glissant conserve de bonnes performances même en présence simultanée d'une variation d'irradiation et d'une augmentation de la température. Bien que l'élévation de la température tende à réduire la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque, le contrôleur assure un suivi rapide et précis du nouveau point de fonctionnement. Les tensions, les courants ainsi que le rapport cyclique présentent une réponse stable avec un temps de convergence réduit et de faibles oscillations, ce qui confirme l'efficacité et la robustesse de la commande proposée.

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

Ces résultats confirment que la commande par mode glissant offre une réponse rapide, une bonne stabilité et une forte robustesse vis-à-vis des variations des conditions climatiques. Les oscillations observées sont très faibles comparativement aux méthodes classiques, ce qui permet d'améliorer la qualité du suivi du point de puissance maximale et les performances globales du système photovoltaïque.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande par mode glissant appliquée aux systèmes photovoltaïques afin d'assurer un suivi efficace du point de puissance maximale. Les résultats de simulation ont montré que cette méthode de commande offre une réponse dynamique rapide, une bonne stabilité ainsi qu'une forte robustesse face aux variations de l'irradiation et de la température. De plus, elle réduit les oscillations autour du point de fonctionnement optimal et améliore les performances globales du système par rapport aux méthodes traditionnelles telles que P&O.

Malgré ces avantages, certaines limitations subsistent, notamment la complexité de mise en œuvre et la présence éventuelle du phénomène de chattering. Afin d'améliorer encore les performances du système et d'obtenir une convergence plus rapide et plus précise, nous nous concentrerons dans le chapitre suivant sur une autre commande, qui représente une alternative prometteuse pour la commande des systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE III

*Commande MPPT synergétique d'un
système photovoltaïque*

III.1 Introduction :

Afin de garantir un suivi rapide, précis et robuste du point de puissance maximale (MPP), plusieurs stratégies de commande ont été développées. Parmi elles, la commande synergétique s'impose comme une approche avancée capable d'assurer une convergence rapide vers le point de fonctionnement optimal tout en réduisant les oscillations et en améliorant la stabilité du système.

Dans ce chapitre, nous présentons les principes fondamentaux de la théorie de la commande synergétique ainsi que son application au suivi MPPT d'un système photovoltaïque alimentant un convertisseur Boost. Après l'élaboration des lois de commande SCT et SNC, une étude de simulation sous Matlab/Simulink est réalisée afin d'évaluer leurs performances et de les comparer à celles de la commande par mode glissant dans différentes conditions de fonctionnement.

III.2 Bref historique de la commande synergétique

Hermann Haken physicien allemand a fondé la synergie dans les années 1970[28]. Ses travaux sur les lasers et la thermodynamique hors équilibre ont conduit à l'élaboration d'une théorie expliquant l'auto-organisation des systèmes complexes ou les systèmes dynamiques non linéaires.

La commande synergétique se définit comme une approche interdisciplinaire étudiant les systèmes composés d'un grand nombre d'éléments interagissant. Elle vise à expliquer comment un comportement spontanément ordonné émerge d'un système initialement désorganisé, grâce au phénomène d'auto-organisation.

Son principal objectif est d'établir des lois générales décrivant la transition du niveau microscopique (comportement individuel des éléments) au niveau macroscopique (comportement global organisé). [28]

III.2.1 Système non linéaire

La principale caractéristique d'un système non linéaire est que ses équations ne respectent pas le principe de superposition. Simplement dit, dans un système linéaire, la sortie est directement proportionnelle à l'entrée. Ceci n'est pas le cas avec un système non linéaire, les variations des paramètres d'entrée peuvent engendrer des résultats disproportionnés ou imprévisibles, posant des défis uniques à leur analyse et à leur modélisation. Par exemple les pendules, les systèmes de ressorts universels, les circuits électroniques (diodes), les systèmes robotiques et les systèmes photovoltaïques se caractérisent par des relations complexes entre leurs variables. Cette complexité se traduit souvent par un comportement imprévisible et chaotique, rendant leur étude cruciale pour la compréhension de divers phénomènes naturels et industriels.

La commande synergétique est l'une des méthodes les plus performantes et les plus précises pour les contrôler. [29]

III.2.2 Commande synergétique

La commande synergétique est une méthode avancée de commande des systèmes non linéaires, reconnue pour sa robustesse et ses bonnes performances en optimisation.

Son principe repose sur la définition d'une macro-variable (ψ) liée aux états du système, que l'on force à converger vers zéro grâce à une loi de commande adaptée. Cette convergence permet d'atteindre rapidement le point de puissance maximale tout en supprimant les oscillations souvent présentes dans les méthodes classiques. [30]

III.2.3 Conception d'une loi de commande synergétique

La dynamique du système non linéaire est exprimée par l'équation différentielle comme suit :[15]

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x, S, t) \quad (\text{III.1})$$

Où x est le vecteur d'état, S est l'entrée de commande et t est le temps.

La procédure de conception du contrôle synergétique pour le système non linéaire implique les étapes suivantes :

Étape 1 : Sélection d'une macro-variable qui est une fonction non linéaire de variables d'état comme $\psi = \psi(x, t)$

Le contrôle synergétique poussera le système à converger vers la surface ($\psi = 0$).

La sélection de la macro-variable est basée sur les spécifications, par exemple le temps de stabilisation, erreur en régime permanent et contraintes sur la sortie de commande.

Étape 2 : Sélection de la dynamique souhaitée de la macro-variable comme

$$T_s \dot{\psi} + \psi = 0 \quad , \text{ avec } T_s > 0 \quad (\text{III.2})$$

Où T_s est la constante de temps qui spécifie la vitesse de convergence vers la surface $\psi = 0$.

La solution de cette équation différentielle donne la fonction suivante pour :

$$\psi(t) = \psi_0 e^{\frac{-t}{T_s}} \quad (\text{III.3})$$

À partir de l'équation ci-dessus, pour toute condition initiale ψ_0 , lorsque t augmente $\psi(t)$ tend vers 0, est-à-dire attiré par la surface $\psi = 0$.

Le paramètre T_s détermine le taux de convergence, plus la valeur est petite, plus le taux des processus de transition est élevé.

Application de la règle de différenciation de la chaîne à la dérivée de ψ devient

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{d\psi}{dx} \dot{x} \quad (\text{III.4})$$

À partir des équations (III.1) et (III.4)

$$T_s \frac{d\psi}{dx} f(x, S, t) + \psi = 0 \quad (\text{III.5})$$

Résolution de l'équation (III.5) pour S , la loi de commande dérivée est exprimée comme

$$S = g[x, t, \psi(x, t), T_s] = 0 \quad (\text{III.6})$$

A partir de l'équation (III.6), on peut observer que le contrôle S dépend de la variable d'état ainsi que sur la constante de temps T_s et la variable macro ψ . Le concepteur peut ainsi obtenir des caractéristiques intéressantes telles que la stabilité, la réduction du bruit et l'insensibilité aux paramètres. [15]

III.2.4 Conception d'un contrôleur non linéaire synergétique (SCT)

La procédure décrite ci-dessus peut être appliquée à un convertisseur élévateur DC-DC de type Boost.

Le problème ici abordé est la détermination de la loi de commande (rapport cyclique d) générée instantanément par le contrôleur MPPT afin de suivre précisément le MPP, en supposant que la variété est : [15]

$$\psi = \frac{\partial P_{PV}}{\partial I_L} = \frac{\partial (V_{PV} I_L)}{\partial I_L} = I_L \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} + V_{PV} = 0 \quad (\text{III.7})$$

L'équation (III.4) peut s'écrire :

$$\frac{d\psi}{dt} = \left(\frac{d\psi}{dI_L} \right) \left(\frac{dI_L}{dt} \right) \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant l'équation (III.8) dans l'équation (III.2), on obtient :

$$T \left(\frac{d\psi}{dI_L} \right) \left(\frac{dI_L}{dt} \right) + \psi = 0 \quad (\text{III.9})$$

Puisque

$$\frac{d\psi}{dI_L} = 2 \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} + I_L \frac{\partial^2 V_{PV}}{\partial I_L^2} \quad (\text{III.10})$$

En combinant les équations d'état du convertisseur élévateur (équations (State-space model CH1) et (III.10) dans l'équation (III.9)), on obtient :

$$\left[2 \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} + I_L \frac{\partial^2 V_{PV}}{\partial I_L^2} \right] \left[\frac{1}{L} V_{PV} - \frac{1}{L} (1-d)V_o \right] = -\frac{1}{T} \left[V_{PV} + I_L \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} \right] \quad (\text{III.11})$$

Ainsi, la loi de commande :

$$d = 1 - \frac{V_{PV}}{V_o} - \frac{V_{PV} + I_L \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L}}{T \frac{V_o}{L} \left[2 \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} + I_L \frac{\partial^2 V_{PV}}{\partial I_L^2} \right]} \quad (\text{III.12})$$

III.2.5 Contrôleur non linéaire synergétique avancée (SNC)

L'équation dynamique proposée du SCT est définie comme suit [15] :

$$T\dot{\psi} + \varphi(\psi) = 0 \quad (\text{III.13})$$

Où T détermine le taux de convergence vers les attracteurs, $\dot{\psi}$ est la dérivée de la macro-variable agrégée par le temps, $\varphi(\psi)$ une fonction qui influence l'approche de l'attracteur.

Une des expressions populaires : [15]

$$\varphi(\psi) = \psi \quad (\text{III.14})$$

Par conséquent, l'équation. (III.13) peut être réécrit sous la forme :

$$T\dot{\psi} + \psi = 0 \quad (\text{Équation dynamique du SCT})$$

Dans la méthode proposée, au lieu de $\varphi(\psi) = \psi$, supposons que :

$$\varphi(\psi) = \beta\psi \quad (\text{III.15})$$

Alors que β est un réel positif supérieur à l'unité.

En tenant compte de l'équation (III.15) dans l'équation (III.13) on obtient :

$$T\dot{\psi} + \beta\psi = 0 \quad (\text{Équation dynamique de l'SNC}) \quad (\text{III.16})$$

L'équation (III.16) représente l'équation dynamique du système attendu. D'où sa solution est :

$$\psi(t) = \psi_0 e^{-\frac{\beta t}{T}} \quad (\text{III.17})$$

Où $\beta > 1$ converge plus rapidement vers la variété que l'équation (III.3).

De l'équation (III.16), la dérivée de ψ est :

$$\dot{\psi} = -\frac{\beta \psi}{T} \quad (III.18)$$

La variété reste la même (équation (III.7)). La combinaison des équations (III.7), (III.9) et (III.18) permet d'exprimer la nouvelle loi de contrôle à écrire comme suit : [15]

$$d = 1 - \frac{V_{PV}}{V_o} - \frac{\beta \left(V_{PV} - I_L \frac{\partial P_{PV}}{\partial I_L} \right)}{T \frac{V_o}{L} \left[2 \frac{\partial V_{PV}}{\partial I_L} + I_L \frac{\partial^2 V_{PV}}{\partial I_L^2} \right]} \quad \text{Où } \beta > 1 \quad (III.19)$$

III.3 Résultat et discussion

Afin de mettre en évidence l'influence des paramètres climatiques sur le comportement du générateur photovoltaïque, les caractéristiques courant-tension (I-V) (Figure III.1) et puissance-tension (P-V) (Figure III.2) ont été tracées pour différentes valeurs de température et d'irradiation. Ces courbes permettent d'analyser l'évolution du point de puissance maximale et de vérifier la conformité du modèle photovoltaïque avec les caractéristiques théoriques du panneau.

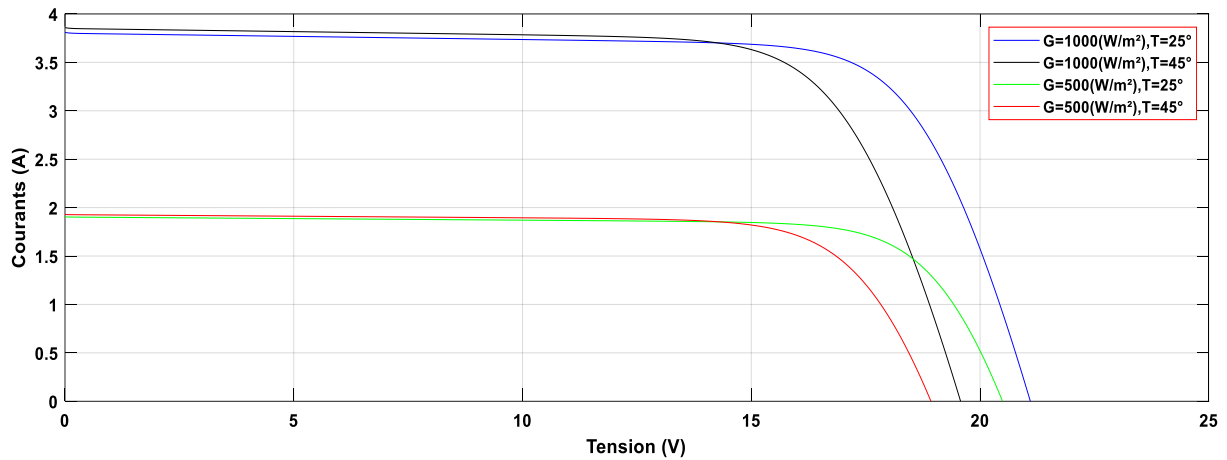


Figure III.1 Caractéristiques I-V du système PV pour différentes valeurs d'éclairement

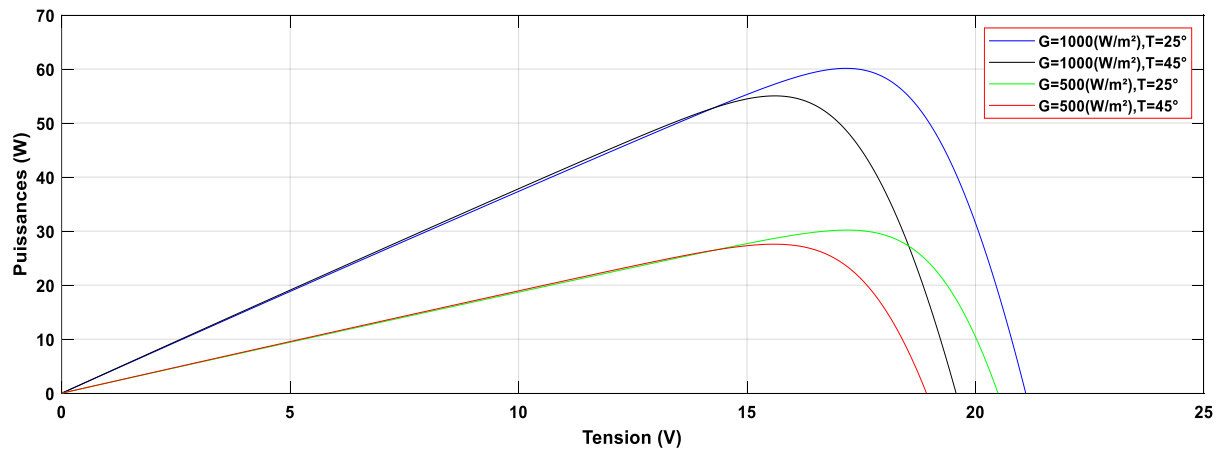


Figure III.2 Caractéristiques P-V du système PV pour différentes valeurs d'éclairement.

Les caractéristiques I-V et P-V montrent que l'augmentation de l'irradiation entraîne une augmentation du courant et de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque. En revanche, l'augmentation de la température provoque une légère diminution de la tension et de la puissance maximale. Ces résultats sont conformes au comportement théorique des modules photovoltaïques.

Tableau III.1 Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP MSX 60

Caractéristique	Symbole	Valeur
Type de module	—	Polycristallin
Puissance maximale	P_m	59.85 W
Tension au point de puissance maximale	V_{mp}	17.1 V
Courant au point de puissance maximale	I_{mp}	3.5 A
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	21.1 V
Courant de court-circuit	I_{sc}	3.80 A
Plage de température	—	- 40 °C à +85 °C
Coefficient de température de I_{sc}	K_i	(0.065 ± 0.015) %/°C
Coefficient de température de V_{oc}	K_v	(80 ± 10) mV/°C

Modèle de simulation et résultats pour la commande SCT du système PV a été simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink avec un temps de convergence $T = 0.06s$

La loi de commande du SCT est l'équation (III.12), qui a été modélisée dans Matlab/Simulink dans (Figure III.3)

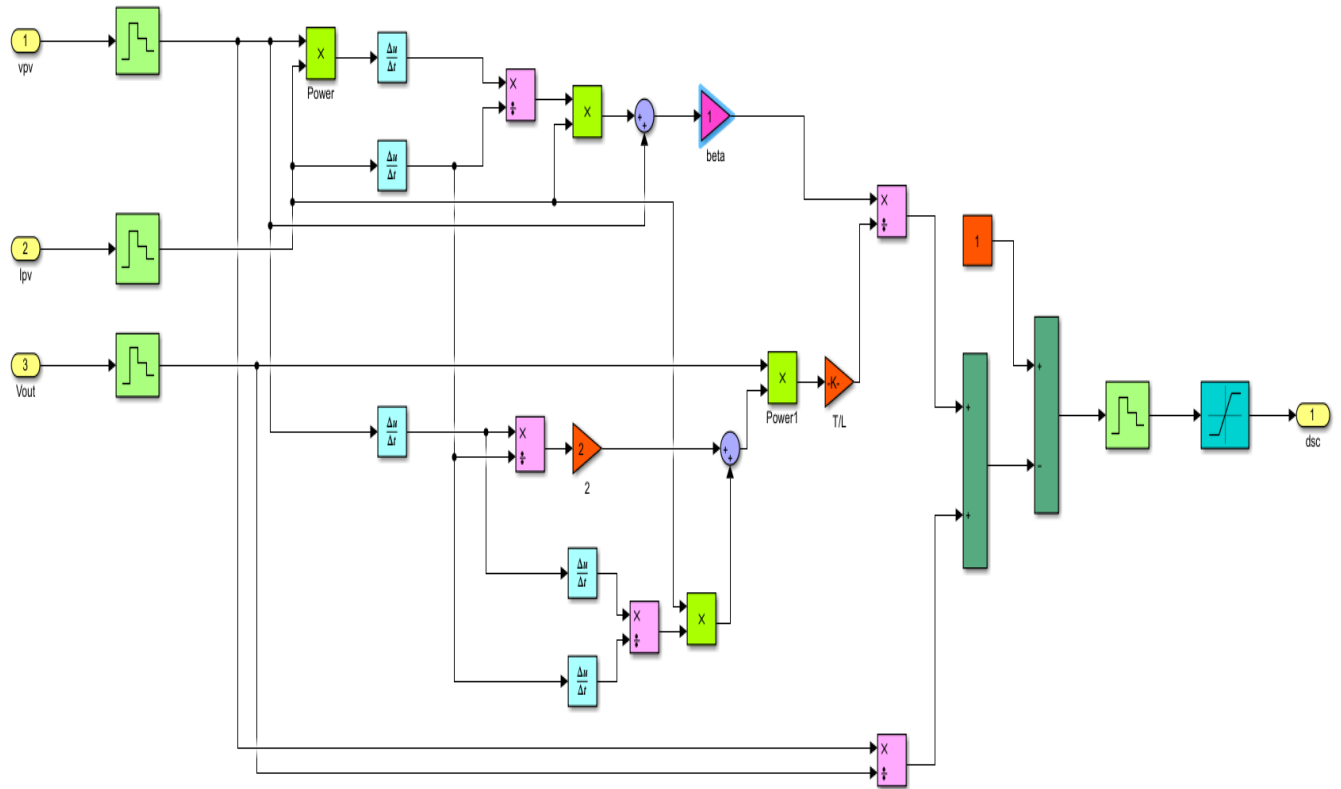


Figure III.3 Schéma fonctionnel Simulink du SCT

Modèle de simulation et résultats pour la commande SNC du système PV a été simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink avec le même temps de convergence $T = 0.06s$

La loi de commande du SNC est l'équation (III.19), qui a été modélisée dans Matlab/Simulink dans (Figure III.4)

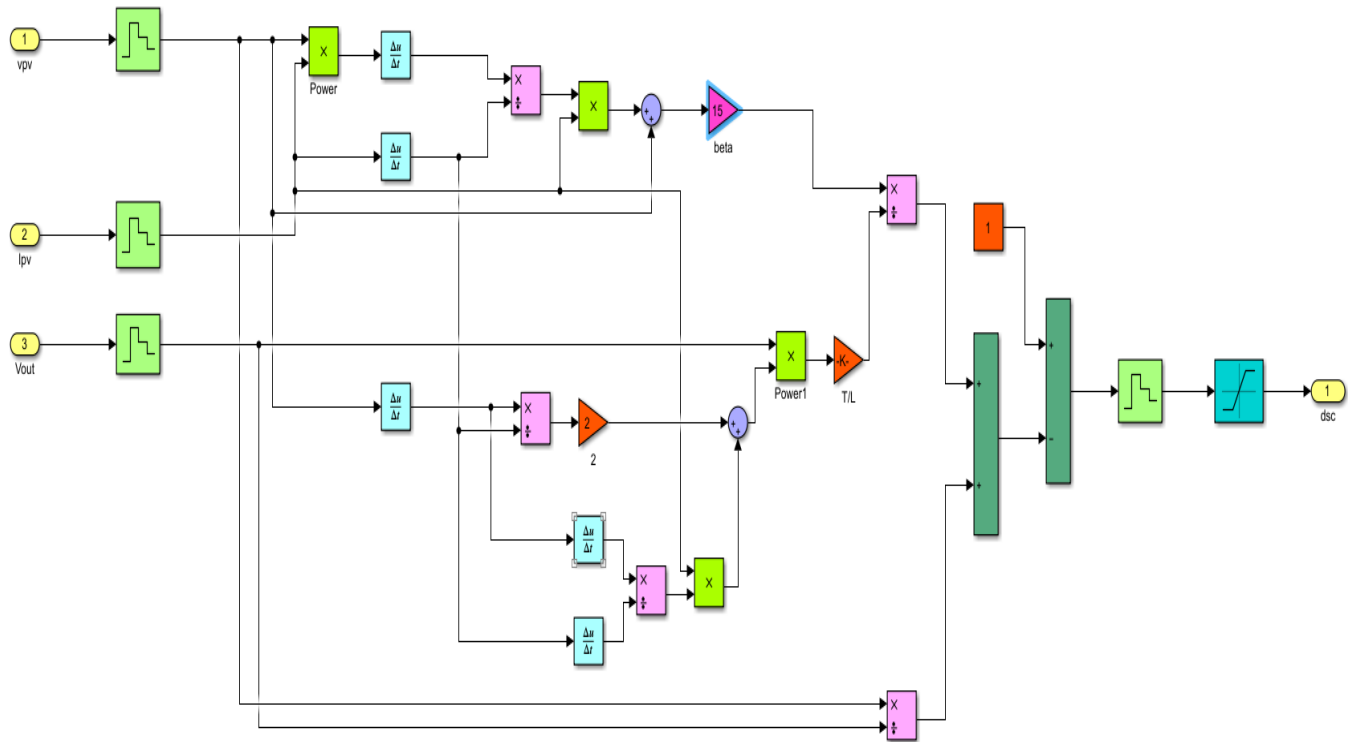


Figure III.4 Schéma fonctionnel Simulink du SNC

Les paramètres de conception du convertisseur DC-DC Boost sont donnés dans le tableau 2

Tableau III.2 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.

Paramètres du convertisseur Boost	Symbole	Valeur
Inductance	L	5 mH
Capacité d'entrée	C ₁	250 μF
Capacité de sortie	C ₂	330 μF
Fréquence de commutation	F	10 kHz
Diode	D	1N4007
Transistor MOSFET	T	IRF350
Résistance de charge	R	18 Ω

Scénario 1

Afin d'évaluer les performances de la commande synergétique (SCT) et de la commande par mode glissant (SMC) dans les conditions nominales une simulation a été réalisée sous une température constante de $T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de $G=1000 \text{ W/m}^2$. Les figures (Figure III.5), (Figure III.6), (Figure III.7), (Figure III.8) présentent l'évolution de la puissance, des tensions, du courant ainsi que du rapport cyclique obtenus avec les deux stratégies de commande.

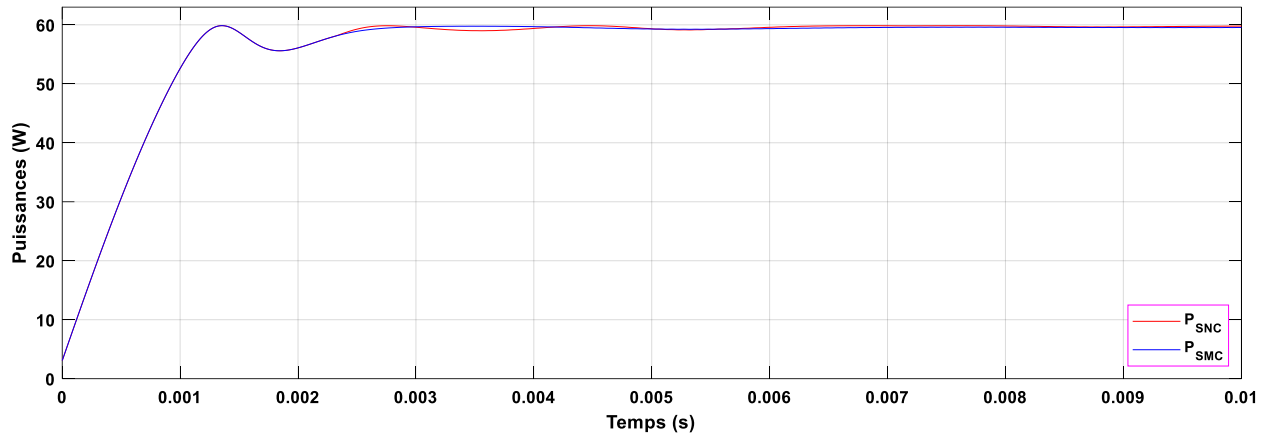


Figure III.5 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{pv} (scénario 1).

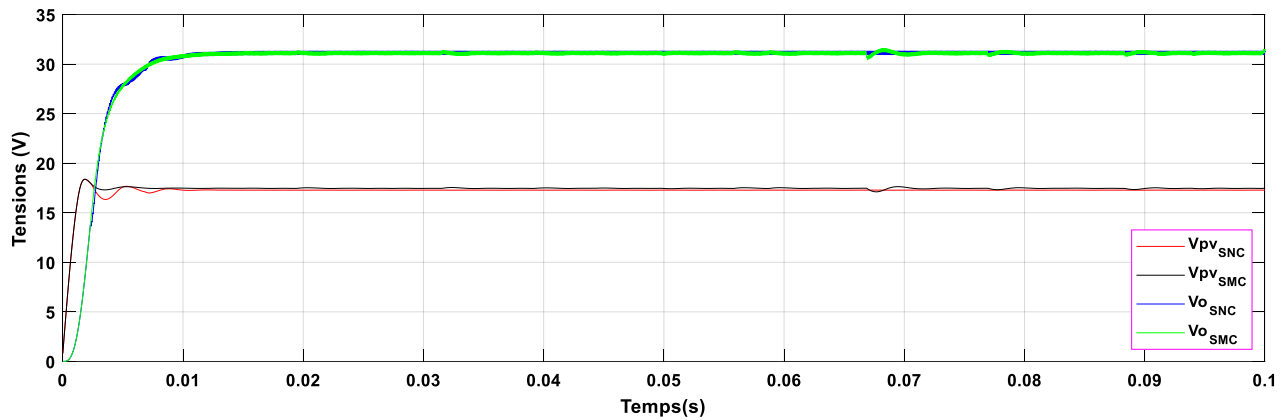


Figure III.6 Évolution des tensions (scénario 1).

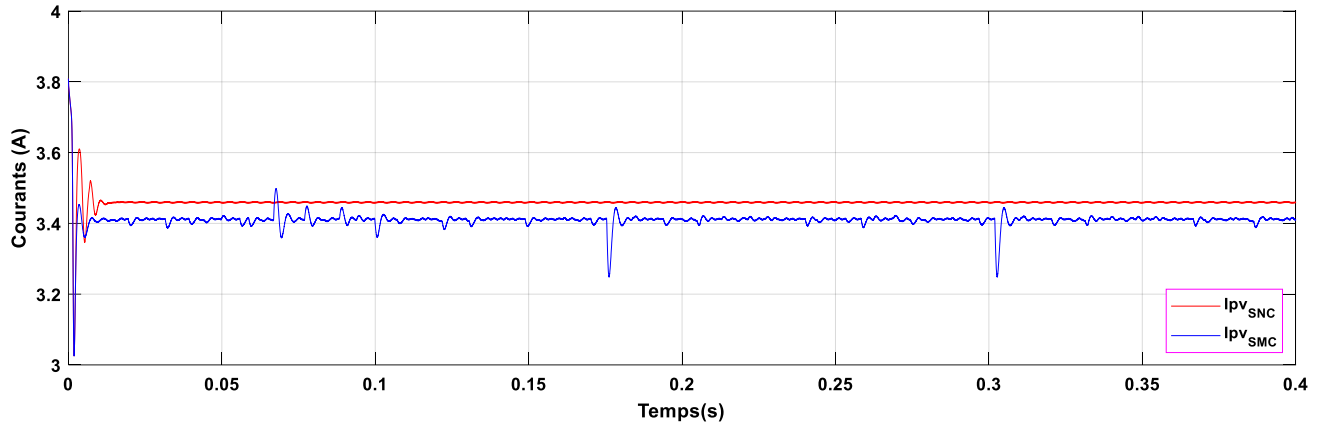


Figure III.7 Évolution du courant photovoltaïque I_{PV} (scénario 1)

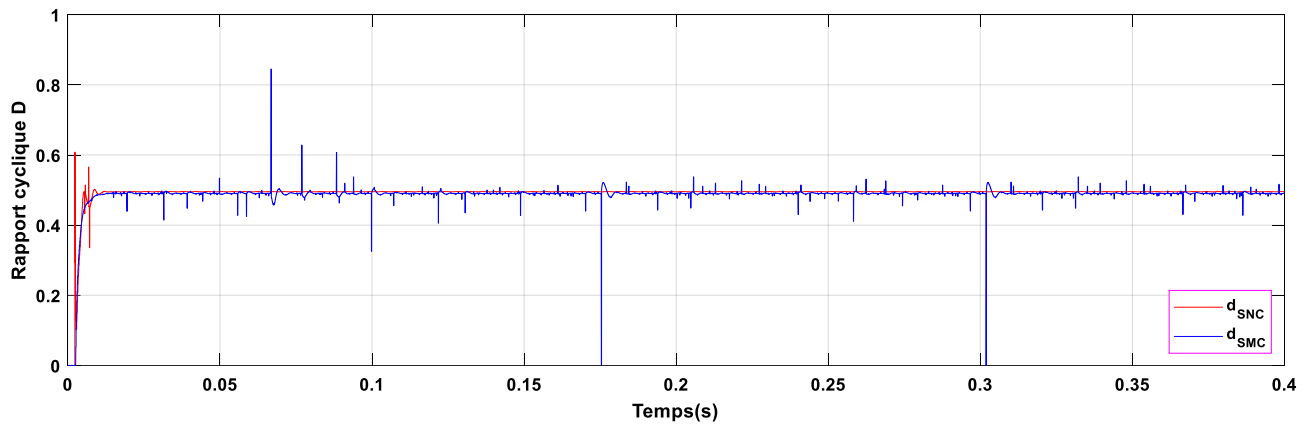


Figure III.8 Évolution du rapport cyclique d (scénario 1).

D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que les deux commandes assurent le suivi du point de puissance maximale. Cependant, la commande synergétique (SCT) présente un temps de convergence plus faible et des oscillations plus réduites que la commande par mode glissant (SMC). Les courbes de puissance, de tension et de courant montrent une réponse plus rapide et plus stable, ce qui traduit une meilleure précision de poursuite du MPP.

Scénario 2

Pour analyser la robustesse des deux méthodes face aux variations de l'irradiation solaire, un second test a été effectué en faisant varier l'éclairement de $G=500 \text{ W/m}^2$ à $G=1000 \text{ W/m}^2$ tout en maintenant la température constante à $T=25^\circ\text{C}$. Les courbes (Figure III.9), (Figure III.10), (Figure III.11), (Figure III.12) présentées ci-dessous illustrent la réponse dynamique des deux commandes en termes de puissance, tension, courant et rapport cyclique.

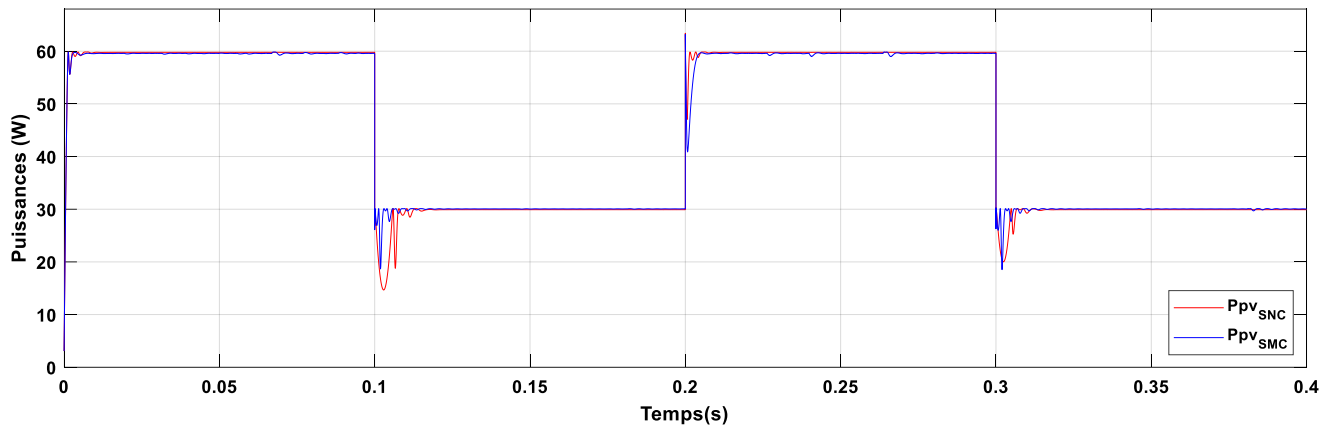


Figure III.9 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{pv} (scénario 2).

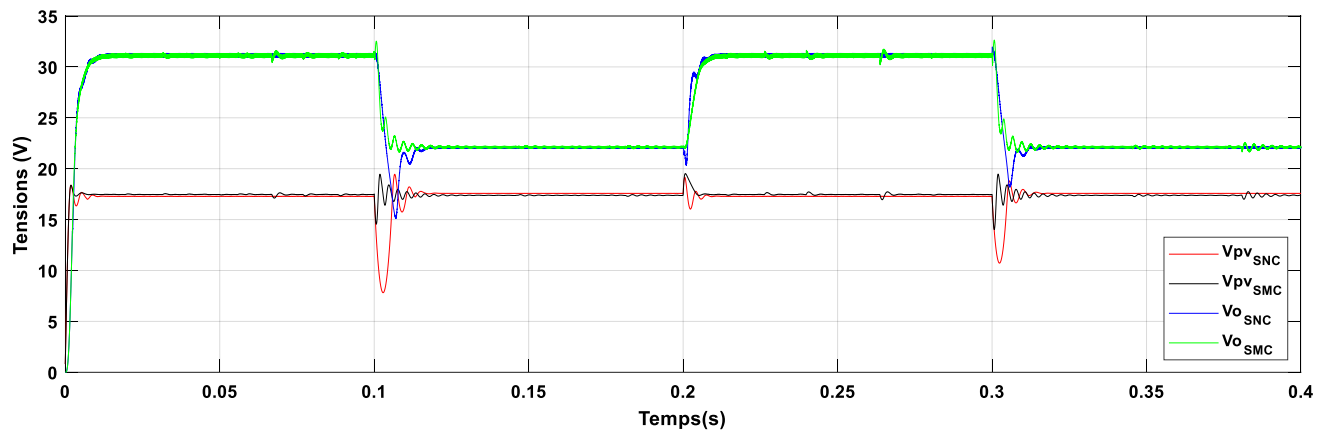


Figure III.10 Évolution des tensions (scénario 2).

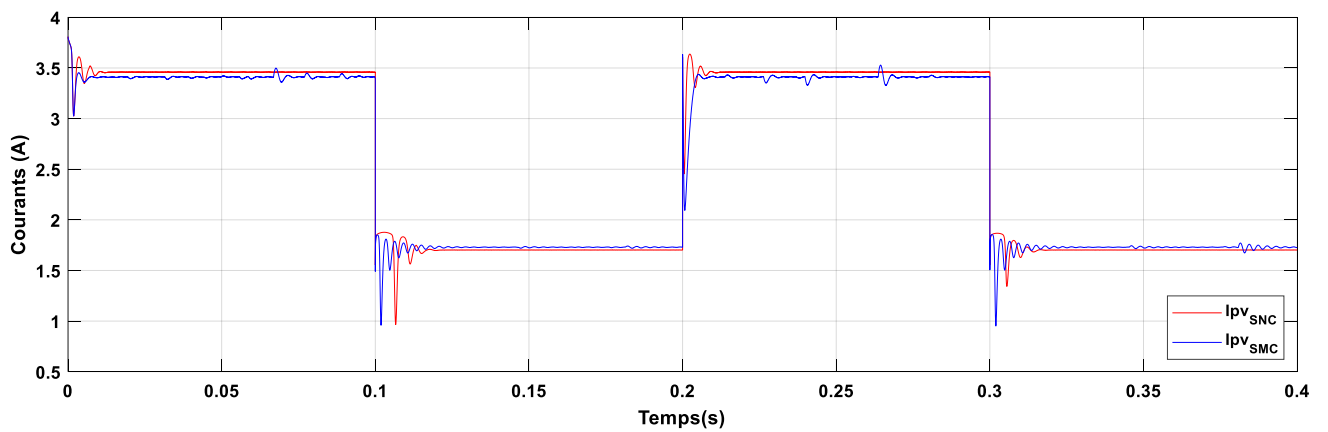


Figure III.11 Évolution du courant photovoltaïque I_{pv} (scénario 2).

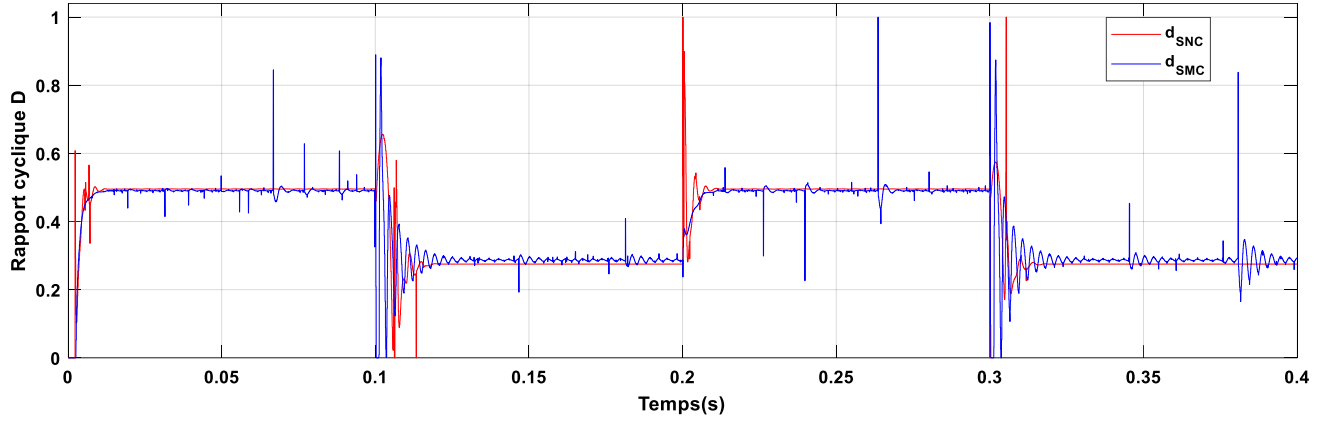


Figure III.12 Évolution du rapport cyclique d (scénario 2).

Lors de la variation de l'irradiation solaire, les deux méthodes s'adaptent au nouveau point de fonctionnement. Toutefois, la commande synergétique atteint plus rapidement le nouveau MPP avec moins de fluctuations. Les tensions, les courants ainsi que le rapport cyclique présentent une meilleure stabilité, démontrant la robustesse de cette commande face aux perturbations climatiques.

Scénario 3

Afin d'étudier l'influence simultanée de la température et de l'irradiation sur les performances du système photovoltaïque, une troisième simulation a été réalisée sous une température élevée de $T=45^{\circ}\text{C}$ avec une variation de l'éclairement entre $G=500 \text{ W/m}^2$ et $G=1000 \text{ W/m}^2$. Les figures (Figure III.13), (Figure III.14), (Figure III.15), (Figure III.16) montrent le comportement dynamique des deux stratégies de commande ainsi que leur capacité à assurer le suivi du point de puissance maximale dans des conditions de fonctionnement.

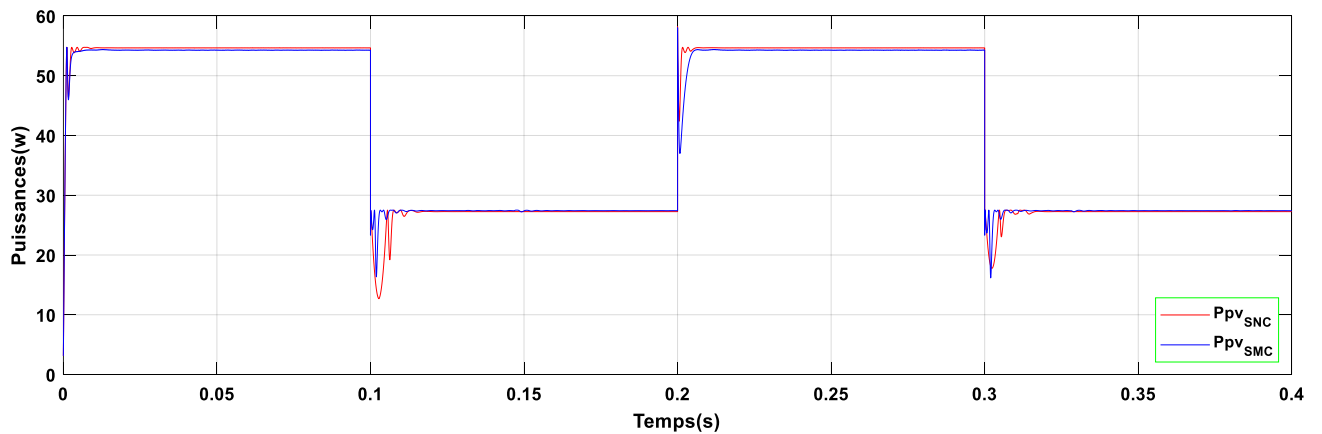


Figure III.13 Évolution de la puissance photovoltaïque P_{pv} (scénario 3).

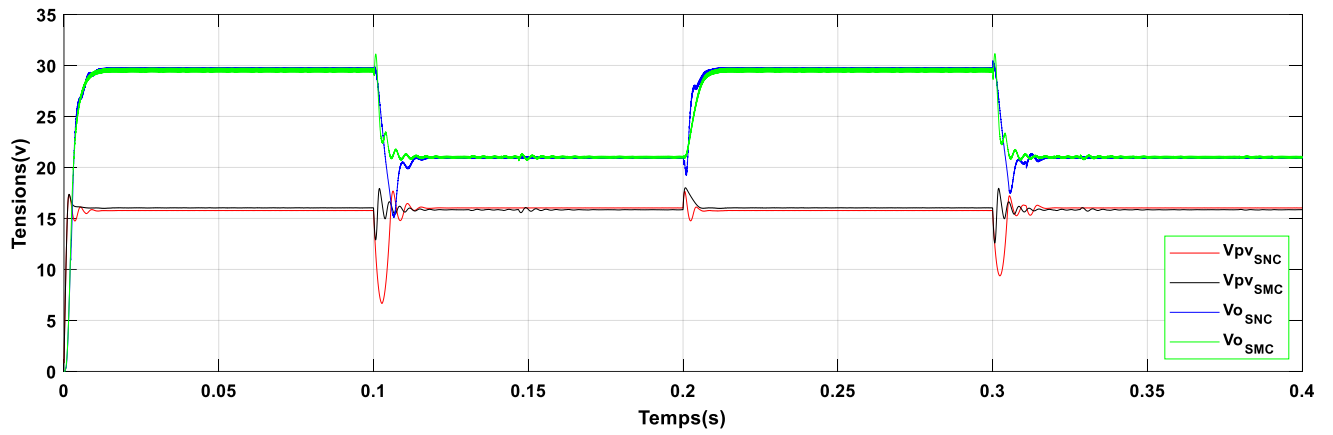


Figure III.14 Évolution des tensions (scénario 3).

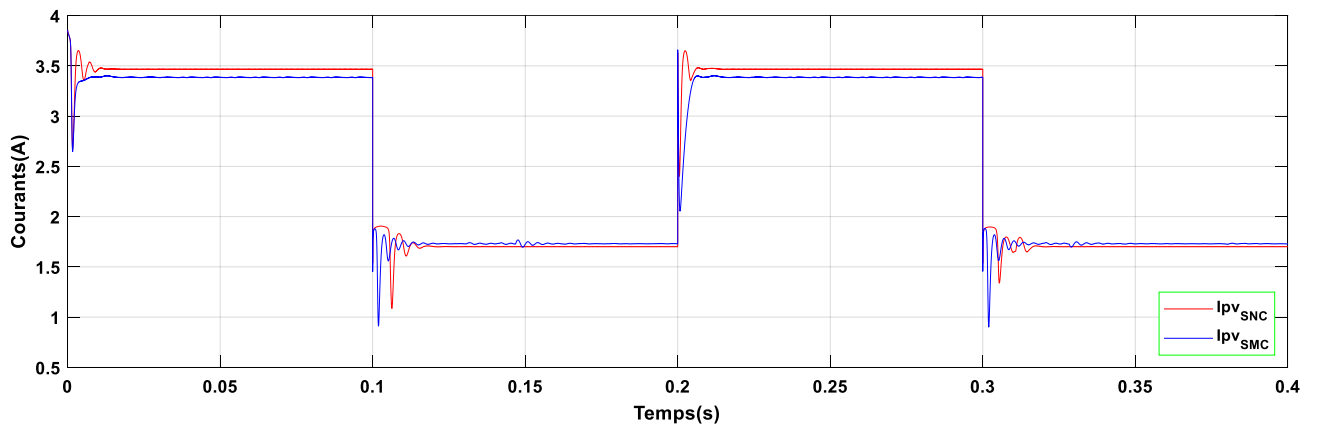


Figure III.15 Évolution du courant photovoltaïque I_{pv} (scénario 3).

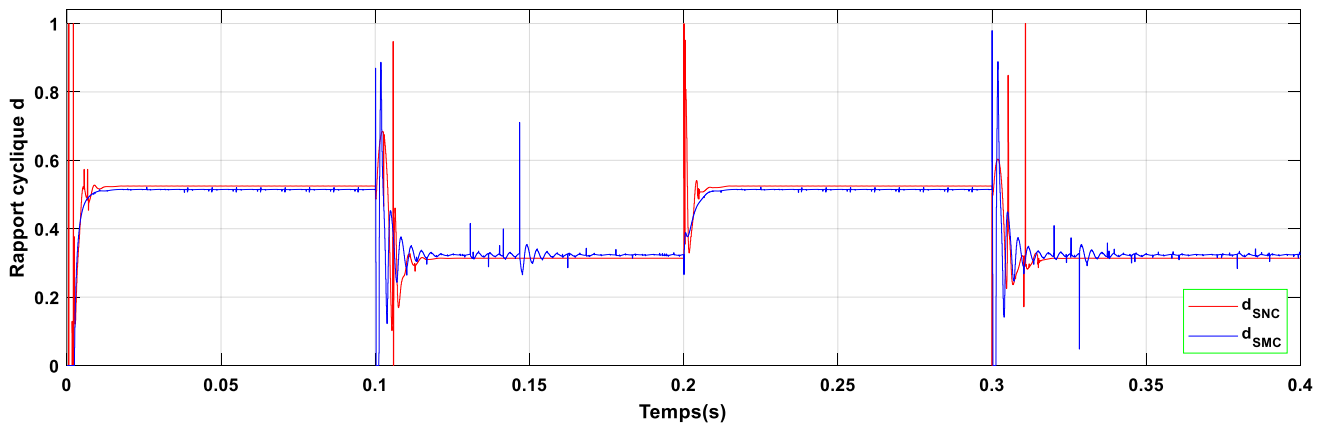


Figure III.16 Évolution du rapport cyclique d (scénario 3).

Malgré l'augmentation de la température et la variation de l'irradiation, la commande synergétique conserve d'excellentes performances dynamiques. Les résultats montrent une

convergence rapide vers le point de fonctionnement optimal, une réduction significative des oscillations ainsi qu'une meilleure stabilité par rapport à la commande par mode glissant. Cela confirme l'efficacité de la stratégie proposée dans différentes conditions de fonctionnement.

Synthèse des résultats

Les résultats obtenus montrent que la commande synergétique améliore considérablement les performances du système photovoltaïque. Comparée à la commande par mode glissant, elle assure une convergence plus rapide vers le MPP, une meilleure précision de poursuite et une réduction importante des oscillations en régime permanent. De plus, elle présente une forte robustesse face aux variations de l'irradiation et de la température, ce qui permet d'optimiser l'extraction de la puissance maximale et d'améliorer les performances globales du système photovoltaïque.

III.4 Analyse comparative des méthodes de suivi du point de puissance maximale

À titre de comparaison entre toutes les méthodes utilisées pour suivre le point de puissance maximale des systèmes photovoltaïques classiques et modernes.

Tout d'abord, nous avons vu l'algorithme Perturbation et Observation (P&O), qui a produit de bons résultats de suivi. Malgré sa simplicité, il souffre d'un compromis entre vitesse et précision. Une très grande perturbation accélère la convergence mais augmente les oscillations, tandis qu'une faible perturbation réduit les oscillations mais ralentit la réponse.

Comme alternative, nous avons étudié l'algorithme de conductance incrémentale (IC). Cette méthode améliore les performances en utilisant la condition $\frac{dP}{dV} = 0$, permettant une meilleure précision que P&O. Elle reste cependant limitée face à l'évolution rapide du rayonnement et nécessite des calculs plus complexes. En raison de la simplicité de mise en œuvre, ces méthodes présentent certaines limites, notamment les oscillations autour du point de puissance maximale et la sensibilité aux changements rapides des conditions environnementales.

Par la suite, afin de surmonter ces limitations la commande par mode glissant (SMC) a été appliquée. Cette technique a montré une amélioration notable de la rapidité de convergence et de la stabilité du système par rapport aux méthodes conventionnelles elle se distingue également par sa robustesse face aux incertitudes du modèle et aux perturbations externes. Cependant, la commande par mode glissant présente le phénomène de chattering (oscillations de haute

fréquence) susceptible de dégrader les performances du système et d'affecter les composants de puissance.

En revanche, les approches basées sur le contrôle synergétique (SCT) offrent des performances nettement supérieures. Elle repose sur la définition de la variable globale (macro-variable ψ) qui force le système à évoluer vers la surface d'attraction, assurant ainsi une convergence rapide et stable vers le point de puissance maximale (MPP). Le contrôleur non linéaire synergique (SCT) permet :

- Convergence rapide
- Réduction significative des oscillations.
- Meilleure robustesse aux perturbations.

En tant que développement et complément de cette méthode, la méthode SNC principalement basée sur le paramètre β a donné les meilleurs résultats car elle a permis

- Accélérer davantage la dynamique du système.
- Améliorer la précision.
- Réduire les oscillations autour du MPP à presque zéro.

Cependant, ces méthodes sont plus complexes et nécessitent une modélisation minutieuse du système, ce qui peut compliquer leur mise en œuvre pratique. [22]

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une commande synergétique a été proposée et appliquée au suivi du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque, en réponse aux limitations des méthodes conventionnelles de MPPT ainsi qu'aux contraintes associées à la commande par mode glissant. Après la modélisation du système et l'établissement des lois de commande SCT et SNC, des simulations ont été réalisées sous Matlab/Simulink afin d'évaluer les performances de l'approche dans des conditions de fonctionnement variables.

Les résultats obtenus montrent que la commande synergétique garantit une convergence rapide et précise vers le point de puissance maximale, tout en réduisant significativement les oscillations et en améliorant la stabilité du système. Par ailleurs, la version avancée SNC a permis d'accroître la rapidité de convergence ainsi que la qualité de la réponse dynamique.

Ainsi, les performances observées confirment la robustesse et l'efficacité de la commande synergétique, ce qui en fait une approche particulièrement adaptée aux systèmes photovoltaïques soumis à des variations climatiques importantes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les variations de l'irradiance solaire, de la température ainsi que les incertitudes inhérentes au système (vieillessement des composants, tolérances de fabrication et bruits de mesure) rendent la modélisation des systèmes photovoltaïques complexe, incertaine et fortement non linéaire. Ces caractéristiques, associées à des changements environnementaux souvent rapides et difficilement prévisibles, compliquent l'extraction du point de puissance maximale (MPP).

Afin de s'affranchir du phénomène de broutement qui engendre des oscillations à haute fréquence susceptibles d'endommager les composants du système et de dégrader ses performances globales, une stratégie de commande synergétique (SNC-MPPT) est proposée pour résoudre le problème du suivi du point de puissance maximale. Contrairement aux approches conventionnelles, à savoir la commande SMC, la stratégie développée engendre un signal de commande lisse et continu qui garantit un suivi rapide et précis du MPP tout en renforçant la robustesse du système face aux incertitudes paramétriques et aux perturbations environnementales.

La stabilité du système en boucle fermée est rigoureusement démontrée à l'aide du théorème de Lyapunov, garantissant la convergence asymptotique de l'erreur de suivi vers zéro. Des simulations numériques, réalisées sous différents profils d'irradiance et de température, sont menées afin d'évaluer les performances de la stratégie proposée. Les résultats obtenus montrent que la SNC-MPPT améliore significativement l'efficacité énergétique et la robustesse du système par rapport à l'algorithme classique SMC-MPPT, notamment lors des régimes transitoires et en présence de variations brusques des conditions climatiques.

Enfin, afin de consolider ces résultats encourageants, les travaux futurs porteront sur la validation expérimentale de la stratégie SNC-MPPT à travers sa mise en œuvre sur une plateforme photovoltaïque réelle. Cette étape permettra d'évaluer ses performances dans des conditions d'exploitation réelles et de confronter les résultats théoriques et numériques aux contraintes pratiques d'implantation.

Références

Références bibliographiques

- [1] S. Chen, J. Zhang, Z. Wei, H. Cheng, and S. Lv: Towards renewable-dominated energy systems: role of green hydrogen. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 12(6) (2024), 1697–1709.
- [2] T. Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, and N. Prabakaran: A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43(2022), 100939.
- [3] L. Zhang, et al.: An online maximum power point capturing technique for high-efficiency power generation of solar photovoltaic systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(2) (2018), 357–368.
- [4] M. E. Girgis and N. A. Elkhateeb: Enhancing photovoltaic MPPT with P&O algorithm performance based on adaptive PID control using exponential forgetting recursive least squares method. *Renewable Energy*, 237(2024), 121801.
- [5] N. Kumar, I. Hussain, B. Singh, and B. K. Panigrahi: Self-Adaptive Incremental Conductance Algorithm for swift and Ripple-Free maximum power harvesting from PV array. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5) (2017), 2031–2041.
- [6] N. Zhani and H. Mahmoudi: Comparison of the performance of MPPT control techniques (Fuzzy Logic, Incremental Conductance and Perturb & Observe) under MATLAB/Simulink. *IFAC-PapersOnLine*, 58(13) (2024), 617–623.
- [7] Mojallizadeh, Mohammad Rasool, et al. "Designing a new robust sliding mode controller for maximum power point tracking of photovoltaic cells." *Solar Energy* 132 (2016): 538-546.
- [8] Taissala, Awe, et al. "An optimized synergetic nonlinear controller (OSNC) based maximum power point tracking for a standalone photovoltaic system using a boost converter." *Energy Reports* 8 (2022): 107-122.
- [9] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2014, pp. 184–186.

- [10] A. Jäger-Waldau, PV Status Report 2018, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
- [11] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [12] A. Goetzberger and V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, vol. 112, pp. 89-112.
- [13] T. Markvart, Solar Electricity, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, 2000, pp. 45-78.
- [14] A. K. Rai, N. D. Kaushika, B. Singh, et al., "Simulation model of SPV cell, module and array for evaluation of environmental impacts," Solar Energy, 2004, vol. 76, no. 5, pp. 585-595.
- [15] Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), Revue des Energies Renouvelables, vol. 16, no. 3, 2013, Algeria.
- [16] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 89-98.
- [17] A. M. Othman, M. M. M. El-Arini, A. Ghitass, and A. Fathy, "Real-world maximum power point tracking simulation of PV system based on fuzzy logic control," NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 186–194.
- [18] T. Radjai, L. Rahmani, S. Mekhilef, and J. P. Gaubert, "Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE," Solar Energy, 2014, vol. 110, pp. 325–337.
- [19] Farhat, m., Hussein, m., et Atallah, a. m. Enhancement Performance of a Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System Based on PI-Genetic Algorithm (PI-GA) Controller. In: Middle East Power Systems Conference, IEEE, 2017, pp. 19–21.
- [20] Kumi, E. N. Technical and Economic Analysis of a 1 MW Grid-Connected Solar System. Thesis submitted to the School of Graduate Studies, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, 2012.

- [21] SERA, Dezso, MATHE, Laszlo, KEREKES, Tamas, et al. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 1070–1078.
- [22] T. Eseram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [23] M. S. Mahmoud, "Concept of sliding modes," dans *Advanced Control Design with Application to Electromechanical Systems*, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 129-130.
- [24] M. Loucif, Synthèse de lois de commande non linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur, Ph.D. dissertation, Univ. Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2016.
- [25] A. Benamrouche, A. Aitouche, et A. Benaïssa, Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque avec poursuite du point de puissance maximale, Mémoire de Master, Univ. Akli Mohand Oulhadj, Bouira, Algérie, 2018.
- [26] N. Benamrouche, Commande par mode glissant appliquée à un système photovoltaïque avec poursuite du point de puissance maximale, Mémoire de Master, Univ. Mohamed Khider de Biskra, Biskra, Algérie.
- [27] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [28] H. Haken, *Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology*, 3rd ed., Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [29] S. Sastry, *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*, New York: Springer-Verlag, 1999, pp. 1-25.
- [30] P. V. S. Sobhan, M. Subba Rao, A. Sriharibabu, and N. B. Kumar, "Fast Converging MPPT Technique for Photovoltaic System Using Synergetic Controller," *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, vol. 14, no. 6, pp. 582–592, 2019.