

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 industriel

Par : - Belmezouar Alaeddine

- Belmiloud Amir

Sujet

Commande MPPT Photovoltaïque Via Un Observateur Par
Mode Glissant

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2025, devant le jury composé de :

Mme Meradi Dounia	Grade	Univ-BBA	Président
M Mebrek Abdelhakim	Grade	Univ-BBA	Examineur
M Bouchama Ziyad	Grade	Univ-BBA	Encadrant
M Benheniche Abdelhak	Grade	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements à nos encadreurs, Monsieur **Bouchama Ziyade** Professeur à **Université Mohamed el-Bachir el-Ibrahimi**, Prof à l'Université du **Université Mohamed el-Bachir el-Ibrahimi**, Monsieur **Salah Saadi**, pour l'aide qu'ils nous ont apportés, pour leur patience et leurs encouragements.

Nous remercions tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Monsieur **Meradi Dounia** Professeur à **Université Mohamed el-Bachir el-Ibrahimi**, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury du projet de fin d'études. Monsieur **Mebrek Abdelhakim** Professeur à Université **Mohamed el-Bachir el-Ibrahimi** pour avoir accepté d'être l'examineur, pour l'intérêt qu'ils y ont porté, et pour les différentes remarques constructives dont ils ont fait preuve dans leur rapport.

Nous sommes très reconnaissants au Prof **Salah Saadi**

Pour son aide précieuse durant la période de la rédaction.

Enfin, Nos sincères remerciements vont aussi aux personnes qui nous ont aidés en contribuant, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

À nos chers parents, avec toute notre profonde gratitude et notre sincère reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis, la confiance qu'ils nous ont accordée, et tout l'amour dont ils nous ont entourés ;

À nos frères et sœurs , pour leur soutien et leur affection constants ;

À tous les membres de nos familles et à nos amis ;

À nos camarades de promotion ;

À toutes les personnes qui nous sont chères, même si nous avons omis de les citer

;

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet, nous vous disons : merci du fond du cœur.

Remerciement	2
Dédicace	3
Résumé :	10
Introduction :	15
I.1- Energies renouvelables :	15
I.1.1- Energie hydraulique :	15
I.1.1.1 Avantages de l'énergie hydraulique :	16
I.1.1.2 Inconvénients de l'énergie hydraulique :	16
I.1.2 Energie éolienne :	16
I.1.2.1. Avantages de l'énergie éolienne :	17
I.1.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne :	17
I.1.3 Energie solaire :	17
I.1.4 Potentiel solaire en Algérie :	17
I.1.5 Différentes technologies solaires :	18
I.1.5.1 Solaire à concentration thermodynamique :	18
I.1.5.2 Solaire thermique :	18
I.1.5.3 Solaire photovoltaïque :	19
I.1.6 Différentes technologies de cellules photovoltaïques :	19
I.1.6.1 Silicium :	19
I.1.6.2 Silicium monocristallin :	20
I.1.6.3 Silicium multicristallin (Polycristallin) :	20
I.1.6.4 Couches minces :	20
I.1.7 Matériel de l'énergie photovoltaïque :	21
I.1.8.1 Système PV autonome :	22
I.1.8.2 Système PV raccordé au réseau	23
I.1.8.3 Système hybride :	23
I.1.9 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :	24
I.1.9.1 Avantages des systèmes photovoltaïques :	24
I.1.9.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques :	24
I.1.10 Modélisation du système photovoltaïque :	25
I.1.10.1 Différentes structures du convertisseur DC/DC :	25
I.1.10.2 Convertisseur dévolteur « Buck » :	25
I.1.10.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :	25
I.1.10.4 Convertisseur survolteur (Boost) :	26
I.11 Conclusion :	28
II.1 Le mode glissant :	30

II.1.1 Introduction :.....	30
II.2 Système à structure variable :.....	31
II.2.1 Principe de la commande à structure variable par régime glissant :.....	31
II.2.1.1 Fonction de commutation :.....	32
II.2.1.2 Hyperplan de commutation :	32
II.2.1.3 Régime glissant :.....	32
II.2.1.4 Surface de glissement :.....	32
II.2.1.4.a Le mode de convergence (MC) :	32
II.2.1.4.b Le mode de glissement (MG) :	32
II.2.1.4.c Le mode du régime permanent (MRP) :.....	33
II.2.2 Types de commutation des systèmes à structure variable :	33
II.2.2.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande :.....	33
II.2.2.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état :	34
II.2.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec commande équivalente :.....	34
II.3 Description du mode glissant :	35
II.3.1 Définition du mode glissant :.....	35
II.3.2 Explication du phénomène du glissement :.....	35
II.4 L'observateur d'état :	36
II.4.1 Introduction :.....	36
II.4.2 Les activités d'un observateur d'état :.....	36
II.4.2.1 Limitation physique ou économique des capteurs :.....	36
II.4.2.2 Commande basée sur retour d'état :.....	37
II.4.2.3 Estimation temps réel :	37
II.4.2.4 Robustesse et fiabilité :	37
II.4.2.5 Optimisation des performances :.....	37
II.4.3 Modèle d'état d'un système linéaire :.....	37
II.4.3.1 Forme générale :.....	37
II.4.3.3 Interprétation :	38
II.4.3.4 Exemple : Système masse-ressort-amortisseur :	38
II.4.4 Observateur d'état de Luenberger :.....	38
II.4.4.1 Rappel du modèle d'état :.....	38
II.4.4.2 Forme de l'observateur de Luenberger : [31]	39
II.4.4.3 Erreur d'estimation : [31]	39
II.4.4.4 Choix du gain L : [31]	39
II.4.4.5 Conditions d'existence : Observabilité :	39

II.4.5 Observateur dans un contexte non linéaire :	40
II.4.6 Application dans la commande par mode glissant.....	40
II.4.7 Conclusion :	40
III.2 Description du système et formulation du problème :	42
III.2.1 Système photovoltaïque (PV) :	42
III.2.2 Convertisseur Boost DC–DC :	43
III.3 Conception du Contrôleur :	43
III.3.1 Conception d’Observateur de Perturbations (DO) :	44
III.4 Analyse de stabilité :	47
III.5 Résultats de simulation :	48
III.6 Conclusion	60

Figure I.1 Énergie hydraulique.	15
Figure I.2 Énergie éolienne.	16
Figure I.3 Énergie solaire.	17
Figure I.4 Potentiel solaire en Algérie.	18
Figure I.5 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	19
Figure I.6 Photos de cellules monocristallines et multicristallines.	20
Figure I.7 Les couches minces.	21
Figure I.8 Schéma synoptique d'un Système photovoltaïque.....	22
Figure I.9 Structure d'un système PV autonome.	23
Figure I.10 Structure d'un système PV raccordé au réseau.....	23
Figure I.11 Exemple de la structure d'un système PV hybride.....	24
Figure I.12 Circuit idéal de Convertisseur dévolteur.	25
Figure I.13 Convertisseur Buck-Boost.	26
Figure I.14 Convertisseur survolteur (Boost).	26
Figure I.15 b) structure avec interrupteur fermé , c) structure avec interrupteur ouvert.	27
Figure II.1 les différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	33
Figure II.3 structures de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état	34
Figure II.4 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec commande équivalente	34
Figure II.5 Démonstration du mode glissement.....	35
Figure III.1 Schéma-bloc du système PV doté d'un contrôleur MPPT.....	42
Figure III.2 Évolution de l'éclairement (1 ^{er} scénario).....	50
Figure III.3 Caractéristiques I-V et P-V du système photovoltaïque (1 ^{er} scénario).....	50
Figure III.4 Evolution de la puissance photovoltaïque (1 ^{er} scénario)	51
Figure III.5. Evolution de la tension photovoltaïque (1 ^{er} scénario)	51
Figure III.6 Evolution du courant photovoltaïque (2 ^{ème} scénario-a-)	52
Figure III.7 Evolution de la tension de charge (1 ^{er} scénario)	52
Figure III.8 Evolution du courant de charge (1 ^{er} scénario)	53
Figure III.9 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (1 ^{er} scénario)	53
Figure III.10 Evolution de la puissance photovoltaïque (2 ^{ème} scénario).....	54
Figure III.11 Evolution de la tension photovoltaïque (2 ^{ème} scénario)	55
Figure III.12 Evolution du courant photovoltaïque (2 ^{ème} scénario)	55
Figure III.13 Evolution de la tension de charge (2 ^{ème} scénario)	56
Figure III.14 Evolution du courant de charge (2 ^{ème} scénario)	56

Figure III.15 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (2-ème scénario).....	56
Figure III.16 Evolution de la puissance photovoltaïque (3^{ème} scénario).....	57
Figure III.17 Evolution de la tension photovoltaïque (3^{ème} scénario)	58
Figure III.18 Evolution du courant photovoltaïque (3^{ème} scénario).....	58
Figure III.19 Evolution de la tension de charge (3^{ème} scénario)	58
Figure III.20 Evolution du courant de charge (3^{ème} scénario).....	59
Figure III.21 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (3^{ème} scénario)	59

Tableau III. 1. Paramètres du Convertisseur DC-DC.....	49
Tableau III. 2. Spécifications du système.....	49

Résumé :

Résumé : L'énergie solaire souffre d'un faible rendement lié à divers facteurs environnementaux. Pour maximiser l'énergie extraite, des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisés, souvent en association avec des convertisseurs DC-DC de type Boost. Les méthodes classiques, telles que Perturb and Observe (P&O) ou Incremental Conductance (IC), sont simples, mais sujettes à des oscillations et nécessitent plusieurs capteurs. Des approches intelligentes offrent une plus grande robustesse, mais exigent des ressources de calcul élevées. La commande par mode glissant (SMC), reconnue pour sa robustesse, présente néanmoins un phénomène de chattering ainsi qu'une complexité accrue due à l'usage de nombreux capteurs. Pour pallier ces limites, ce mémoire étudie une stratégie de commande innovante : la commande adaptative par mode glissant basée sur un observateur (ASMC), intégrant un observateur de perturbations. Cette approche vise à réduire le nombre de capteurs nécessaires, à éliminer le chattering et à améliorer les performances globales du suivi MPPT dans les systèmes photovoltaïques.

Mots-clés : Énergie solaire, Systèmes photovoltaïques, MPPT (Maximum Power Point Tracking), Commande par mode glissant (SMC), Observateur de perturbations (DO).

Abstract: Solar energy suffers from low efficiency due to various environmental factors. To maximize the extracted energy, Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are commonly used, often in combination with Boost-type DC-DC converters. Conventional methods such as Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IC) are simple but suffer from oscillations and require multiple sensors. Intelligent approaches offer greater robustness but demand significant computational resources. Sliding Mode Control (SMC), known for its robustness, is affected by chattering and increased complexity due to the use of numerous sensors. To address these limitations, this thesis investigates an innovative control strategy: observer-based Adaptive Sliding Mode Control (ASMC), which integrates a disturbance observer. This approach aims to reduce the number of required sensors, eliminate chattering, and enhance the overall performance of MPPT in photovoltaic systems.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic systems, MPPT (Maximum Power Point Tracking), Sliding Mode Control (SMC), Disturbance observer (DO).

ملخص: تعاني الطاقة الشمسية من انخفاض الكفاءة بسبب عوامل بيئية مختلفة. ولزيادة الطاقة المستخرجة إلى الحد الأقصى، تُستخدم خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، وغالباً ما تكون مقترنة بمحولات التيار المستمر-التناوب المعززة. الطرق التقليدية، مثل P&O (P&O) أو التوصيل التزايدية (IC) بسيطة ولكنها عرضة للتذبذبات وتتطلب أجهزة استشعار متعددة. توفر الأساليب الذكية متانة أكبر، ولكنها تتطلب موارد حوسبة عالية. ومع ذلك، فإن التحكم في الوضع المنزلق (SMC)، المعروف بقوته، يقدم ظاهرة التذبذب وزيادة التعقيد بسبب استخدام العديد من أجهزة الاستشعار. وللتغلب على هذه القيود، تدرس هذه الأطروحة استراتيجية تحكم مبتكرة: التحكم في الوضع المنزلق التكيفي القائم على المراقب (ASMC)، الذي يتضمن مراقباً للاضطرابات. يهدف هذا النهج إلى تقليل عدد أجهزة الاستشعار المطلوبة، والقضاء على التشتت وتحسين الأداء العام لتتبع MPPT في الأنظمة الكهروضوئية.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية، الأنظمة الكهروضوئية، تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، التحكم في الوضع المنزلق (SMC)، مراقب الاضطراب (DO).

Introduction générale

Récemment, l'utilisation des énergies renouvelables a contribué à atténuer la crise énergétique mondiale et à réduire la pollution environnementale. Parmi ces sources, l'énergie solaire se distingue comme une énergie propre, abondante et disponible gratuitement partout dans le monde. Toutefois, un inconvénient majeur de la conversion de l'énergie solaire réside dans le faible rendement des panneaux photovoltaïques, qui dépend de plusieurs facteurs tels que l'irradiation, la température ambiante, la saleté, les conditions de charge et le type de panneau utilisé. L'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires peut être envisagée grâce à l'implémentation d'algorithmes de commande pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ces algorithmes permettent d'extraire un maximum d'énergie du panneau solaire malgré les variations des conditions environnementales, tout en optimisant l'adaptation énergétique entre le panneau solaire et la charge via un convertisseur statique DC-DC. Le convertisseur DC-DC de type Boost est l'un des plus répandus dans les applications photovoltaïques (PV), en raison de son efficacité élevée. Son fonctionnement en mode de conduction continue permet d'extraire une quantité maximale d'énergie de la cellule solaire [1].

Dans la littérature sur le MPPT, des algorithmes tels que Perturb and Observe (P&O) [2] et Incremental Conductance (IC) [3] sont très populaires, en raison de leur simplicité architecturale et de leur facilité de mise en œuvre. Cependant, leurs principaux inconvénients résident dans les oscillations continues autour du point de fonctionnement optimal, ainsi que dans la nécessité d'utiliser des capteurs de courant et de tension. Les approches dites « intelligentes », telles que la logique floue [4], le dérivé proportionnel flou [5], et les réseaux de neurones [6], ont suscité un intérêt croissant grâce à leur flexibilité et leur robustesse. Néanmoins, elles nécessitent des données précises ainsi que des capacités de calcul élevées, ce qui peut limiter leur mise en œuvre pratique. Étant donné la nature non linéaire des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des cellules solaires, l'utilisation d'un contrôleur non linéaire est particulièrement judicieuse pour les systèmes PV. La commande par mode glissant (SMC) représente l'une des techniques les plus prometteuses, en raison de son insensibilité aux variations des paramètres, de sa robustesse et de ses bonnes performances en matière de rejet des perturbations [7]. Cependant, la SMC conventionnelle appliquée aux systèmes PV [8–9] engendre un phénomène de chattering (oscillations rapides indésirables), et sa mise en œuvre requiert plusieurs capteurs pour un suivi efficace du point de puissance maximale.

D'après l'état de l'art sur la commande SMC appliquée aux systèmes PV, la majorité des approches nécessitent l'usage de trois capteurs, ce qui augmente la complexité du système. Il serait donc souhaitable de réduire ce nombre. De plus, les approches actuelles présentent

toujours certaines limitations, telles que le chattering et des performances insatisfaisantes lorsque la tension de sortie initiale est nulle. Ce mémoire de fin d'études vise à surmonter ces défis en étudiant un nouveau type d'observateur combiné à un observateur de perturbations (DO), offrant une solution plus robuste et simplifiée pour le suivi du MPPT. Cette approche, appelée commande adaptative par mode glissant basée sur un observateur (ASMC), est proposée pour améliorer les performances globales du système.

Chapitre : 01

Généralité sur les

énergies renouvelables

Introduction :

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

I.1- Energies renouvelables :**I.1.1- Energie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui exploite la force de l'eau pour produire de l'électricité. Elle est l'une des plus anciennes et des plus répandues dans le monde, contribuant de manière significative à la production d'énergie décarbonée. On distingue deux principales filières d'énergie hydraulique : la grande (centrale de grande et moyenne chute) et la petite hydraulique (usine au fil de l'eau). Les énergies marines (usine marémotrices, hydroliennes, houlomotrices) utilisent aussi la force motrice de l'eau pour produire de l'énergie.

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. [10]



Figure I.1 Énergie hydraulique.

I.1.1.1 Avantages de l'énergie hydraulique :

- Longévité et faible coût de maintenance Énergie propre et renouvelable
- Grande capacité de production.
- Stockage d'énergie (centrales de pompage-turbinage) Flexibilité de production

I.1.1.2 Inconvénients de l'énergie hydraulique :

- Impact écologique sur les écosystèmes Délocalisation des populations Dépendance aux conditions climatiques
- Coût initial élevé
- Risque de catastrophes naturelles Fragmentation des habitats

I.1.2 Energie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision.

La part de l'éolien dans la production d'électricité mondiale atteignait 7,2 % en 2022 et est estimée à 7,8 % en 2023. L'énergie éolienne est principalement développée en Chine (38,1 % du total mondial en 2023), aux États-Unis (18,5 %) et en Allemagne (6,1 %). Les pays où la part de l'éolien dans la production d'électricité est la plus élevée sont en 2023 le Danemark (57,7 %), le Royaume-Uni (28,7 %), l'Allemagne (27,7 %), le Portugal (26,8 %), les Pays-Bas (23,6 %), l'Espagne (22,8 %) et la Suède (20,6 %).

La part de la Chine dans les nouvelles installations de 2024 s'est élevée à 68 %, portant sa part dans la puissance installée éolienne mondiale à 45,8 %. La part de marché de l'Europe est de 14 %. Après environ 40 ans de développement, l'éolien a franchi en juin 2023 la barre symbolique du térawatt de capacité installée dans le monde. [11]



Figure I.2 Énergie éolienne.

I.1.2.1. Avantages de l'énergie éolienne :

- Énergie propre et renouvelable.
- Ressource inépuisable.
- Faible coût de production.
- Énergie décentralisée.
- Création d'emplois.
- Faible empreinte au sol.

I.1.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne :

- Intermittence et variabilité
- Impact sur le paysage et les écosystèmes
- Bruit et nuisance pour la faune locale
- Coût initial élevé
- Problèmes de recyclage des éoliennes

I.1.3 Energie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet que peu de CO₂.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité ou en chaleur.

Les panneaux solaires qui captent cette énergie peuvent être installés sur différentes structures : des ombrières solaires, des photovoltaïques industriels ou agricoles, au sol, etc. [12]



Figure I.3 Énergie solaire.

I.1.4 Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une

température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. [12]

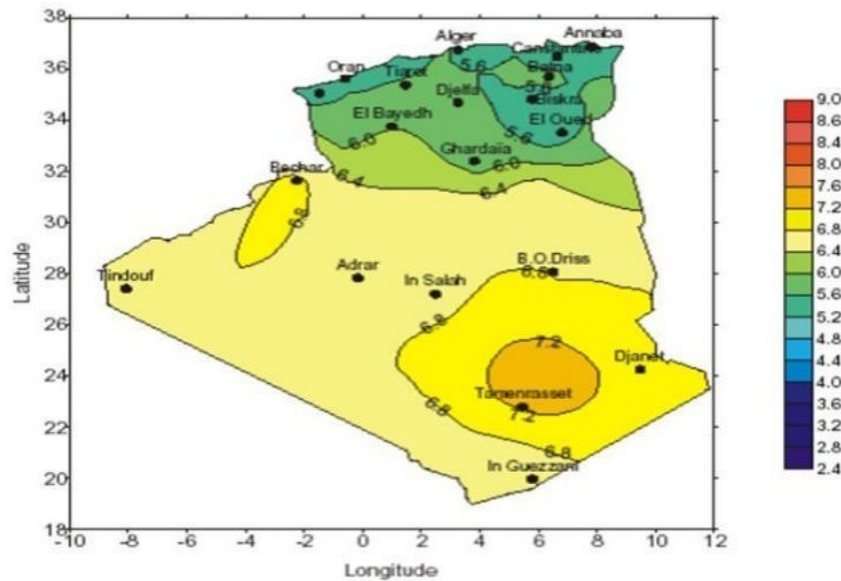


Figure I.4 Potentiel solaire en Algérie.

I.1.5 Différentes technologies solaires :

Il existe trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

I.1.5.1 Solaire à concentration thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire.

À l'image des panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil, en chaleur. Cette chaleur a une température très élevée. Bien supérieure à la température à laquelle elle a été collectée. Elle peut aller de 250 à 800 degrés selon la technique employée.

Cette chaleur sera convertie en électricité au moyen d'un turbine et d'un alternateur comme dans une centrale thermique. [13]

I.1.5.2 Solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire.

Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique. [14]

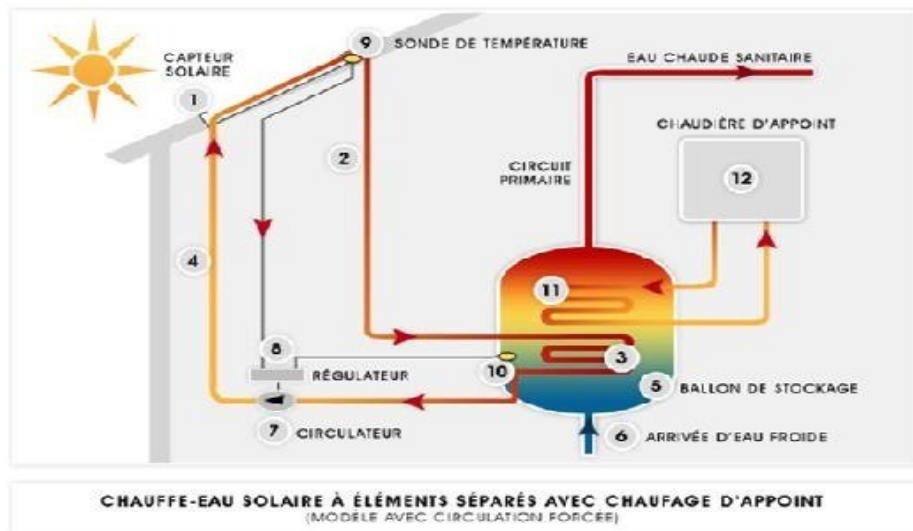


Figure I.5 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique

I.1.5.3 Solaire photovoltaïque :

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent souvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible.

C'est là que rentre en jeu la **cellule photovoltaïque**. Fabriquée en **silicium**, lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. [13,14]

I.1.6 Différentes technologies de cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées avec de nombreux semi-conducteurs, et en fait il existe aujourd'hui trois grands secteurs technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces secteurs participent au marché de manière inégale, et nous allons maintenant discuter de la définition de ces secteurs et des différences entre eux [15].

I.1.6.1 Silicium :

Le silicium est un élément chimique, de symbole Si et de numéro atomique 14. C'est l'élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc.) ou de silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, etc.). C'est un faible

conducteur d'électricité. Il est quasiment insoluble dans l'eau. Il est attaqué par l'acide fluorhydrique (HF) ou un mélange acide fluorhydrique/acide nitrique (HNO₃) en fonction de la phase [15].

Il existe deux types de technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin

I.1.6.2 Silicium monocristallin :

Lorsque le silicone dissous est refroidi, un cristal se forme. Le cristal est coupé en fines tranches représentant les cellules. Ces cellules sont généralement uniformes, intenses et lumineuses. Elles sont utilisées, mais pas dans la plupart des marchés parce qu'elles sont coûteuses. C'est un obstacle unique parce que l'efficacité du monocristallin est la plus élevée entre 12 et 20% [15].

I.1.6.3 Silicium multicristallin (Polycristallin) :

Le silicone multicristallin est le plus répandu et le plus répandu parce qu'il représente 50% des utilisations du marché, et est produit par moulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa composition hétérogène et son efficacité varie de 10 à 14% selon le fabricant. En termes de production et de coût, il est le plus bas pour cette raison, il est largement disponible sur le marché [15].

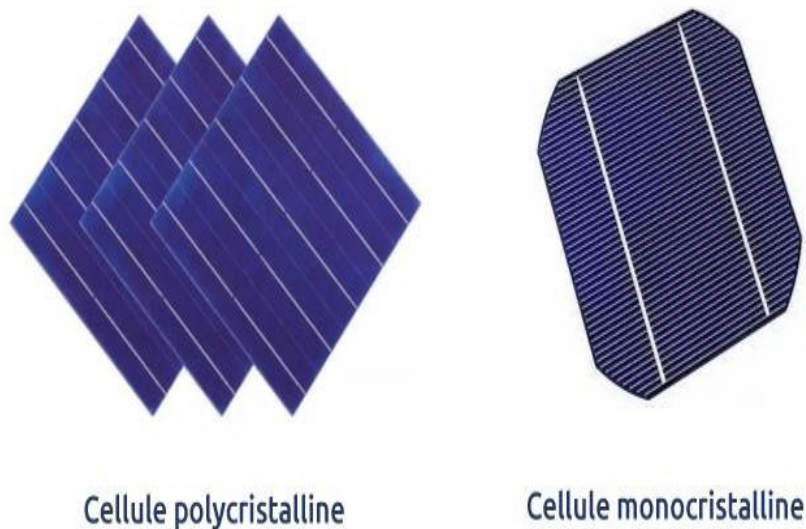
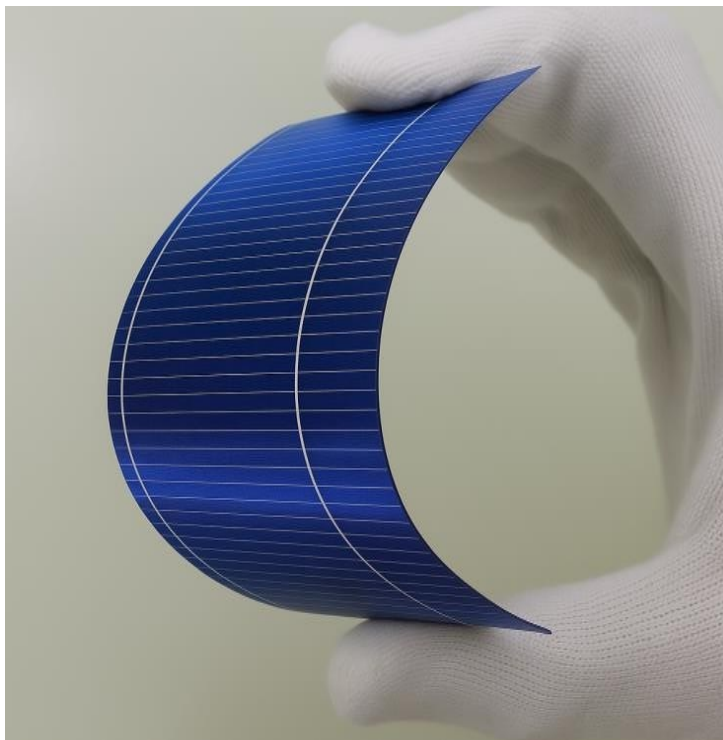


Figure I.6 Photos de cellules monocristallines et multicristallines.

I.1.6.4 Couches minces :

Quel que soit le développement des cellules photovoltaïques, il reste un frein majeur malgré leur large disponibilité, mais le prix du kilowattheure (KWc) est très élevé. (KWc) est l'unité de la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) (1000Wm² et 25°C). De nombreux types de cellules photovoltaïques visent à réduire la quantité de matériaux utilisés pour les produire, les développer et commencer à industrialisés. Ces techniques, appelées dépôt de ruban en couche mince, visent à réduire l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia), Représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est L'utilisation de substrats à bas coût [21] [15].



FigureI.7 Les couches minces.

I.1.7 Matériel de l'énergie photovoltaïque :

- Panneaux Solaires Photovoltaïques (Modules)
- Onduleur (Invertir)
- Régulateur de Charge
- Batteries de Stockage (facultatif)
- Support et Structure de Montage
- Câblage et Connecteurs
- Dispositifs de Protection

I.1.8 Différents types des systèmes photovoltaïques :

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas). Le conditionnement de puissance peut comprendre : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la Figure (I.8). [16]

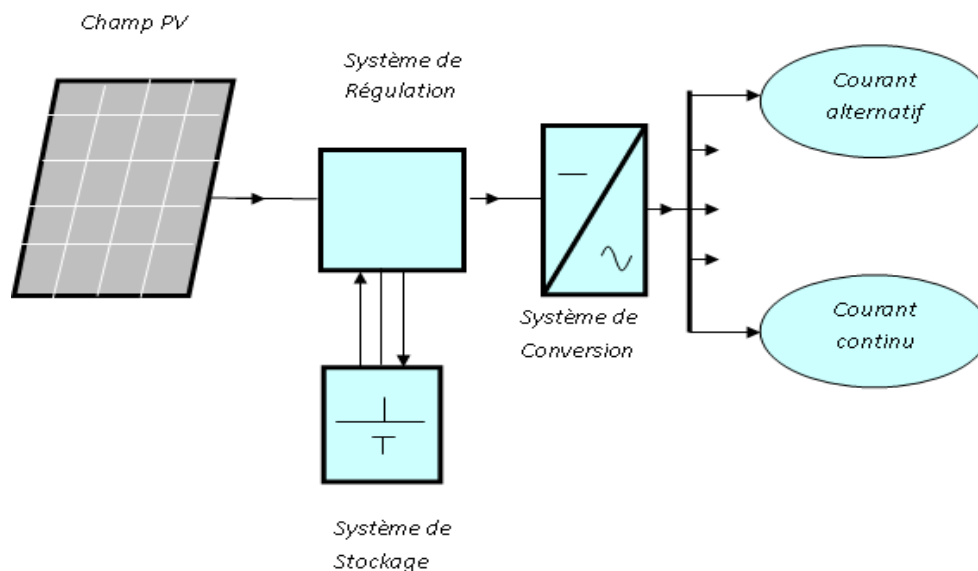


Figure I.8 Schéma synoptique d'un Système photovoltaïque

On distingue trois types de systèmes PV :

- Système PV autonome ;
- Système PV raccordé au réseau ;
- Système hybride.

I.1.8.1 Système PV autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.9) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [17].

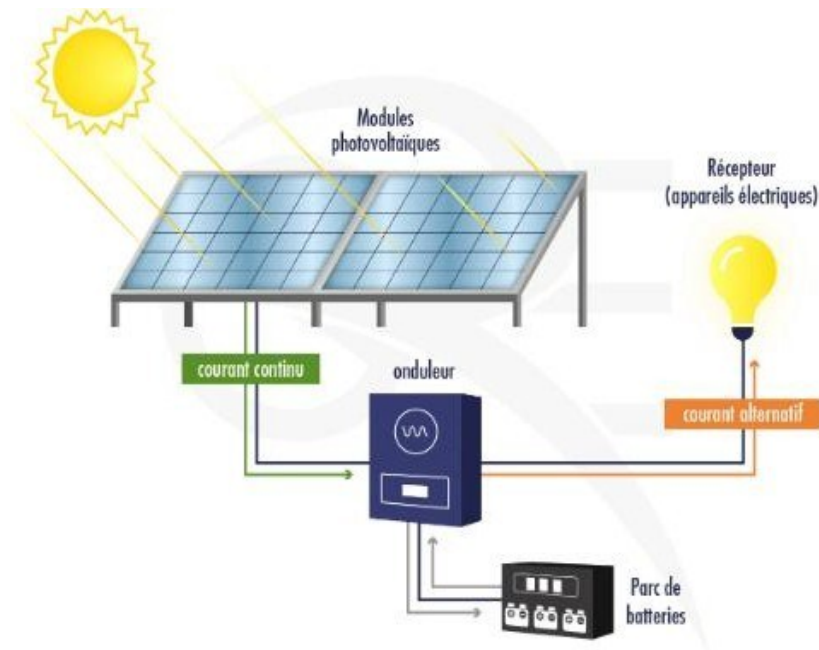


Figure I.9 Structure d'un système PV autonome.

I.1.8.2 Système PV raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [17].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

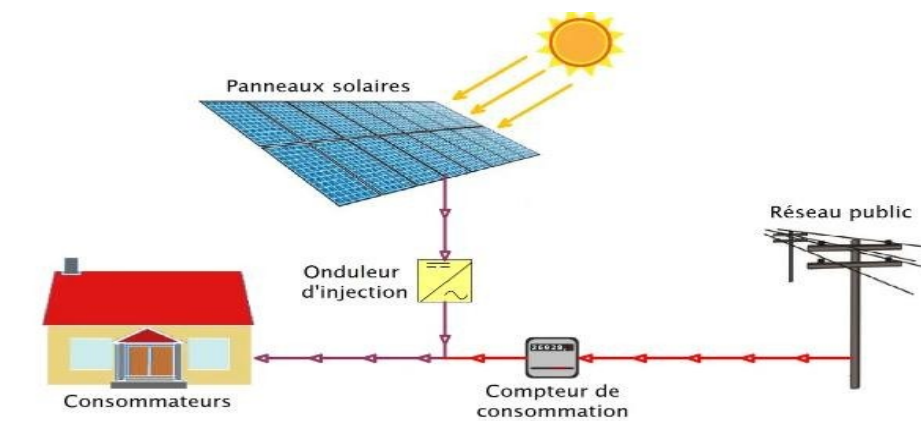


Figure I.10 Structure d'un système PV raccordé au réseau.

I.1.8.3 Système hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [17].

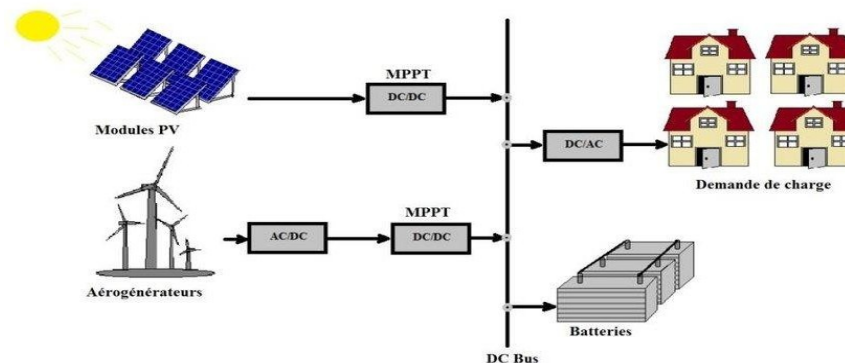


Figure I.11 Exemple de la structure d'un système PV hybride.

I.1.9 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

I.1.9.1 Avantages des systèmes photovoltaïques :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages [16] [17].

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.1.9.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients [17] [18].

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert

des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.1.10 Modélisation du système photovoltaïque :

I.1.10.1 Différentes structures du convertisseur DC/DC :

Dans les systèmes photovoltaïques, il est essentiel d'utiliser des convertisseurs DC/DC pour ajuster la tension entre la source d'énergie (panneau solaire ou batterie) et la charge. Selon la variation de tension désirée, on identifie principalement trois sortes de structures : le convertisseur abaisseur (Buck), l'élevateur (boost) et l'abaisseur-élevateur (Buck-boost) [17].

I.1.10.2 Convertisseur dévolteur « Buck » :

Convertisseur dévolteur est un convertisseur statique continu-continu son rôle principale est de convertir sa tension d'entrée en tension de sortie inférieure. Convertisseur dévolteur est constitué de condensateurs, d'inductance, de diode et de commutateur. Tous ces mécanismes dans cette situation.

Idéal ne consomme aucun watt d'énergie. Habituellement, le switch est un transistor MOSFET ou IGBT, qui sont des dispositifs semi-conducteurs fonctionnant en mode (bloqué-saturé) [17].

La figure (I.12) représente le circuit idéal de l'hacheur série :

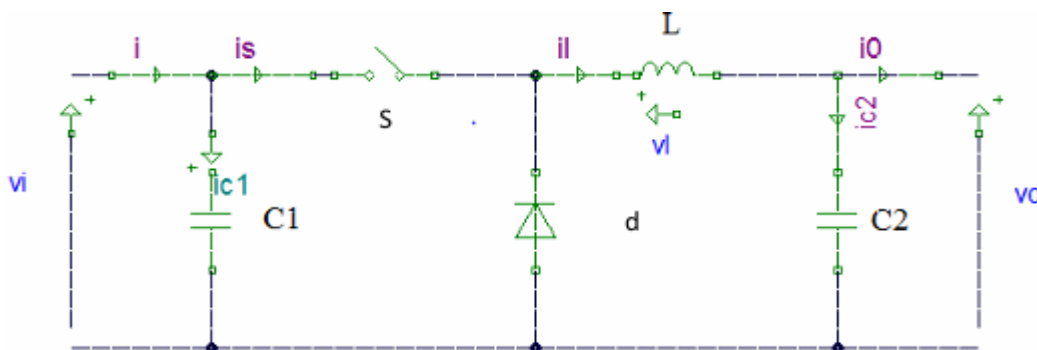


Figure I.12 Circuit idéal de Convertisseur dévolteur.

I.1.10.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Le convertisseur Buck-boost est un convertisseur DC-DC qui combine les fonctions des convertisseurs Buck et boost. Ce type de convertisseur permet à la tension de sortie d'être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée.

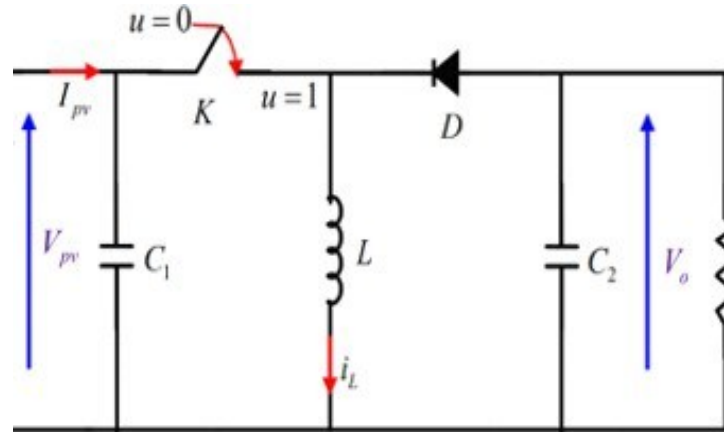


Figure I.13 Convertisseur Buck-Boost.

I.1.10.4 Convertisseur survolteur (Boost) :

Le convertisseur boost, ou convertisseur élévateur, est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue d'une valeur supérieure.

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la sortie, le cycle de fonctionnement de période d'hachage (T) comporte deux états [20].

- L'état d'accumulation de l'énergie : lorsque l'interrupteur est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique, la diode est alors bloquée la charge est alors déconnectée de l'alimentation, cette phase dure de (0) à (DT) .
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa F.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur), le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie, accumulée dans l'inductance vers la capacité, cette phase dure de (DT) à (T) [19] [20].

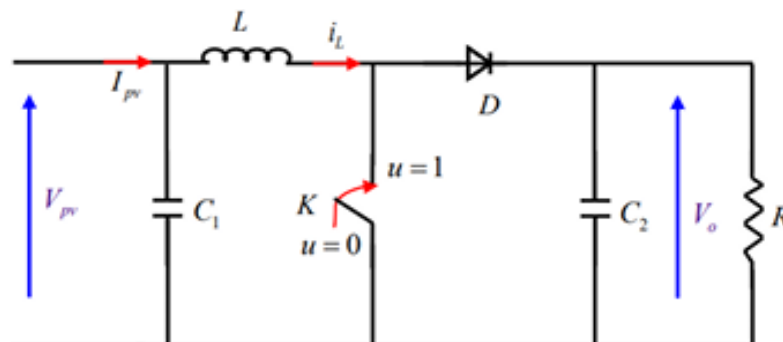


Figure I.14 Convertisseur survolteur (Boost).

Avec :

L : inductance ;

C_1 : condensateur

d'entrée ;

C_2 : condensateur de

sortie.

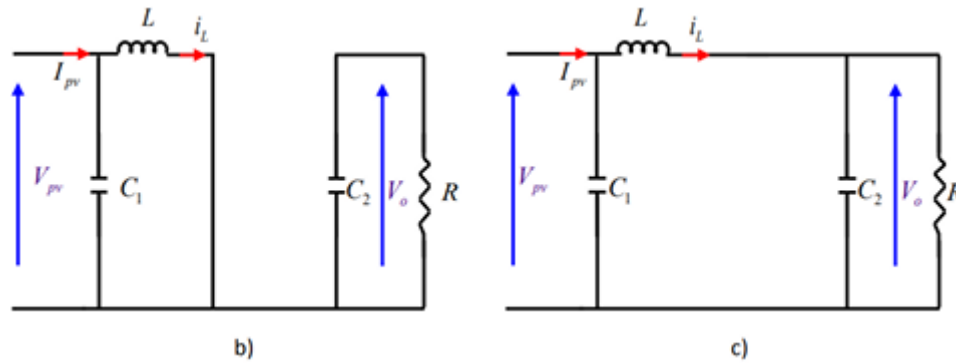


Figure I.15 b) structure avec interrupteur fermé , c) structure avec interrupteur ouvert.

Dans le cas où le K est fermé ($0 < t < \alpha Td$), le circuit du convertisseur devient celui de la figure (I.15.b) et les équations qui régissent son fonctionnement sont :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \tag{I.1}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} \tag{I.2}$$

Dans le cas où le K est ouvert ($\alpha Td < t < Td$) le circuit du convertisseur devient celui de la figure (I.15.c) et les équations qui régissent son fonctionnement sont

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_0}{L} \tag{I.3}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} \tag{I.4}$$

En combinant (I.1) et (I.2), les équations dynamiques de ce convertisseur peuvent s'écrire

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_0}{L} + \frac{V_0}{L} \tag{I.5}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} - \frac{i_L}{C_2} u \tag{I.6}$$

Où : V_0 et i_L et sont respectivement la tension du condensateur de sortie et le courant

d'inductance ;

V_{pv} : tension du panneau photovoltaïque ;

Le paramètre z est la position du commutateur.

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes formes d'énergies renouvelables existantes, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de l'énergie. Nous avons ensuite décrit le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que les modes de connexion possibles, en abordant les principales technologies associées.

Chapitre : 02

Généralité sur Le mode glissant

ET

L'observateur d'état

Introduction :

Dans les systèmes dynamiques complexes, la connaissance complète de l'état du système est essentielle pour la mise en œuvre de lois de commande efficaces et robustes. Cependant, dans la pratique, certaines variables d'état sont inaccessibles à la mesure directe, soit pour des raisons techniques, soit pour des considérations économiques. Pour pallier cette limitation, on fait appel à des observateurs d'état, dont le rôle est d'estimer les variables internes du système à partir des sorties mesurées et des entrées connues.

Parmi les différentes techniques d'estimation, l'observateur par mode glissant s'est imposé comme une méthode puissante et robuste, notamment dans le contexte des systèmes non linéaires ou soumis à des perturbations et incertitudes. Héritée de la théorie de la commande à structure variable, cette approche repose sur l'injection d'un terme discontinu dans la loi d'observation, permettant de forcer l'erreur d'estimation à converger rapidement vers zéro malgré la présence de modèles incertains, de bruits ou de dynamiques non linéaires.

L'observateur par mode glissant présente ainsi plusieurs avantages :

- **Robustesse** vis-à-vis des perturbations et incertitudes ;
- **Convergence rapide** de l'erreur d'estimation ;
- **Simplicité de mise en œuvre**, notamment pour les systèmes affines en entrée.

Toutefois, comme pour la commande par mode glissant, l'observateur peut être sujet à un phénomène de broutement dû à la discontinuité du terme correctif. Des méthodes d'atténuation, telles que l'introduction d'une couche limite ou l'utilisation d'observateurs à mode glissant de second ordre, ont été proposées pour rendre l'estimation plus douce tout en conservant la robustesse.

Dans ce chapitre (ou cette section), nous présentons les principes de base des observateurs par mode glissant, leur conception, leur fonctionnement, ainsi que leurs avantages par rapport aux observateurs classiques, en particulier dans des environnements incertains ou perturbés [22].

II.1 Le mode glissant :**II.1.1 Introduction :**

Les lois de commande classiques du type PID sont très efficaces dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. Les lois de commande dite à structure variable constituent une solution à ces problèmes.

La commande à structure variable (CSV) est, par sa nature, une commande non linéaire, elle est basée sur la commutation de fonctions des variables d'état, utilisées pour créer une variété ou hypersurface de glissement, dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hypersurface. Quand l'état est maintenu sur cette hypersurface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées.

Dans la pratique, l'utilisation de cette technique de commande a été longtemps limitée par les oscillations liées aux commutations de la commande et qui peuvent se manifester sur les grandeurs asservies. Depuis, de nombreuses solutions ont été proposées permettant de réduire ces oscillations : augmentation de la fréquence de commutation, commande continue dans une bande autour de la variété de glissement ou décomposition de la commande en une composante continue de basse fréquence et une commande discontinue de haute fréquence et la méthode de la couche limite où la composante discontinue de la commande est remplacée au voisinage de l'hypersurface de glissement par une fonction continue.

Dans ce chapitre nous allons donner quelques notions fondamentales de la commande à structure variable, et quelques concepts de base de la théorie des modes glissants.[22].

II.2 Système à structure variable :

La commande à structure variable par régime glissant, apparue depuis le début des années 60, grâce aux résultats théoriques du mathématicien A.F. Philipov, est une commande non linéaire basée sur l'utilisation d'un terme discontinu. Après les travaux développés par l'équipe du professeur Emelyanov en union Soviétique et à cause des problèmes de broutements et de réalisation, la commande à structure variable a attendu la fin des années soixante-dix pour connaître sa réapparition et son épopée avec l'avancée de l'électronique et l'informatique. En effet, cette commande est basée sur une commutation à haute fréquence pour un meilleur régime glissant [23].

II.2.1 Principe de la commande à structure variable par régime glissant :

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu' au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement.

La forme d'une commande à structure variable peut être donnée par :

$$\begin{cases} u_i = u_{\max} \\ u_i = u_{\min} \end{cases} \quad \text{si} \quad \begin{cases} S_i(x) < 0 \\ S_i(x) > 0 \end{cases} \quad \text{Avec} \quad i=1, \dots, m \quad (\text{II.1})$$

u_i ($i=1, \dots, m$) : les composantes du vecteur de commande.

Parmi les propriétés des modes glissants :

- La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.
- La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.
- La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement.

II.2.1.1 Fonction de commutation :

La structure de commande est caractérisée par le signe d'une fonction vectorielle $S(x)$ appelée fonction de commutation. Dans le cas des modèles linéaires, la fonction de commutation est choisie comme une fonction linéaire de l'état :

$$S(x) = [S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x)] = Cx \quad (\text{II.2})$$

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_m] . \quad (\text{II.3})$$

Chaque fonction scalaire de commutation $S_j(x)$ décrit une surface linéaire $S_j(x) = 0$.

II.2.1.2 Hyperplan de commutation :

La surface de commutation associée au système de commande à structure variable défini précédemment $S = \{x \in \mathbb{R}^n : S(x) = 0, j=1, \dots, m\}$ est appelée hypersurface de glissement.

II.2.1.3 Régime glissant :

Si pour tout vecteur d'état initial $x(t_0) \in S$ la trajectoire d'état reste dans l'hypersurface S_j , $x(t) \in S, \forall t > t_0$ alors $x(t)$ est un mode glissant pour le système.

II.2.1.4 Surface de glissement :

Si tout point de S est tel qu'il existe des trajectoires d'état hors de S le contenant alors la surface de commutation S est appelée surface de glissement.

Le but d'un système de commande à structure variable est d'amener asymptotiquement l'état du système à partir d'une condition initiale quelconque :

$x(0) = x_0$ vers l'origine de l'espace d'état quand $t \rightarrow \infty$ [23].

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

II.2.1.4.a Le mode de convergence (MC) :

C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence [23].

II.2.1.4.b Le mode de glissement (MG) :

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers

l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par la détermination de la surface de glissement $S(x) = 0$ [23].

II.2.1.4.c Le mode du régime permanent (MRP) :

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse de système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase) il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [23].

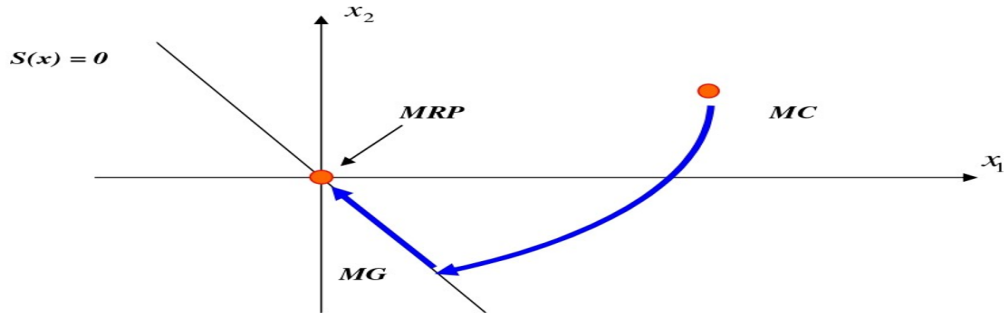


Figure II.1 les différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

II.2.2 Types de commutation des systèmes à structure variable :

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode glissant, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes lois de commandes. La première correspond à la structure la plus simple, appelée structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Et enfin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente"[24].

II.2.2.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande :

Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné par la **figure II.2**. Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'applications aux variateurs de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas à pas.

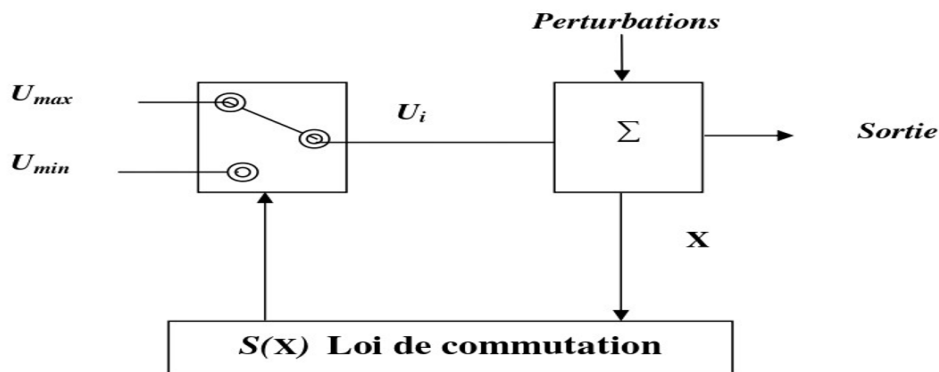


Figure II.2 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

II.2.2.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état :

Le schéma d'une telle structure est représenté sur la figure II.3, c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système [24].

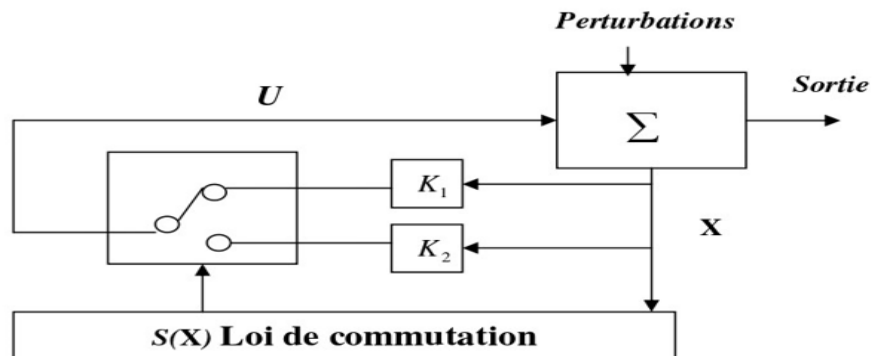


Figure II.3 structures de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

II.2.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec commande équivalente :

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure II.4 présente un avantage réel. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [24].

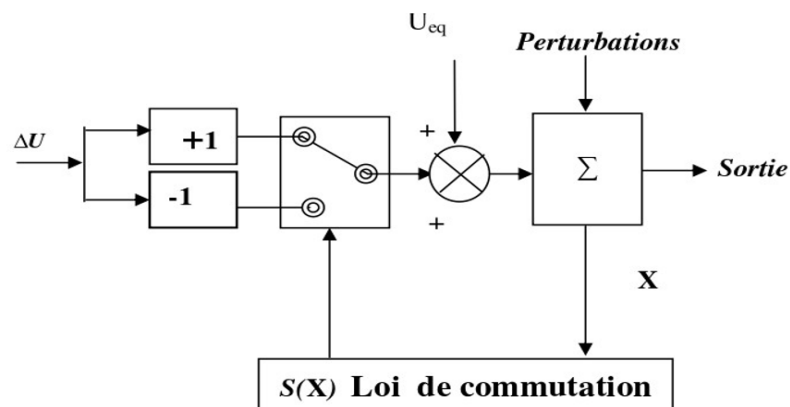


Figure II.4 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec commande équivalente

Nous avons choisi de baser notre étude sur ce type de configuration, une telle structure de par sa constitution est très simple et permet de moins solliciter la commande. Il semble en effet naturel d'ajouter la commande équivalente pour pré-positionner le système dans un état désiré permanent et stable et de jouer ensuite sur le terme de commutation pour assurer la convergence vers cet état et pour y rester ensuite [24].

II.3 Description du mode glissant :

II.3.1 Définition du mode glissant :

La technologie des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [25].

II.3.2 Explication du phénomène du glissement :

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre " U_{max} " et " U_{min} ". Ce phénomène est démontré à l'aide de la **figure II.5** pour un système à régler du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état " x_{s1} " et " x_{s2} ".

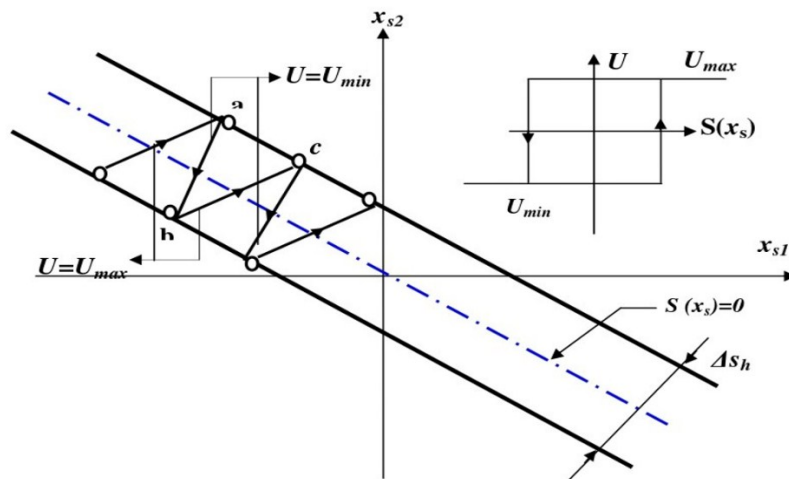


Figure II.5 Démonstration du mode glissement

La **commande par mode glissant** constitue une approche robuste et efficace pour le contrôle des systèmes non linéaires, incertains ou soumis à des perturbations. Contrairement aux lois de commande classiques comme le PID, la commande à structure variable permet de garantir des performances de suivi élevées même en présence de **variations paramétriques** ou de **perturbations extérieures**, grâce à l'exploitation du **régime glissant**.

II.4 L'observateur d'état :

II.4.1 Introduction :

Dans les systèmes dynamiques, la connaissance complète de l'état du système est essentielle pour concevoir des lois de commande efficaces, en particulier dans les approches avancées comme la commande par retour d'état ou la commande à structure variable. Toutefois, dans de nombreuses applications pratiques, il est difficile, voire impossible, de mesurer toutes les variables d'état du système en temps réel. Cette limitation peut être due à des contraintes physiques, économiques ou techniques liées aux capteurs.

L'observateur d'état est une solution puissante à ce problème. Il s'agit d'un algorithme qui permet d'estimer les variables d'état internes du système à partir des mesures de sortie accessibles et des signaux d'entrée connus, en s'appuyant sur un modèle mathématique du système. Ainsi, l'observateur joue un rôle crucial en fournissant une estimation en temps réel des états non mesurés, ce qui permet d'appliquer des lois de commande basées sur l'état complet.

Dans le cas des systèmes linéaires, l'observateur de Luenberger est l'un des plus utilisés. Il repose sur une rétroaction de l'erreur entre la sortie estimée et la sortie réelle pour corriger l'estimation des états. Pour les systèmes non linéaires ou incertains, des techniques plus avancées telles que les observateurs à haute gain, les filtres de Kalman étendus, ou encore les observateurs à mode glissant sont employés pour assurer une estimation robuste et fiable malgré les perturbations ou les incertitudes.

L'intégration d'un observateur dans une architecture de commande améliore considérablement les performances du système tout en réduisant les coûts de capteurs et en augmentant la fiabilité globale. Dans ce chapitre, nous allons explorer les principes fondamentaux des observateurs d'état, leur conception, leurs conditions d'existence et leur application, en particulier dans le cadre de la commande par mode glissant. [27]

II.4.2 Les activités d'un observateur d'état :

Dans la majorité des systèmes de commande, la loi de commande dépend des états internes du système. Ces états (comme la vitesse, la position, la température, la pression, etc.) décrivent complètement l'évolution dynamique du système. Toutefois, dans la pratique, il est souvent impossible ou peu réaliste de mesurer tous ces états directement à cause de plusieurs raisons :

II.4.2.1 Limitation physique ou économique des capteurs :

- Certains états sont inaccessibles ou difficilement mesurables (ex. : courant interne dans un moteur, débit dans une tuyauterie fermée). [28].
- Les capteurs sont parfois trop coûteux, ou encombrants, ou dégradent les performances du système.

II.4.2.2 Commande basée sur retour d'état :

- Les techniques de commande modernes (retour d'état, commande optimale, commande à structure variable) nécessitent la connaissance complète du vecteur d'état pour fonctionner. [28].
- L'absence de mesure directe des états rend leur estimation indispensable. [28].

II.4.2.3 Estimation temps réel :

- L'observateur fournit une estimation en temps réel des états non mesurés en utilisant un modèle mathématique du système ainsi que les mesures disponibles (sorties et entrées). [28].

II.4.2.4 Robustesse et fiabilité :

- Certains types d'observateurs (par ex. à mode glissant ou à haute gain) sont conçus pour être robustes aux perturbations, au bruit de mesure ou aux variations de paramètres. [28].

II.4.2.5 Optimisation des performances :

En fournissant des états précis, l'observateur permet une commande plus précise, améliore la stabilité, la réactivité et la robustesse du système global. [28]

II.4.3 Modèle d'état d'un système linéaire :

Le modèle d'état (ou représentation d'état) est une manière systématique et compacte de représenter un système dynamique, notamment dans le cadre de l'automatique et de la commande. Il est particulièrement adapté à la modélisation des systèmes multivariables (à plusieurs entrées et sorties). [29]

II.4.3.1 Forme générale :

Un système linéaire invariant dans le temps (SLTI) est décrit par l'équation d'état et l'équation de sortie : [29]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (II.4)$$

II.4.3.2 Définition des termes : [29]

- $x(t) \in \mathbb{R}^n$: vecteur d'**état** (comporte les variables internes dynamiques)
- $u(t) \in \mathbb{R}^m$: vecteur d'**entrée** (commandes ou excitations externes)
- $y(t) \in \mathbb{R}^p$: vecteur de **sortie** (mesures disponibles)

- $A(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: **matrice d'état** (décrit la dynamique propre du système)
- $B(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$: **matrice entrée**
- $C(t) \in \mathbb{R}^{p \times n}$: **matrice de sortie**
- $D \in \mathbb{R}^{p \times m}$: **matrice de transmission directe** (souvent nulle dans les systèmes physiques)

II.4.3.3 Interprétation :

- L'équation $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ décrit l'évolution temporelle de l'état du système.
- L'équation $y(t) = Cx(t) + Du(t)$ décrit comment les sorties sont liées aux états et aux entrées. [30]

II.4.3.4 Exemple : Système masse-ressort-amortisseur :

Considérons une masse m soumise à une force $u(t)$, à un ressort de raideur k et à un amortisseur de coefficient b . L'équation différentielle est :

$$m \ddot{x} + b \dot{x} + kx = u(t) \quad (\text{II.5})$$

Définissons les états :

$$x_1 = x(\text{position})$$

$$x_2 = \dot{x}$$

Alors, on obtient le système sous forme d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{k}{m}x_1 - \frac{b}{m}x_2 + \frac{1}{m}u \end{cases} \Rightarrow \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u \quad (\text{II.6})$$

II.4.4 Observateur d'état de Luenberger :

L'observateur de Luenberger, proposé par David G. Luenberger en 1966, est un observateur linéaire utilisé pour estimer les états non mesurables d'un système linéaire à partir des mesures de sortie et des commandes connues. [31]

II.4.4.1 Rappel du modèle d'état :

Pour un système linéaire invariant dans le temps (SLTI) : [31]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

où :

- $x(t)$ est le vecteur d'état (partiellement ou non mesuré),
- $u(t)$ est l'entrée (connue),
- $y(t)$ est la sortie (mesurée).

II.4.4.2 Forme de l'observateur de Luenberger : [31]

L'observateur de Luenberger est un système dynamique qui reconstruit l'état estimé $\hat{x}(t)$ comme suit :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \text{ avec } \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (\text{II.8})$$

- $\hat{x}(t)$: estimation de l'état réel $x(t)$,
- L : **gain de l'observateur**,
- $y(t) - \hat{y}(t)$: **erreur de sortie**, utilisée pour corriger l'estimation.

II.4.4.3 Erreur d'estimation : [31]

Soit l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$. On obtient :

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (\text{II.9})$$

L'objectif est que $e(t) \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$. Cela est garanti si toutes les valeurs propres de $A - LC$ sont à partie réelle négative (système stable).

II.4.4.4 Choix du gain L : [31]

- Le gain L est conçu de manière similaire à un retour d'état, mais sur le système transposé :
 $A^T, C^T \Rightarrow$ utilisation des techniques de placement de pôles.
- Le placement des pôles de $A - LC$ permet d'ajuster la vitesse de convergence de l'observateur.

II.4.4.5 Conditions d'existence : Observabilité :

L'observateur de Luenberger peut être conçu si et seulement si le système est observable, c'est-à-dire si la matrice d'observabilité :

$$\theta = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Est de rang complet (*rang* = *n*).

II.4.5 Observateur dans un contexte non linéaire :

Pour les systèmes non linéaires :

$$\dot{x} = f(x), \quad y = h(x)$$

Il faut des observateurs **non linéaires**, comme :

- **Observateur étendu de Kalman (EKF)**
- **Observateur de haute-gain**
- **Observateur sliding mode** (observateur à mode glissant) pour systèmes soumis à incertitudes

II.4.6 Application dans la commande par mode glissant

Dans les systèmes à structure variable :[32]

- Un observateur sliding mode peut être utilisé pour estimer les états non mesurables.
- Il offre une robustesse accrue face aux incertitudes et perturbations, comme la commande elle-même.

II.4.7 Conclusion :

L'observateur d'état est un outil fondamental dans la commande des systèmes dynamiques, particulièrement lorsqu'il est impossible de mesurer directement toutes les variables d'état. En fournissant une estimation en temps réel de ces états à partir des sorties mesurées et des entrées connues, l'observateur permet de concevoir des lois de commande performantes tout en réduisant le besoin en capteurs. La combinaison de l'approche par mode glissant et de l'observateur d'état fait l'objet de la conception d'une nouvelle loi de commande MPPT, qui sera présentée dans le chapitre suivant. [32]

Chapitre : 03

Commande MPPT par mode glissant- Observateur d'un système photovoltaïque

Introduction

Dans ce chapitre, une stratégie de commande MPPT utilisant un observateur de perturbations est présentée afin de surmonter le problème lié au besoin d'un capteur de la tension photovoltaïque et de garantir l'insensibilité aux incertitudes, même lorsque la tension de sortie du convertisseur est initialement nulle. Les performances de l'algorithme sont évaluées en termes de robustesse face aux changements climatiques et aux variations de charge. Le schéma est validé par des simulations.

III.2 Description du système et formulation du problème :

L'objectif de la conception d'un contrôleur MPPT est d'assurer le suivi de la puissance maximale d'un système PV en présence de points de fonctionnement variables. Le schéma-bloc du système PV doté d'un contrôleur MPPT est présenté à la *Fig III.1*.

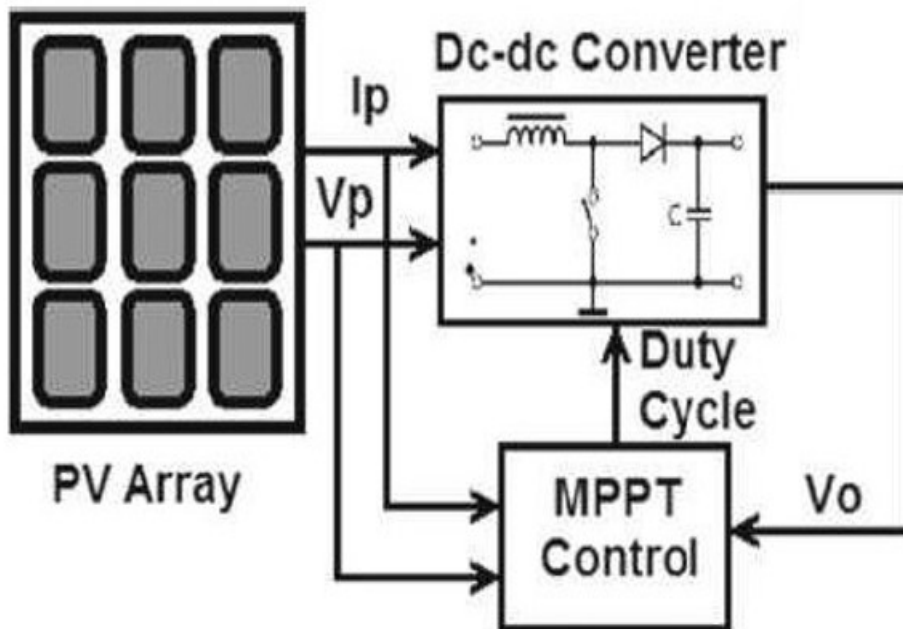


Figure III.1 Schéma-bloc du système PV doté d'un contrôleur MPPT.

Le système étudié est composé d'un module PV, un convertisseur boost **DC-DC**, et un contrôleur MPPT. Les paramètres de ce système sont donnés dans le Tableau III.1[9].

III.2.1 Système photovoltaïque (PV) :

Le système PV est constitué d'une combinaison série et parallèle de plusieurs cellules photovoltaïques. Le module à une seule diode est composé d'une source lumineuse, d'une diode, d'une résistance série et d'une résistance parallèle [8]. Le courant de sortie I_p de la cellule PV est donné par :

$$I_p = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV_p}{N_s A k_0 T}\right) - 1 \right] \quad (III.1)$$

$$I_{ph} = I_s + K_i [T - T_{ref}] \frac{G}{1000} \quad (III.2)$$

$$I_{rs} = I_r \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \left[\exp\left(\frac{q.E_{g0}}{K_0 A}\right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \right] \quad (III.3)$$

III.2.2 Convertisseur Boost DC-DC :

Le contrôleur MPPT génère un rapport cyclique (duty cycle) afin de produire un signal de commande de type modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les équations d'état du convertisseur boost sont données par :

$$\dot{x}_2 = \frac{-(1-u)}{L} x_2 + \frac{V_p}{L} \quad (III.4)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{(1-u)}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \quad (III.5)$$

x_1 est le courant photovoltaïque (I_p), x_2 est la tension de sortie du convertisseur (V_0), R , L et C sont les paramètres du convertisseur, et u est le rapport cyclique.

D'après les équations (III.4) et (III.5), il est clair que, pour mettre en œuvre une commande par mode glissant conventionnelle, un minimum de trois capteurs est requis : x_1 , x_2 et V_p . On remarque également dans l'équation (III.4) que l'expression du contrôle u fait intervenir x_2 au dénominateur, ce qui rend le contrôle non défini si $x_2=0$ à l'instant $t=0$. Si la condition initiale de x_2 est nulle, l'effort de contrôle devient infini. Cela souligne la nécessité d'un contrôleur spécifique.

III.3 Conception du Contrôleur :

Le problème mentionné à la section 2 peut être surmonté en :

- Proposant un observateur de perturbations (DO) pour estimer les incertitudes dans les équations (III.4) et (III.5).
- Proposant un observateur d'état pour estimer les états x_1 et x_2 .
- Proposant une surface de glissement basée sur les états estimés.

Dans cette section, le contrôleur est développé étape par étape pour surmonter les problèmes évoqués ci-dessus. On commence par la conception de l'observateur de perturbations (DO).

III.3.1 Conception d'Observateur de Perturbations (DO) :

Les équations du convertisseur boost (III.6) et (III.7) sont reformulées comme suit :

$$\dot{x}_2 = \frac{-(1-u)}{L}x_2 + \frac{d_1}{L} \quad (III.6)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{(1-u)}{C}x_1 + \frac{d_2}{C} \quad (III.7)$$

$d_1 = V_p$ la tension photovoltaïque est considérée comme une perturbation, et $d_2 = \frac{-x_2}{R}$ la résistance de charge inconnue est incluse dans la perturbation d_2 . Dans ce cas, d_1 peut être estimé via un observateur de perturbations (DO), le capteur de V_p n'est plus nécessaire, et si d_2 est également estimé, le système devient robuste aux charges inconnues. Alors l'observateur DO est défini par :

$$\hat{d}_1 = P_1 + M_1 x_1 \quad (III.8)$$

\hat{d}_1 est l'estimation de d_1 , P_1 est une variable auxiliaire, $M_1 > 0$ est le gain d'observateur. Dans cette application l'évolution de P_1 est donnée par :

$$\dot{P}_1 = -M_1 \left[\frac{-(1-u)x_2}{L} + \frac{\hat{d}_1}{L} \right] \quad (III.9)$$

En dérivant (III.8) et en utilisant (III.9), on obtient :

$$\dot{\hat{d}}_1 = -M_1 \left[\frac{-(1-u)x_2}{L} + \frac{\hat{d}_1}{L} \right] + M_1 \left[\frac{-(1-u)x_2}{L} + \frac{d_1}{L} \right] \quad (III.10)$$

Ce qui simplifie en :

$$\dot{\hat{d}}_1 = \frac{M_1}{L} (d_1 - \hat{d}_1) \quad (III.11)$$

L'erreur d'estimation de la perturbation \tilde{c}_1 est définie comme suit :

$$\tilde{c}_1 = d_1 - \hat{d}_1 \quad (III.12)$$

En soustrayant $\dot{\hat{x}}_1$ des deux côtés de l'équation (III.11) et en utilisant l'équation (III.12), on obtient :

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1 = \frac{1}{L} \tilde{d}_1 \quad (III.13)$$

De manière similaire, la perturbation d_2 peut être estimée en utilisant le même observateur de perturbation (DO) :

$$\hat{d}_2 = P_2 + M_2 x_2 \quad (III.14)$$

Avec \hat{d}_2 est une estimation de d_2 , P_2 est une variable auxiliaire, et $M_2 > 0$ le gain de l'observateur.

$$\dot{\tilde{x}}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\hat{x}}_2 = \frac{1}{C} \tilde{d}_2 \quad (III.15)$$

L'observateur d'état est conçu pour estimer les états x_1 et x_2 donné par :

$$\dot{\hat{x}}_1 = \left(\frac{1}{L} u \right) \hat{x}_2 + \frac{\hat{d}_1}{L} + K_1 (x_1 - \hat{x}_1) \quad (III.16)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = \left(\frac{1}{C} u \right) \hat{x}_1 + \frac{\hat{d}_2}{C} + K_2 (x_2 - \hat{x}_2) \quad (III.17)$$

Avec, $K_1 > 0$ et $K_2 > 0$ sont des constantes choisies par l'utilisateur. On définit l'erreur d'estimation comme $\tilde{x} = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2]^T$, avec $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$ et $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$. En soustrayant respectivement les équations (III.16) et (III.17) des équations (III.4) et (III.5), on obtient

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \left(\frac{1}{L} u \right) \tilde{x}_2 - \frac{\tilde{d}_1}{L} - K_1 \tilde{x}_1 \quad (III.18)$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = \left(\frac{1}{C} u \right) \tilde{x}_1 - \frac{\tilde{d}_2}{C} - K_2 \tilde{x}_2 \quad (III.19)$$

Il est connu que si $I_p = x_1$ peut être forcé à suivre un courant de référence $I_{ref} = 0.85 I_p$ [34], alors le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est garanti. Par conséquent, une surface de glissement est donnée comme suit ; ...

$$\sigma = x_1 - I_{ref} \quad (III.20)$$

En considérant une nouvelle surface de glissement donnée par :

$$\hat{\sigma} = \hat{x}_1 - I_{ref} \quad (III.21)$$

En dérivant l'équation (III.21) et en utilisant l'équation (III.16), on obtient :

$$\dot{\hat{\sigma}} = \left(\frac{\hat{x}}{L} + \frac{\hat{d}_1}{L} + K_1(x_1 - \hat{x}_1) \right) \quad (III.22)$$

Nous sélectionnons la commande

$$u = u_1 + u_2 \quad (III.23)$$

Avec :

$$u_1 = 1 - \frac{KL\hat{\sigma}}{\hat{x}_2} \quad (III.24)$$

$$u_2 = \frac{\hat{d}_1}{\hat{x}_2} - \frac{KL\hat{\sigma}}{\hat{x}_2} \quad (III.25)$$

Ce qui conduit :

$$\dot{\hat{\sigma}} = -K_1 \hat{\sigma} \quad (III.26)$$

$K > 0$ constante. Finalement, la loi de commande par mode glissant-observateur est définie par :

$$u = 1 - \frac{L}{\hat{x}_2} \left(\frac{\hat{d}_1}{L} + K_1 \hat{\sigma} \right) \quad (III.27)$$

Dans ce cas, u ne sera pas indéfini à $t=0$, même si $x_2(0) = 0$, car x_2 n'apparaît pas dans l'équation (III.27).

La valeur initiale de \hat{x}_2 apparaissant dans (III.27) peut toujours être choisie par le concepteur, ce qui permet de résoudre complètement le problème.

III.4 Analyse de stabilité :

La stabilité du système peut être analysée en déterminant la dynamique de \tilde{c}_1 , \tilde{c}_2 , \tilde{e}_1 et \tilde{e}_2 . Elle est fondée sur le concept de bornitude ultime. Les critères de Lyapunov sont utilisés pour établir les bornes de d_1 et d_2 .

$$V_1(\tilde{c}_1, \tilde{e}_1) \quad (III.28)$$

En dérivant l'équation (III.28) et en utilisant (III.13), on obtient

$$\dot{V}_1(\tilde{c}_1, \tilde{e}_1) = -\lambda_1 \tilde{c}_1 - \lambda_2 \tilde{e}_1 + \tilde{e}_1 \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L} \right] \quad (III.29)$$

En supposant que $\dot{\tilde{c}}_1 = -\lambda_1 \tilde{c}_1$, et à partir de l'équation (III.29), on peut démontrer, en utilisant la notion de bornitude ultime [33], que l'erreur d'estimation est ultimement bornée, et que la borne est donnée par :

$$|\tilde{c}_1| \leq \frac{1}{\lambda_1} \quad (III.30)$$

Avec, λ_1 est donnée par

$$\lambda_1 = \frac{L\mu_1}{M_1} \quad (III.31)$$

Puisque V_p est constant dans le scénario considéré, la valeur de $\dot{\tilde{c}}_1$ est nulle, et par conséquent $\mu_1 = 0/m$.

Dans ce cas, un résultat plus fort est obtenu, garantissant la stabilité asymptotique de \tilde{c}_1 , c'est-à-dire :

$$|\tilde{c}_1| \rightarrow 0 \quad (III.32)$$

De manière similaire, les bornes de d_2 peuvent être déterminées comme suit :

$$\dot{V}_2(\tilde{c}_2, \tilde{e}_2) = -\lambda_2 \tilde{c}_2 - \lambda_3 \tilde{e}_2 + \tilde{e}_2 \left[\frac{1}{C} - \frac{1}{C} \right] \quad (III.33)$$

$$|\tilde{c}_2| \leq \frac{1}{\lambda_2} M_2 \quad (III.34)$$

$$\lambda_2 = \frac{C\mu_2}{M_2} \quad (III.35)$$

En supposant que $\dot{\tilde{c}}_{-2} = -r_{-2}$. Puisque \mathbf{x}_2 et \mathbf{R} sont constants dans le scénario considéré, la valeur de $\mu_2 = 0$ est nulle, et par conséquent $\mu_2 = 0/m$. Dans ce schéma, un résultat est obtenu garantissant la stabilité asymptotique de \tilde{c}_{-2} , c'est-à-dire

$$|\tilde{c}_{-2}| \leq \dots \quad (III.36)$$

Les bornes de \tilde{c}_{-1} peuvent être réduites en augmentant M_1 , et celles de \tilde{c}_{-2} en augmentant M_2 . Considérons une fonction de Lyapunov la fonction donnée ci-dessous :

$$V = \frac{1}{2} L \tilde{c}_{-1}^2 + \frac{1}{2} \tilde{c}_{-2}^2 \quad (III.37)$$

En dérivant l'équation (III.36) et en utilisant les équations (III.18), (III.19), (III.13) et (III.15), la stabilité de \tilde{c}_{-1} et \tilde{c}_{-2} peut être analysée comme suit

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -K_1 \tilde{c}_{-1}^2 - K_2 \tilde{c}_{-2}^2 \\ &\leq -K_1 \tilde{c}_{-1}^2 - K_2 \tilde{c}_{-2}^2 \\ &\leq -|\tilde{c}_{-1}|^2 - |\tilde{c}_{-2}|^2 \end{aligned} \quad (III.38)$$

$$|\dot{\tilde{c}}_{-1}| \leq K_1 L |\tilde{c}_{-1}| \quad |\dot{\tilde{c}}_{-2}| \leq K_2 C \quad (III.39)$$

d_1, \tilde{c}_{-2} , il en résulte que (39) sera modifié en $|\dot{\tilde{c}}_{-1}| \rightarrow 0$ et $|\dot{\tilde{c}}_{-2}| \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$. La borne sur \tilde{c}_{-1} et \tilde{c}_{-2} peut être réduite en augmentant K_1, K_2 . Par conséquent, la stabilité de la loi de commande basée sur l'observateur est prouvée.

III.5 Résultats de simulation :

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus en mettant en œuvre le contrôleur étudié pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque. Matlab/Simulink est utilisé pour simuler le système PV ainsi que les algorithmes de contrôle ASMC et SMC. Les simulations du panneau photovoltaïque et du convertisseur DC-DC de type boost sont également réalisées.

Tableau III. 1. Paramètres du Convertisseur DC-DC.

Symbole	Valeur
C_{in}(μF)	220
C_{out} (μF)	220
L (mH)	0.5
R(Ω)	15
f_{sw}(kHz)	20

Tableau III. 2. Spécifications du système

Symbole	Paramètre	Valeur
P _{max} (W)	Puissance maximale du panneau	84.96
V _{MPP} (V)	Tension maximale du panneau	18
I _{MPP} (A)	Courant maximal du panneau	4.75
V _{co} (V)	Tension du circuit ouvert	22.1
I _{sc} (A)	Courant de court-circuit	5
α_V (%/0C)	Coefficient de température de tension	-0.8
α_I (%/0C)	Coefficient de température du courant	0.00065

Les paramètres du système photovoltaïque correspondant au module photovoltaïque sont mentionnés dans le Tableau **III.2** et les paramètres du convertisseur sont répertoriés dans le Tableau **III.1**.

Les scénarios de résultats de simulation ci-dessous, ont été réalisés en prenant en compte les variations climatiques telles que l'éclairement et la température. Dans chaque figure, une comparaison des caractéristiques du système photovoltaïque, régies par l'approche ASMC est effectuée avec la technique conventionnelle SMC.

Scénario 1 : Conditions climatiques variables ; Température fixe 25C et Éclairement variable

Dans ce scénario, nous appliquons une variation de l'éclairement tout en maintenant la température à 25 °C. Ce profil est représenté dans la Fig. **III.2** ; les caractéristiques I-V et P-V du panneau photovoltaïque correspondant à cette variation sont illustrées respectivement dans les Fig. **III.3** et **III.5**.

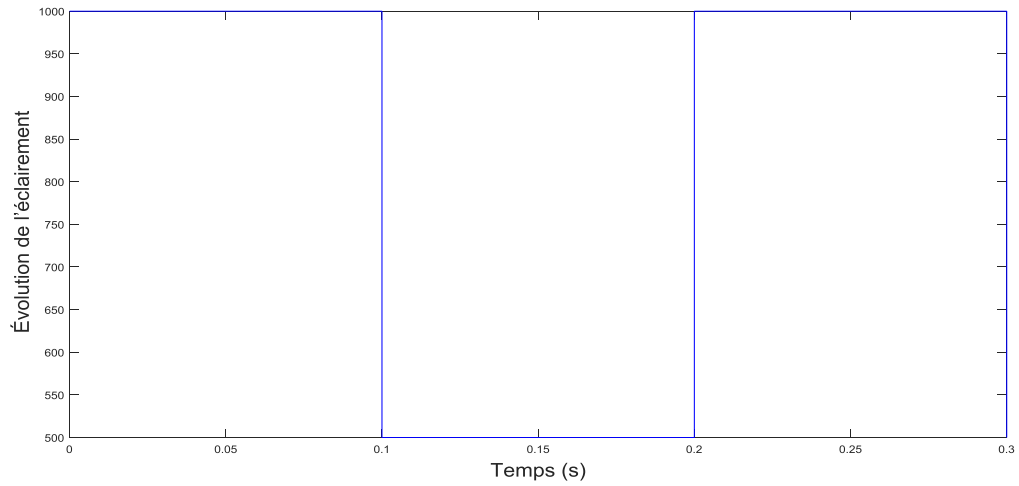


Figure III.2 Évolution de l'éclairement (1^{er} scénario)

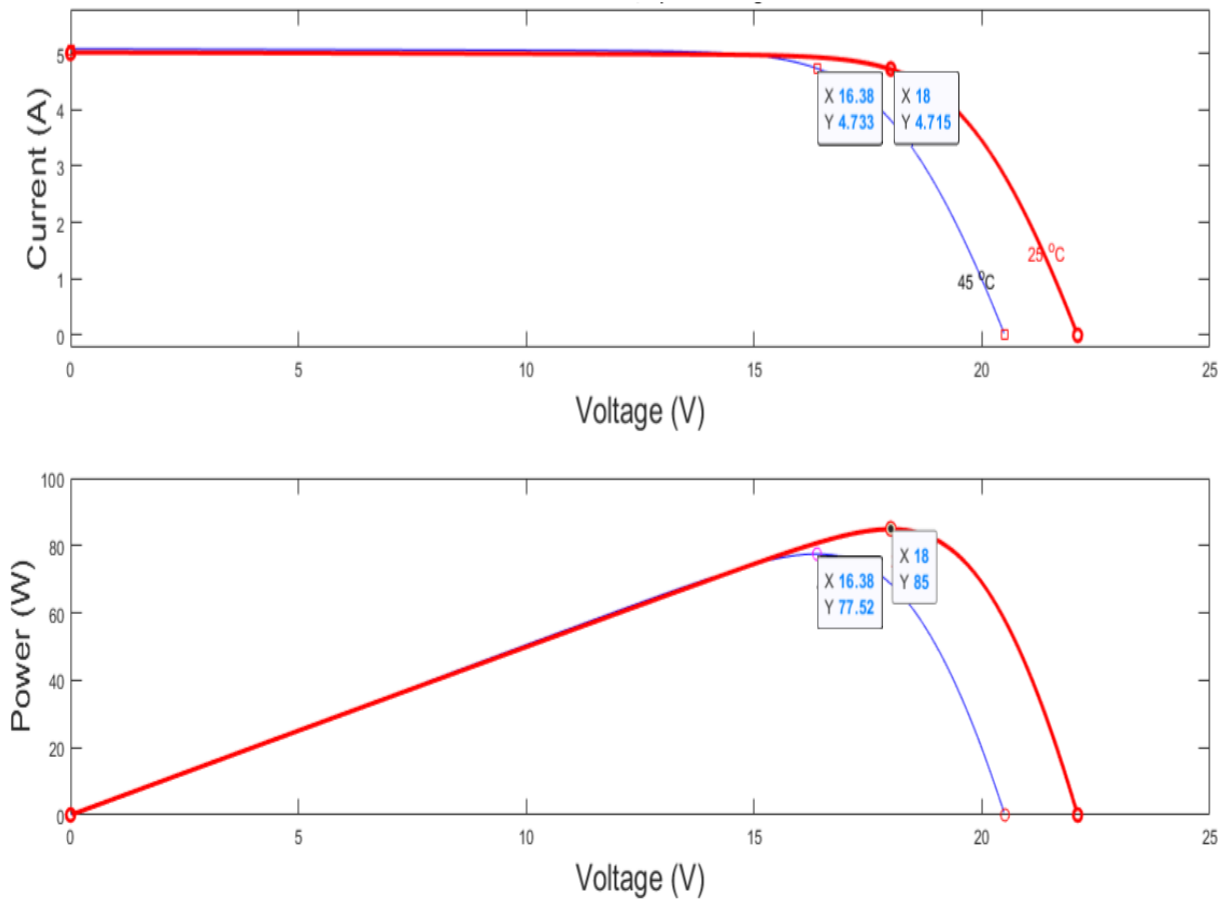


Figure III.3 Caractéristiques I-V et P-V du système photovoltaïque (1er scénario)

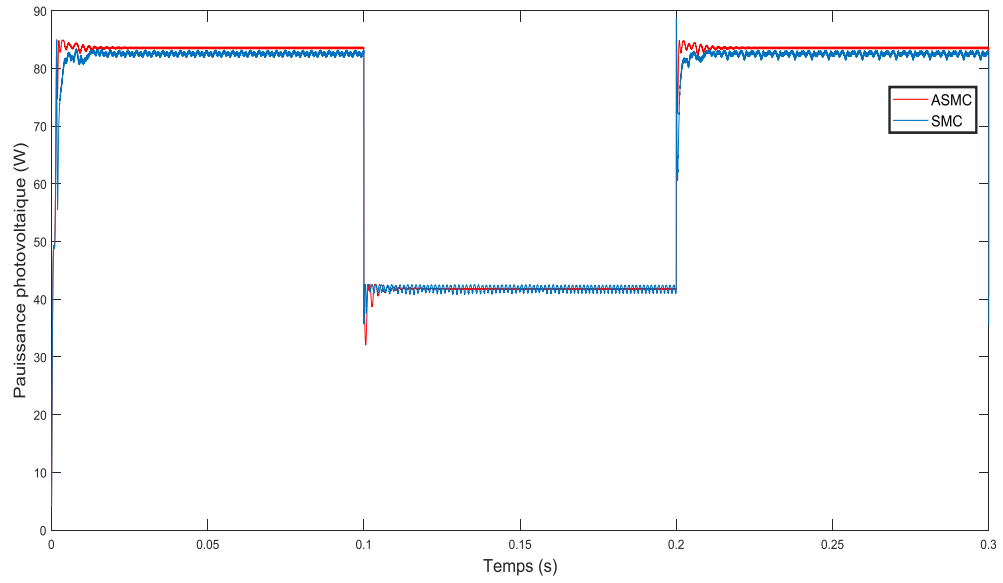


Figure III.4 Evolution de la puissance photovoltaïque (1^{er} scénario)

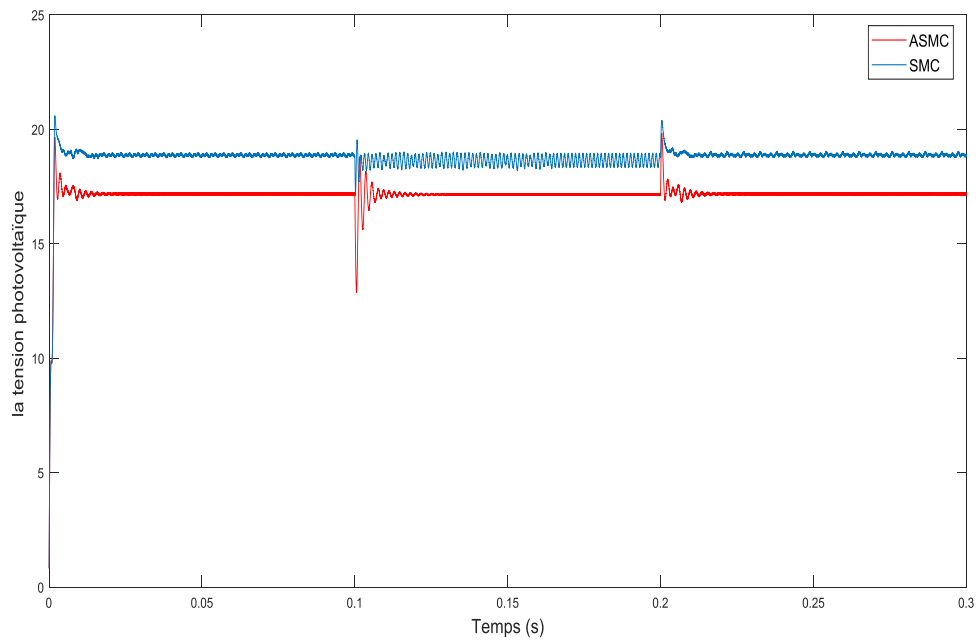


Figure III.5. Evolution de la tension photovoltaïque (1^{er} scénario)

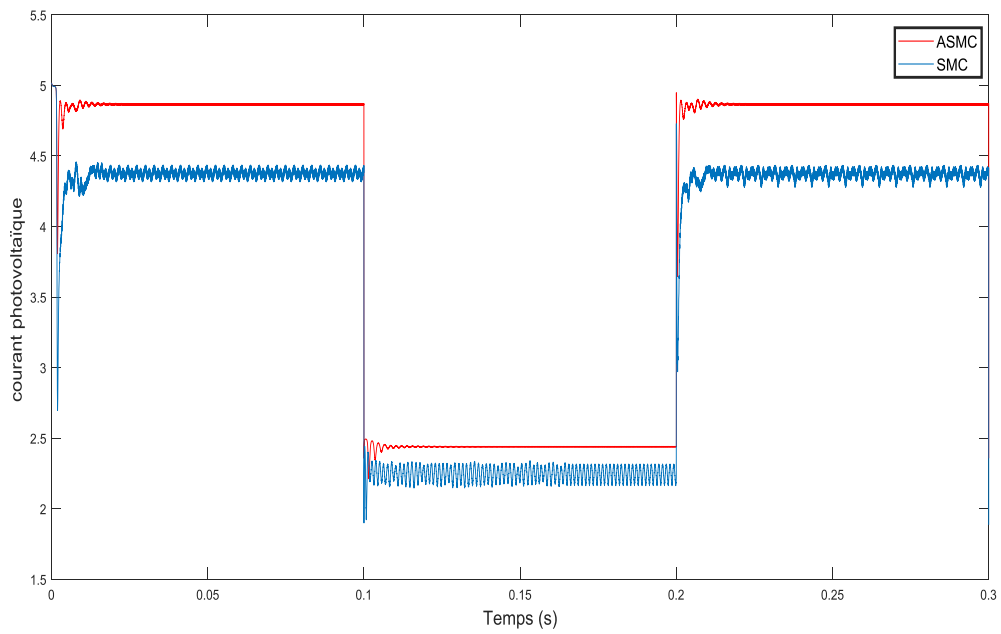


Figure III.6 Evolution du courant photovoltaïque (2^{ème} scénario-a-)

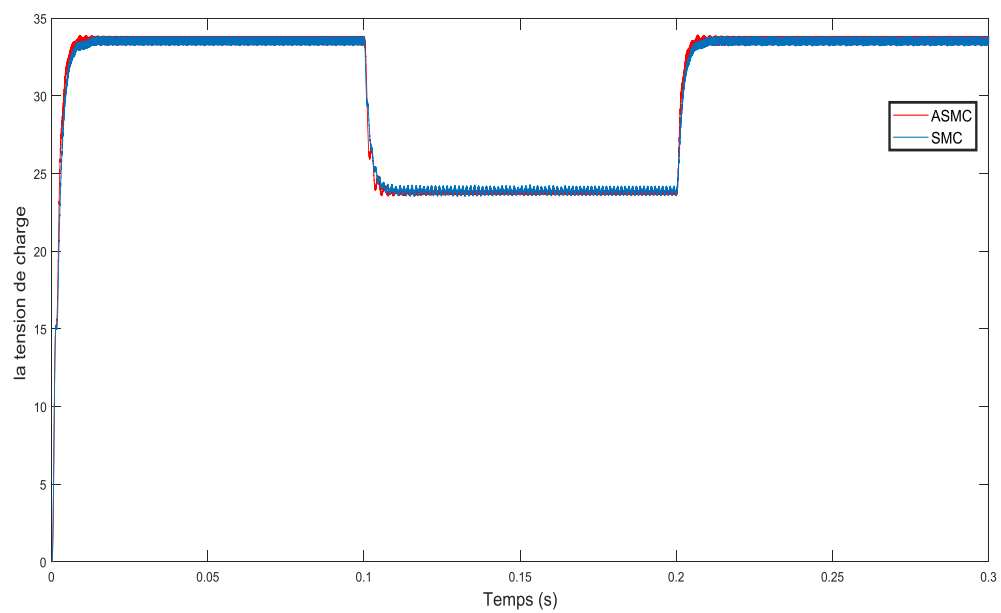


Figure III.7 Evolution de la tension de charge (1er scénario)

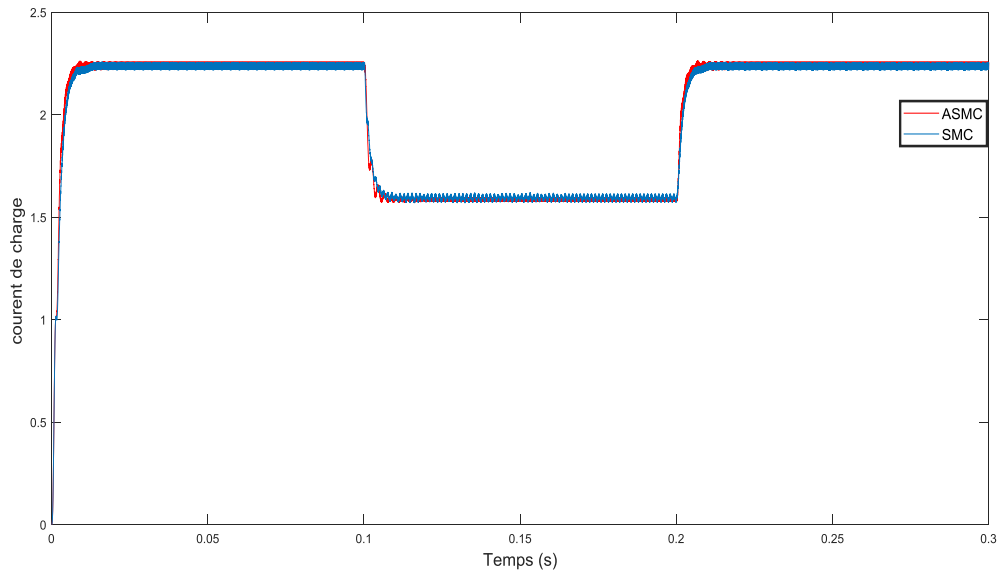


Figure III.8 Evolution du courant de charge (1^{er} scénario)

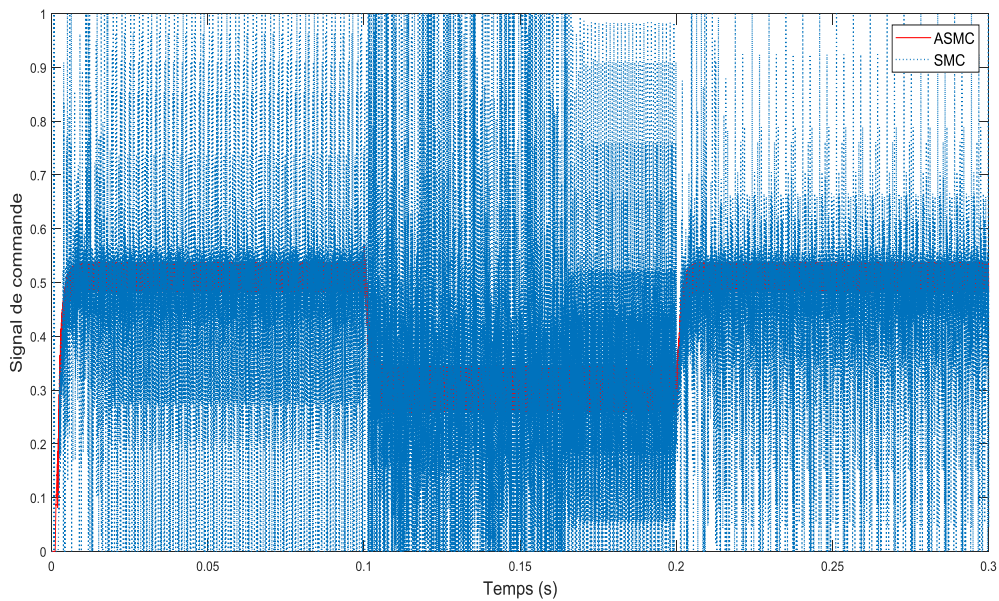


Figure III.9 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (1er scénario)

D'après les résultats obtenus, il est observé que les contrôleurs ASMC et SMC sont capables de suivre le point de puissance maximale (MPP) avec une précision élevée, en particulier pour le contrôleur adaptatif par mode glissant. En outre, le signal de commande du SMC présente de fortes oscillations, rendant cette approche inapplicable en temps réel.

Scénario 2 : Conditions climatiques variables ; Température fixe 45 C et Éclairement variable

La variation de la température est l'un des facteurs influencés sur les caractéristiques et le fonctionnement du système photovoltaïque. On maintient dans ce scénario la température à 45 °C et on varie l'éclairement selon le profil de la figure III.2.

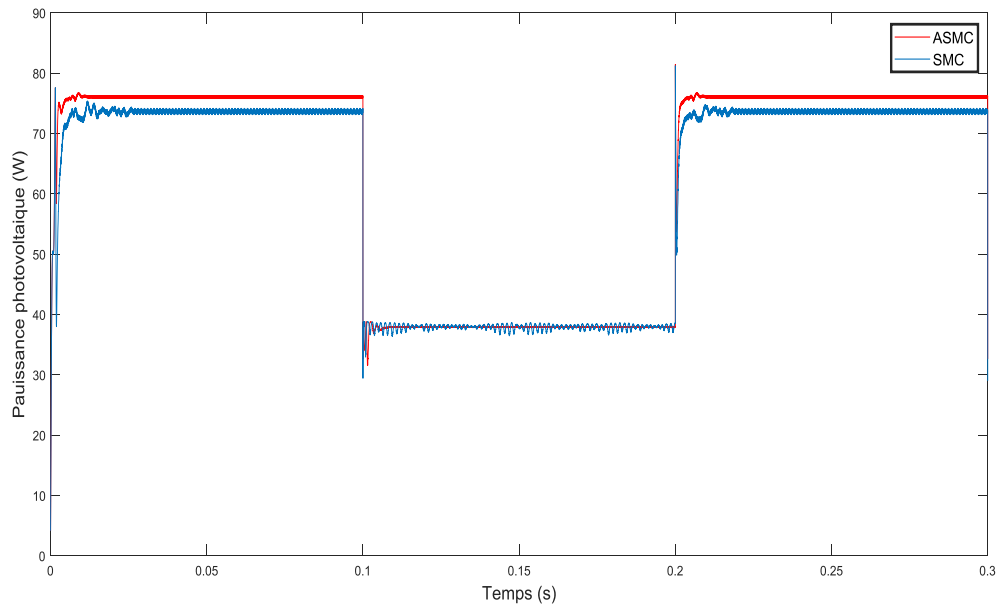


Figure III.10 Evolution de la puissance photovoltaïque (2^{ème} scénario)

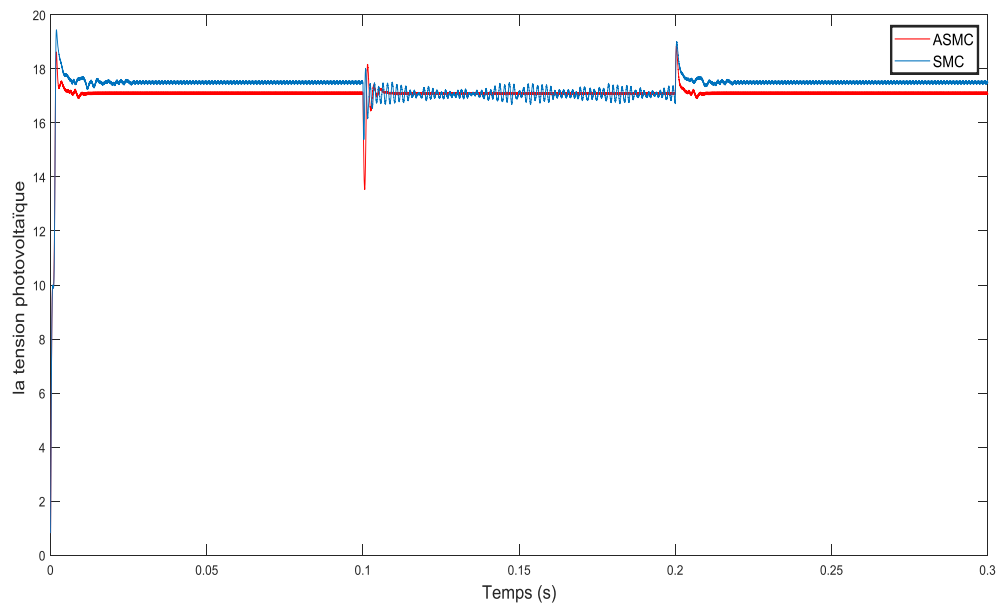


Figure III.11 Evolution de la tension photovoltaïque (2^{ème} scénario)

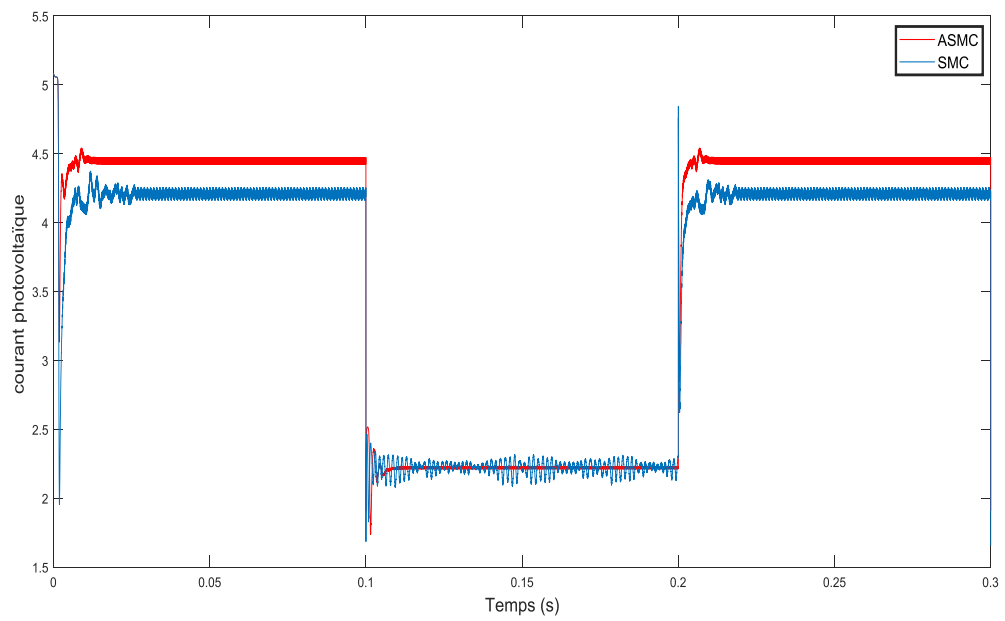


Figure III.12 Evolution du courant photovoltaïque (2^{ème} scénario)

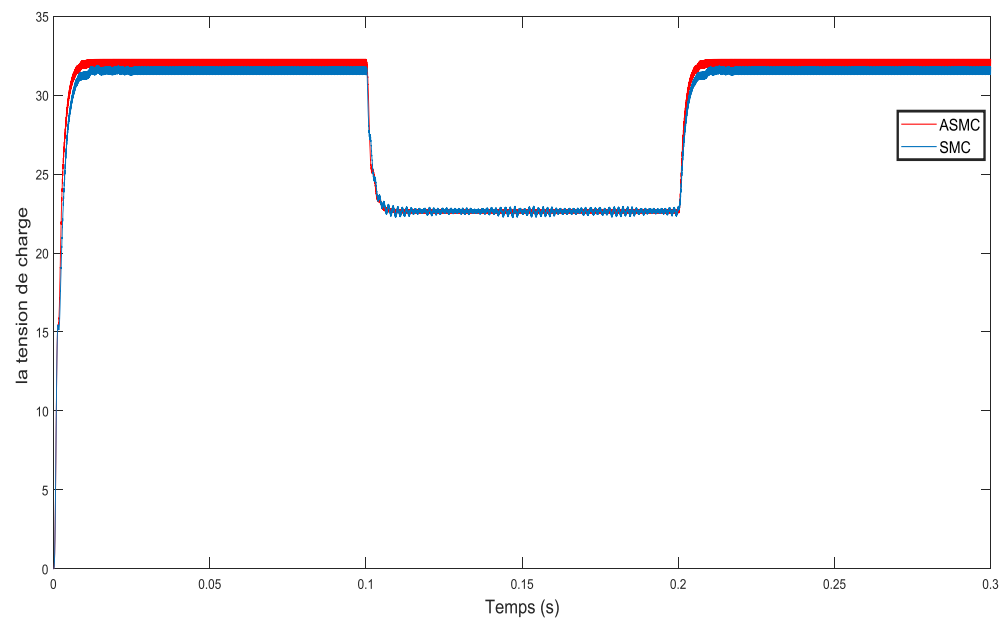


Figure III.13 Evolution de la tension de charge (2^{ème} scénario)

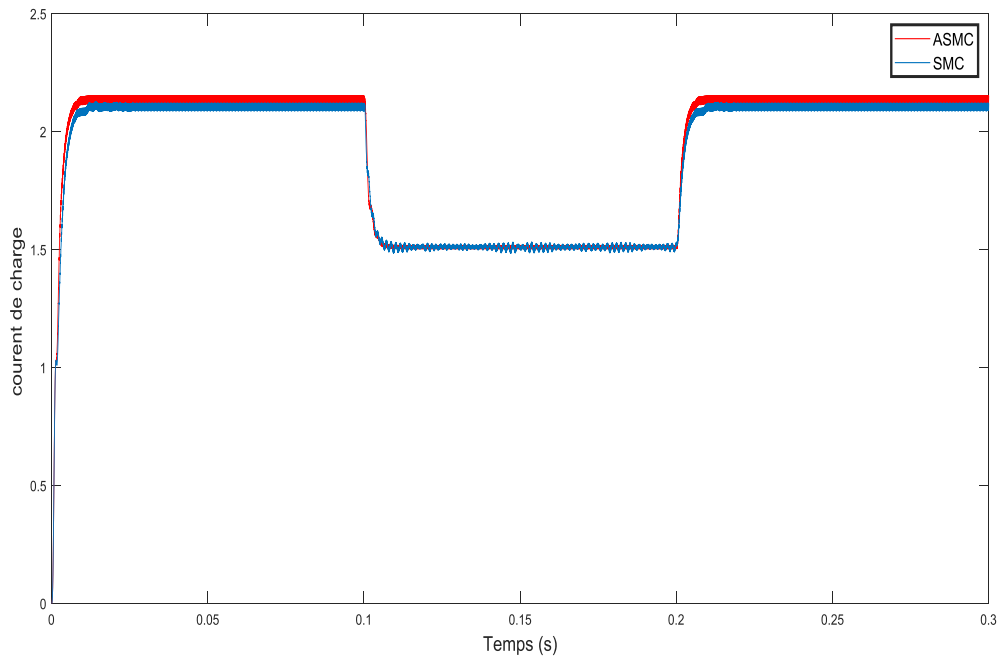


Figure III.14 Evolution du courant de charge (2^{ème} scénario)

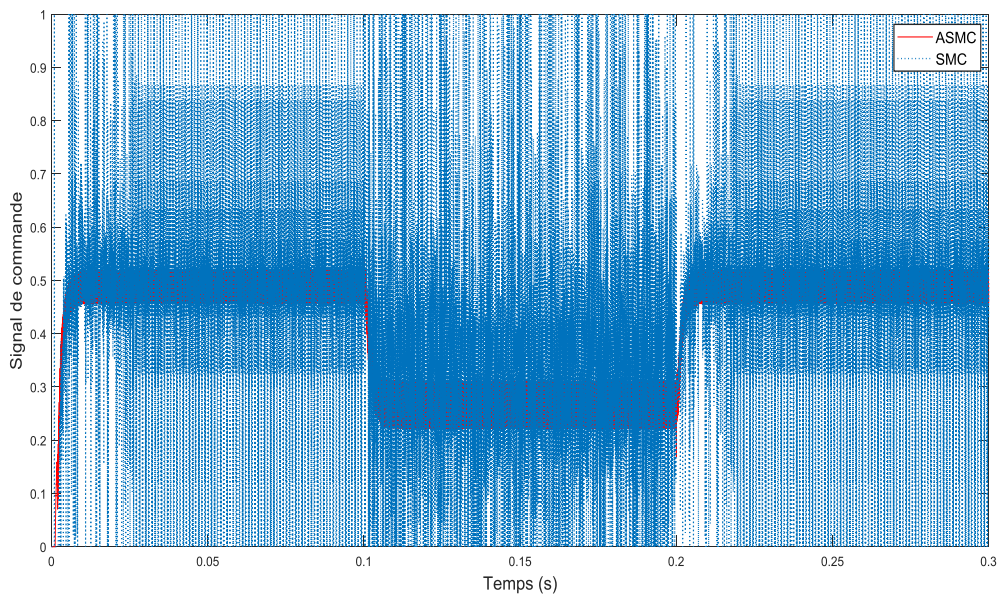


Figure III.15 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (2-ème scénario)

D'après les résultats de simulation présentés sur les Figs. III.13, III.16, Il est à noter que les temps de réponse des deux approches sont presque identiques. Cependant, durant la phase transitoire, on observe une

amélioration de la trajectoire du point de puissance maximale (MPP) lors de l'application de la commande ASMC par rapport au SMC.

Scénario 3 : Conditions climatiques constantes ; charge variable.

Comme illustré dans la Fige III.17, une étude a été réalisée pour comparer les performances de l'approche proposée à celles de la méthode SMC dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT), sous des variations de charge entre $R = 15\Omega$ et $R = 30\Omega$

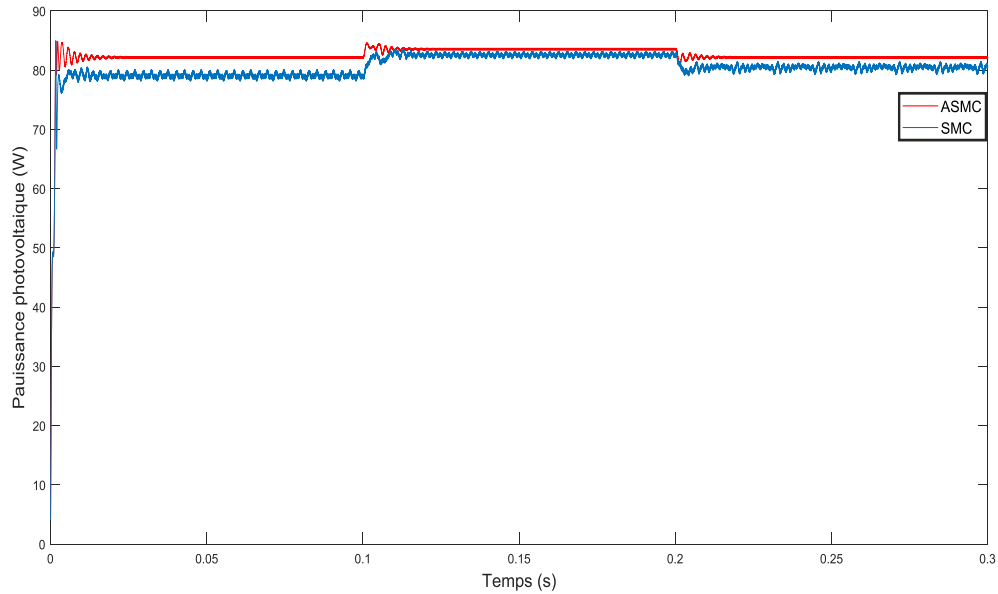


Figure III.16 Evolution de la puissance photovoltaïque (3^{ème} scénario)

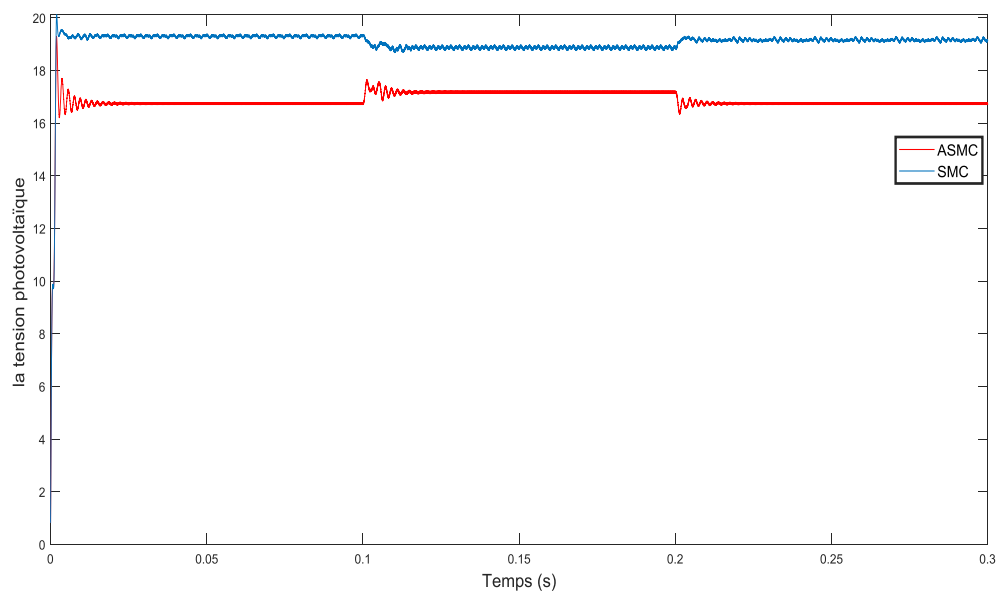


Figure III.17 Evolution de la tension photovoltaïque (3^{ème} scénario)

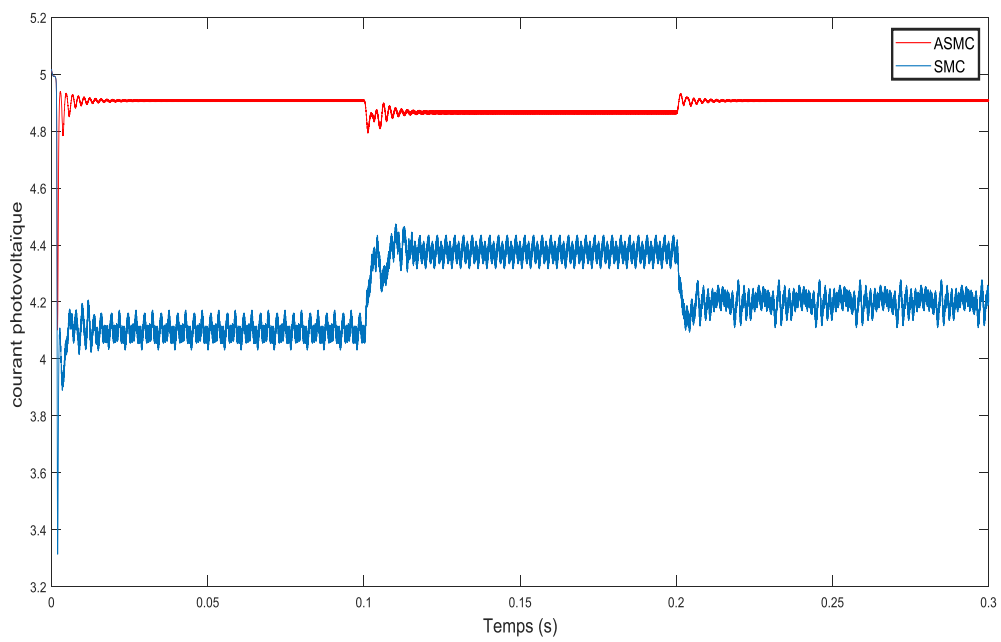


Figure III.18 Evolution du courant photovoltaïque (3^{ème} scénario)

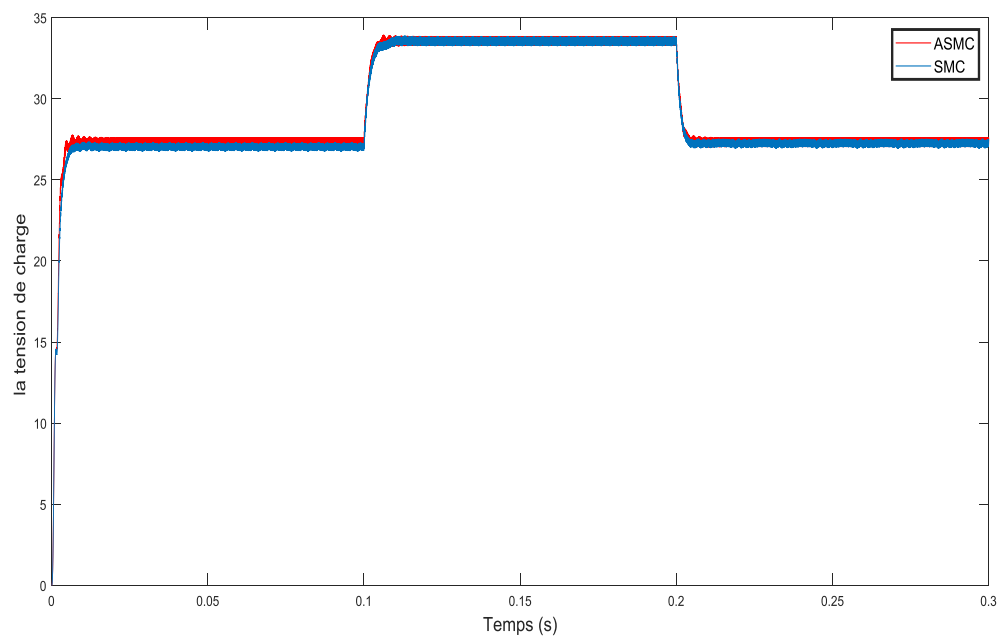


Figure III.19 Evolution de la tension de charge (3^{ème} scénario)

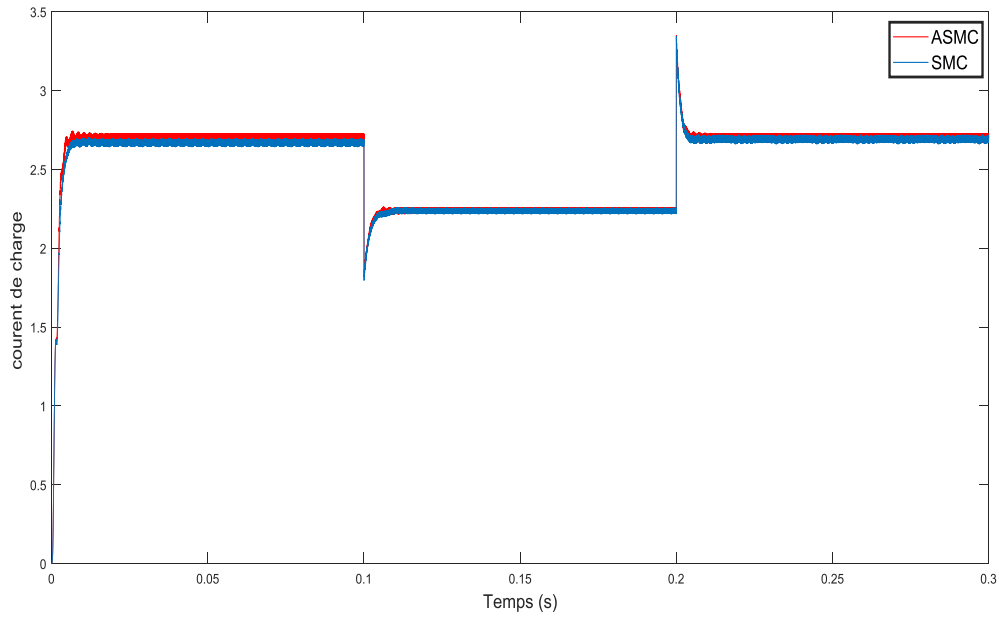


Figure III.20 Evolution du courant de charge (3^{-ème} scénario)

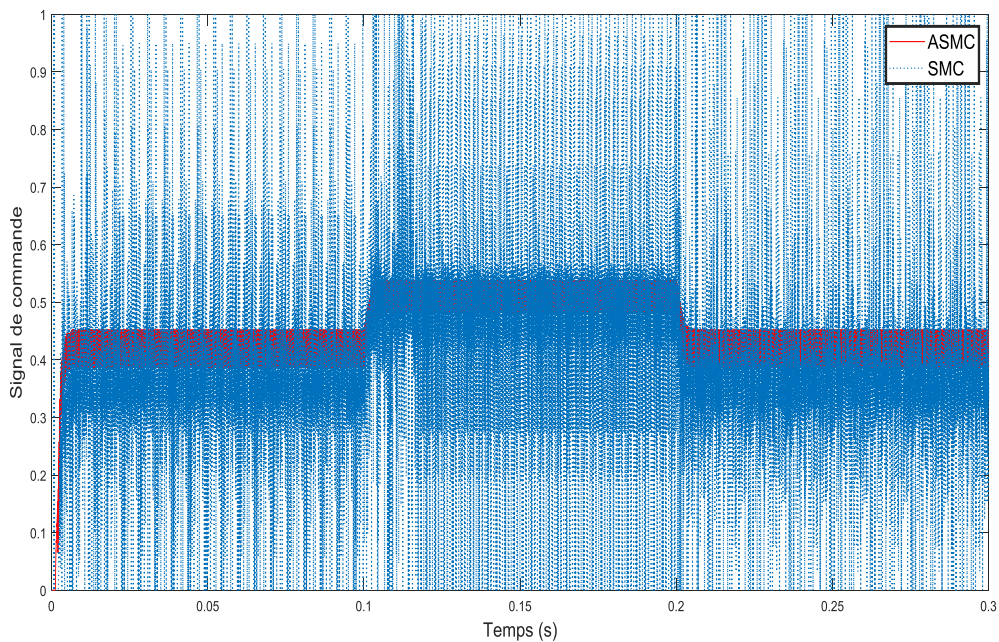


Figure III.21 Evolution du signal de commande ASMC et SMC (3^{-ème} scénario)

Dans ce scénario, en termes de robustesse et d'efficacité, les résultats de simulation mettent en évidence que l'approche ASMC surpasse l'approche SMC, notamment en ce qui concerne le signal de commande et son applicabilité en temps réel.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons la théorie du contrôle adaptatif par commande en mode glissant, fondée sur un observateur d'état, appliquée à la recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque. La robustesse de cette approche y est mise en évidence. Une étude comparative entre la commande ASMC et la méthode SMC a été réalisée, démontrant la pertinence de l'algorithme proposé. Les résultats de simulation sont également présentés sous différentes conditions climatiques (température et éclairage), ainsi que pour des variations de charge.

Conclusion générale :

La commande adaptative par mode glissant basée sur un observateur de perturbation pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été étudiée, analysée et validée par simulation numérique dans ce travail. L'étude a été menée dans un contexte de variations environnementales (température, irradiation) ainsi que sous des modifications de la charge. L'objectif principal est d'améliorer les performances de suivi énergétique des systèmes photovoltaïques en proposant une stratégie de commande à la fois robuste, précise et peu exigeante en capteurs.

Ce travail apporte les contributions suivantes :

- Association d'un observateur de perturbation (DO) avec une commande par mode glissant (SMC) afin d'éliminer le phénomène de chattering, tout en garantissant une commande robuste face aux incertitudes et perturbations ;
- Suppression du besoin d'un capteur de tension côté panneau (V_{pv}), ce qui permet de réduire la complexité matérielle et les coûts de mise en œuvre du système de commande ;
- Capacité à fonctionner efficacement même lorsque la tension de sortie initiale est nulle, ce qui représente une amélioration significative par rapport aux approches classiques ;
- Suivi précis et rapide du point de puissance maximale (MPPT) quelles que soient les conditions de fonctionnement, incluant des changements climatiques rapides ou des variations brusques de la charge.

Les résultats de simulation numérique obtenus démontrent la supériorité de cette approche adaptative basée sur observateur par rapport à la commande par mode glissant conventionnelle. En particulier, la solution proposée offre une meilleure stabilité, une réduction significative des oscillations et une extraction d'énergie plus efficace, confirmant ainsi sa pertinence pour les applications photovoltaïques modernes.

Les références

- [1] <http://www.futura-sciences.com/>
- [2] <http://jeunes.edf.com/>
- [3] <http://fr.wikipedia.org/>
- [4] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [5] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [6] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [7] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [8] Chu, C.-C., & Chen, C.-L. (2009). Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach. *Solar Energy*, 83(8), 1370–1378.
- [9] M. R. Mojallizadeh, M. Badamchizadeh, S. Khanmohammadi, and M. Sabahi, "Designing a new robust sliding mode controller for maximum power point tracking of photovoltaic cells," *Solar Energy*, vol. 132, pp. 538–546, 2016.
- [10] <http://www.futura-sciences.com/>
- [11] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [12] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [13] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [14] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard, Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années? , Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [15] Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
- [16] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2023). *Photovoltaics Report*. <https://www.ise.fraunhofer.de>
- [17] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic Systems Engineering* (3rd ed.). CRC Press.

- [18] El Chaar, L., Lamont, L. A., & El Zein, N. (2011). *Review of photovoltaic technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165–2175.
- [19] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Springer.
- [20] Rashid, M. H. (2013). *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications* (4th ed.). Pearson Education.
- [21] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2008). *Solar cell efficiency tables (Version 32)*. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(5), 435–440.
- [22] Utkin, V. I. (1992). *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer-Verlag.
- [23] Edwards, C., & Spurgeon, S. K. (1998). *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. Taylor & Francis.
- [24] Young, K. D., Utkin, V. I., & Ozguner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7(3), 328–342.
- [25] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- [26] Fridman, L. (2002). Sliding mode observation and identification. In *Variable Structure Systems: From Principles to Implementation* (pp. 207–238). IET.
- [27] Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear Systems* (3rd ed.). Prentice Hall.
- [28] Kailath, T. (1980). *Linear Systems*. Prentice-Hall.
- [29] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- [30] Chen, C.-T. (1999). *Linear System Theory and Design* (3rd ed.). Oxford University Press.
- [31] Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- [32] Luenberger, D. G. (1971). "An Introduction to Observers." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16(6), pp. 596–602.
- [33] M. Corless and G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 26, no. 5, pp. 1139–1144, 1981.
- [34] Alghuwainem, S. (1994). Matching of a dc motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(1), 192–198.