

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد القادر

تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle.

Par : BOUCHENNE Mahdi

BOUGHALI Lokmen

Sujet

Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire pour un système photovoltaïque autonome

Soutenu publiquement, le 10/06/2024, devant le jury composé de :

M ^{me} Choukchou Braham Amal	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M ^{me} Saidi Farah	MAB	Université de Tlemcen	Examinateur
M ^{me} kelkoul Bahia	MAB	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicaces

C'est grâce à Allah que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

Mes très chers parents pour leur soutien et leur aide durant toute ma période d'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissance et mon respect.

*A mes chers Frères, Omar, Mehmed
A mes très chères Sœurs Assia, Sara,
Zineb.*

*A mon chef de scout Kouzie Hadj
Yaghoub*

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de prés.

BOUGHALI Lokmen.

Dédicaces

C'est grâce à Allah que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

Mes très chers parents pour leur soutien et leur aide durant toute ma période d'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissance et mon respect

*A mes chers Frères, younes, omar, kacem
A ma très chère Sœur, mansoura*

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de prés.

BOUCHENNE Mahdi.

Remerciements

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

**Nous tenons à remercier vivement notre encadreur
DR. KELKOUL Bahia
qui a proposé et dirigé ce travail**

**Nos remerciements vont s'adresser également au
Président et membres de jury DR. CHOUKCHOU BRAHAM
Amal, DR. SAIDI Farah**

qui nous feront l'honneur d'évaluer notre travail. Notre gratitude et reconnaissance s'adressent aux enseignants qui ont contribué à notre formation pendant notre cursus universitaire

Sans oublier tous les Enseignants et les amis qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Sommaire

I.	Chapitre 01 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	3
I.1	Introduction :.....	4
I.2	Effet photovoltaïque.....	4
I.3	Spectre solaire.....	4
I.4	Le fonctionnement d'une cellule solaire :.....	5
I.5	Potentiel solaire en Algérie	6
I.6	Technologies de fabrication des cellules photovoltaïque :	7
I.6.1	Cellules de type monocristallines :.....	7
I.6.2	Cellules de type polycristallines	8
I.6.3	Cellules de type silicium amorphe	8
I.7	Installation des panneaux solaires :.....	8
I.8	Classification des systèmes photovoltaïques :.....	9
I.8.1	Système PV autonome :.....	9
I.8.2	Systèmes PV connectés aux réseaux :	9
I.9	Conclusion :	10
II.	Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïque	12
II.1	Introduction :.....	13
II.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque :.....	13
II.2.1	Modèle électrique idéal à une diode :.....	13
II.2.2	Modèle électrique réel à deux diodes :	14
II.2.3	Modèle électrique réel à une diode :.....	15
II.2.4	Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :.....	17
II.2.5	Calcul des paramètres du modèle	18
II.3	Modélisation d'un générateur photovoltaïque :.....	21
II.3.1	Association de N_s cellules en série :.....	21
II.3.2	Association de N_p cellules en parallèle :	22
II.3.3	Association série-parallèle des cellules :.....	22
II.4	La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) :	23
II.4.1	Principe de la commande MPPT :	23
II.4.2	Les différentes commandes MPPT :.....	24
II.5	Convertisseurs continu – continu (DC/DC) :.....	24
II.5.1	Rapport cyclique :.....	25

II.5.2	Choix de convertisseur :	25
II.5.3	Convertisseur élévateur de tension Boost :	25
II.6	Simulation du générateur photovoltaïque (Module solaire The Solarex MSX60) :	26
II.6.1	Description du module :	26
II.6.2	Caractéristiques électriques :	26
II.6.3	Simulation du module photovoltaïque MSX60 :	27
II.7	Conclusion :	29
III.	CHAPITRE III : commande par mode glissant d'ordre fractionnaire	30
III.1	Introduction :	31
III.2	Principe de la commande par mode glissant :	31
III.3	Synthèse de la loi de commande par mode glissant :	32
III.3.1	Choix de la surface de glissement :	32
III.3.2	Etablir la condition de convergence :	32
III.3.3	Détermination de la loi de commande :	33
III.4	Phénomène de broutement :	35
III.5	Définition du calcul fractionnaire :	37
III.6	Fonction GAMMA :	37
III.7	Fonction de Mittag-Leffler :	37
III.8	Operateurs d'ordre non entier :	37
III.8.1	Intégration d'ordre non entier :	38
III.9	Dérivation non entière au sens de Riemann-Liouville :	39
III.10	Quelque Propriétés de dérivées non entières :	40
III.11	Transformée de Laplace de la dérivée fractionnaire :	41
III.11.1	Transformée de Laplace de l'intégrale non entière:	41
III.11.2	Transformée de Laplace de la dérivée non entière :	41
III.12	Commande d'ordre fractionnaire :	41
III.13	Conclusion :	42
IV.	Chapitre IV : Commande MPPT par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un systèmes photovoltaïques	43
IV.1	INTRODICTION :	44
IV.2	FOSMC pour le convertisseur Boost :	44
IV.2.1	La commande $u(t)$:	44
IV.3	Choix de la surface de glissement :	45
IV.4	La différence entre la commande SMC et FOSMC :	47

Table des abréviations et symboles

- **SMC** : Sliding mode control.
- **FOSMC**: fractional order sliding mode control.
- **PID** : Contrôleur proportionnel intégral dérivé.
- **MPPT**: Maximum Power Point Tracking.
- **PPM** : point de puissance maximale.
- **PV** : photovoltaïque.
- **IR** : infrarouge.
- **UV** : ultraviolet.
- **AM** : Air Mass.
- **ZCE** : Zone de Charge d'Espce.
- **GPV** : générateur photovoltaïque.

Symboles

- K : kelvin
- W : watt
- m² : mètre carré Unité de surface
- kWh: Kilowatt-heure
- TWh: Terawatt-heure
- G : Éclairement [W /m^2].
- I_{ph} : photocourant.
- R_s : Résistance en série.
- R_p : Résistnace en pallel.
- I_e : Courant fourni par la cellule.
- I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.
- I_d : Courant qui traverse la diode.
- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température.

- V_e : Tension aux bornes de la cellule.
- n : Facteur de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- V_T : Tension thermique.
- K : Constante de Boltzmann $K = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K.
- T : Température effective de la cellule en kelvin.
- q : Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C.
- I_{RP} : Courant dérivé par la résistance parallèle.
- V_{co} : la tension en circuit ouvert.
- I_{cc} : courant de court-circuit.
- $V_{ppm,ref}$: la tension ou point de puissance maximale dans des conditions de référence.
- $I_{ppm,ref}$: le courant ou point de puissance maximale dans des conditions de référence.
- K_v : coefficient de température du courant de court-circuit, donné par la fiche technique du constructeur.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1–Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil	5
Figure I.2–Jonction p-n dans une cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.3–carte mondiale de l'irradiation horizontale globale (Solaris)	7
Figure I.4–Energie solaire au sol en Algérie, en kWh/m ²	7
Figure I.5–les types des panneaux solaires	8
Figure I.6–Couplage direct GPV-charge	9
Figure I.7–Système PV raccordé au réseau central	10
Figure I.8–Système PV raccordé Au réseau sans stockage d'énergie	10
Figure I.9–Système PV raccordé au réseau avec stockage d'énergie.....	10

Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïques

Figure II.1– Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode.....	13
Figure II.2– Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes	14
Figure II.3– Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode	16
Figure II.4 – Modèle électrique équivalent simplifier d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode.....	16
Figure II.5– Caractéristique Courant-Tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque	17
Figure II.6– Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque	17
Figure II.7– Configuration de connexion des cellules photovoltaïques	21
Figure II.8– Association de N_s cellules en série	22
Figure II.9– Association de N_p cellules en parallèle.....	22
Figure II.10– Association série-parallèle des cellules	23
Figure II.11 – Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	23
Figure II.12–Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.....	25

Figure II.13-Schéma électrique du convertisseur Boost	25
Figure II.14- Caractéristique $I - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs de températures..	27
Figure II.15- Caractéristique $P - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs de températures.	27
Figure II.16- Caractéristique $I - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs d'éclairement.	28
Figure II.17- Caractéristique $P - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs d'éclairement.	29

CHAPITRE III : commande par mode glissant d'ordre fractionnaire

Figure III.1-Plans de phase en mode glissant.	31
Figure III.2-Attractivité de la surface.	33
Figure III.3-la commande équivalente.....	33
Figure III.4-la fonction signe.....	35
Figure III.5-Phénomène de broutement.....	35
Figure III.6-la fonction saturation	36
Figure III.7-variation du facteur d'Oubli pour différentes valeurs de l'ordre de dérivation a.....	39
Figure III.8 -illustration de la dérivation au sens de Riemann-Liouville.....	40

Chapitre IV : Commande MPPT par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un systèmes photovoltaïques

Figure IV.1- Le schéma fonctionnel du FOSMC proposé pour le convertisseur élévateur.	46
Figure IV.2-résulta de simulation pour différent α	46
Figure IV.3-La différence de tension entre SMC et FOSMC	47
Figure IV.4-La différence de courant entre SMC et FOSMC	47
Figure IV.5-La différence de puissance entre SMC et FOSMC	47
Figure IV.6-L'impact de la puissance lors du changement du rayonnement solaire pour SMC et FOSMC	48
Figure IV.7-L'impact de la puissance lors du changement de la température pour SMC et FOSMC	48
Figure IV.8-L'impact de la puissance lors du changement du résistance pour SMC et FOSMC	49

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau I-1- Performances des différentes filières silicium	8
---	---

Chapitre II : Modélisation des générateurs photovoltaïques

Tableau II-1- Spécification du module photovoltaïque MSX60.....	26
---	----

INTRODUCTION GENERAL

Dans les années à venir, la production d'énergie sera un défi crucial, car les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, tandis que les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour assurer leur développement.

Actuellement, la production mondiale d'énergie est principalement basée sur les énergies fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une hausse de la pollution. Le risque supplémentaire réside dans le fait qu'une consommation excessive des ressources naturelles entraîne une diminution dangereuse des réserves de ce type d'énergie pour les générations futures, ainsi que face aux multiples crises économiques et pétrolières [1] [2].

Les ressources renouvelables, considérées comme un secteur stratégique, ont suscité l'intérêt de la science, occupant une position privilégiée dans les domaines de la recherche et du développement.

Différentes sources d'énergies renouvelables sont actuellement identifiées, telles que l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque [1] [3].

Le principal bénéfice de ces énergies renouvelables réside dans le fait qu'elles ne causent pas de pollution à l'atmosphère et ne génèrent pas de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote, qui contribuent au réchauffement climatique.

La consommation d'énergie solaire photovoltaïque (PV) devient de plus en plus répandue et compétitive par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Les progrès technologiques dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque et l'encouragement des programmes d'incitation des gouvernements sont à l'origine de ce succès [2].

Au cours des dix dernières années, la capacité mondiale d'énergie solaire a connu une augmentation rapide. Cette augmentation s'explique par la compétitivité croissante de l'énergie solaire, grâce à la baisse des prix des composants des systèmes solaires, notamment les modules solaires, ainsi qu'à l'introduction d'incitations économiques ou de subventions visant à diminuer l'utilisation des combustibles fossiles [3].

La recherche présentée dans cette thèse est organisée en quatre chapitres. Le travail effectué en chaque chapitre est résumé comme suit :

Le premier chapitre propose une vision approfondie des systèmes photovoltaïques, de leur fonctionnement théorique à leur application dans différentes situations.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un résumé de quelques modèles de cellules photovoltaïques. Nous expliquerons également les différents éléments qui contrôlent l'énergie électrique produite par la cellule et clarifierons la relation entre le courant et la tension dans un générateur solaire, ainsi que l'effet de la chaleur et du rayonnement solaire sur la puissance.

Le troisième chapitre est consacré aux concepts fondamentaux concernant le calcul et les opérateurs d'ordre fractionnaire en soulignant leurs caractéristiques mathématiques. On explique ensuite la description des systèmes par modèles d'ordre fractionnaire.

Le quatrième chapitre traite de l'application de la commande FOSMC dans le système photovoltaïque, en particulier dans le convertisseur DC-DC Boost, et de l'extraction de

l'équation de commande U pour la simuler, puis l'appliquer sur le système pour comparer sa réponse par rapport à la commande SMC.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction :

Le système photovoltaïque comprend différents composants qui permettent de générer de l'électricité grâce au rayonnement solaire. Une charge continue ou alternative est alimentée par un générateur PV grâce à une interface d'électronique de puissance. Il peut générer une puissance allant d'un milliwatt à quelques kilowatts [4].

Le principe fondamental de ce système est connu sous le nom de cellule PV ou photopile.

Quand il reçoit de l'éclairage, il génère de l'énergie électrique [1].

Le générateur photovoltaïque possède une configuration courant-tension non linéaire et offre un point de puissance maximale (PPM). L'éclairement et la température, ainsi que le vieillissement de l'ensemble, influencent cette caractéristique. Ainsi, le niveau de fonctionnement du générateur PV peut fluctuer entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit et la tension en circuit extérieur. La détermination du niveau de fonctionnement du générateur PV est directement influencé par la charge à laquelle il est connecté. On ne peut obtenir la puissance maximale disponible qu'en un seul point de fonctionnement particulier [5].

I.2 Effet photovoltaïque

L'énergie solaire est perçue comme une ressource inépuisable pour l'humanité et est incluse dans les énergies renouvelables. À l'heure actuelle, on compte deux méthodes d'exploitation de l'énergie solaire qui convertissent directement le rayonnement en chaleur ou en électricité.

La technologie photovoltaïque consiste à transformer directement l'énergie solaire en courant électrique à partir de matériaux semi-conducteurs. L'effet photoélectrique a été découvert par Edmond Becquerel dès 1839 [6].

En 1913, William Coblentz a soumis le tout premier brevet pour une cellule solaire qui, malheureusement ne sera jamais utilisée.

En 1916, Robert Millikan sera le premier à générer de l'électricité grâce à une cellule solaire. Cependant, Durant les quarante années qui suivent, personne ne fera de grands progrès dans le domaine de l'énergie solaire car les cellules photovoltaïques ne sont pas suffisamment performantes pour convertir la lumière du soleil en énergie.

Le phénomène demeure toujours une découverte insignifiante jusqu'à 1954 que la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 6% [1] [7].

I.3 Spectre solaire

Le soleil émet un spectre électromagnétique à une température de 5800 K. En arrivant sur la terre avec une puissance de rayonnement par unité de surface (l'irradiation) est de 1366 W.m². Toutefois le spectre électromagnétique passe par différentes couches de l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la terre, et l'atmosphère terrestre ne permet de passer que le visible, avec quelques éléments d'infrarouge IR et d'ultraviolet UV.

Les différents gaz présents dans ces couches, tels que l'ozone ou le dioxyde de carbone, absorbent une partie du rayonnement. Ainsi, la puissance utilisable sur terre est moins importante et varie en fonction de l'épaisseur de l'atmosphère traversée. La masse d'air AM

désigne la distance parcourue par le rayonnement solaire dans l'atmosphère. Elle dépend de l'angle d'incidence par rapport au point culminant [8].

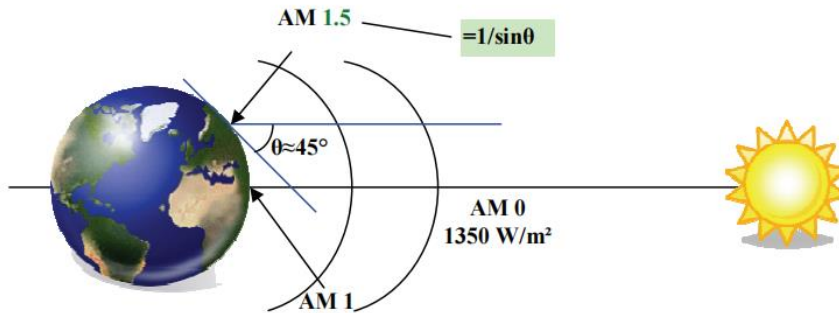


Figure 1–Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la Convention AM [8]

I.4 Le fonctionnement d'une cellule solaire :

Quand on éclaire un semi-conducteur avec un rayonnement de longueur d'onde adéquat (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés entraîne des transitions électroniques de la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, ce qui génère des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant par le matériau lorsqu'on le polarise.

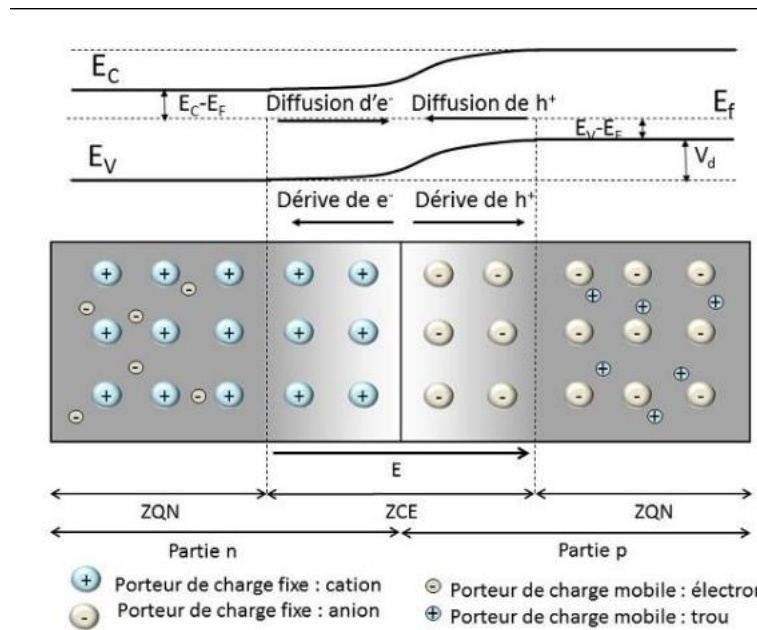


Figure 2–Jonction p-n dans une cellule photovoltaïque.

Selon la figure 2, les cellules photovoltaïques semi-conductrices se composent de deux couches de semi-conducteur, une couche dopée n et une couche dopée p, formant ainsi une jonction p-n. Quand les deux composantes de La jonction p-n est formée à partir du même matériau, ce qui en fait une homojonction.

Quand la partie n et la partie p sont composées de matériaux distincts, on désigne cette jonction comme une hétérojonction. Les charges principales sont réparties dans la jonction où leur concentration est la plus basse.

Dans la section n, les électrons se déplacent vers la section p, tandis que les trous se déplacent vers la section n.

En conséquence, une zone située à proximité de l'interface est composée de charges fixes et désertée en porteurs de charge.

On désigne cette zone sous le nom de zone de déplétion ou de Zone de Charge d'Espace (ZCE). Dans la ZCE, on ne respecte plus la neutralité électrique et on observe la formation d'un champ électrique. Son objectif est de prévenir la diffusion des électrons et des trous en accélérant les électrons dans une direction opposée à E et en accélérant les trous dans la direction de E. On nomme ce phénomène la dérive, lorsqu'il est atteint, une variation de potentiel V_d se produit à la jonction [7] [9] [10].

I.5 Potentiel solaire en Algérie

Le pays profite d'une exposition solaire annuelle de plus de 3000 heures, ce qui en fait un lieu clé pour la production d'énergie solaire. En raison de sa position stratégique en Afrique du Nord et de sa proximité avec l'Europe, l'Algérie présente des avantages pour exporter de grandes quantités d'électricité distribuable provenant d'énergies renouvelables en Europe.

Grâce à sa position géographique favorable, l'Algérie abrite un potentiel considérable pour les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire. En réalité, l'Algérie dispose d'un potentiel solaire considérable à l'échelle mondiale et c'est la principale source d'énergie solaire de la région méditerranéenne, avec une production annuelle estimée à 180 TWh. Avec une superficie de plus de 2 000 000 km².

Le potentiel solaire quotidien de l'Algérie, qui s'élève à 3 500 heures par an, varie de 4,66 kWh /m² dans le nord à 7,26 kWh /m² dans le sud [9].

De plus, selon une recherche réalisée par l'Agence aérospatiale allemande (DLR), l'Algérie se distingue par son potentiel terrestre à long terme pour les centrales CSP dans la région méditerranéenne, avec une superficie de 1787000 km² disponibles.

Selon l'étude DLR, l'Algérie est également considérée comme ayant le potentiel économique le plus élevé pour la construction d'installations CSP dans le bassin méditerranéen, avec une estimation de 168,972 TWh par an. En même temps que l'analyse DLR, les institutions algériennes ont réalisé des évaluations approfondies. D'après le Centre de recherche sur les énergies renouvelables, Le rapport du ministère de l'Énergie et des mines révèle que l'Algérie possède un potentiel de rayonnement solaire considérable, parmi les plus élevés à l'échelle mondiale [5].

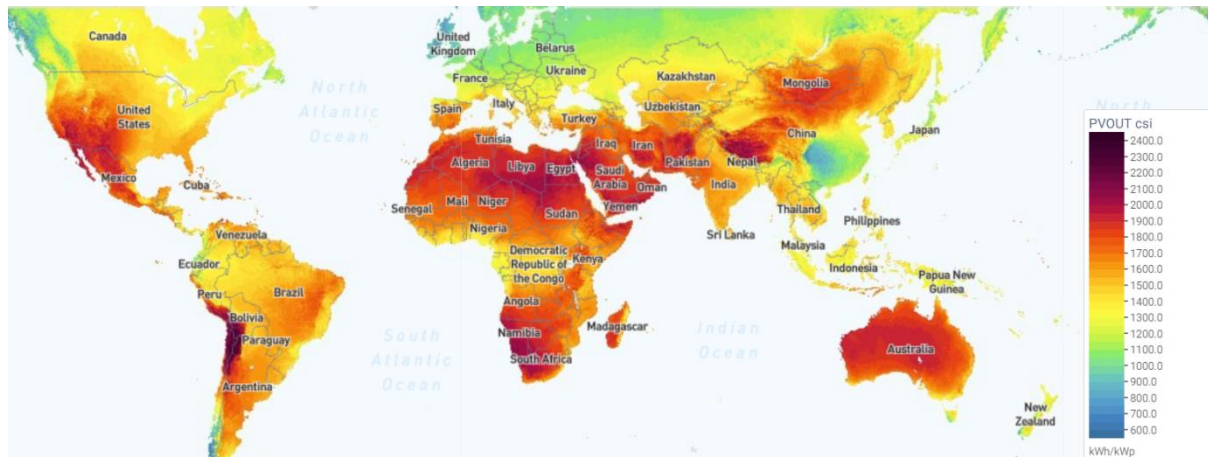


Figure 3—carte mondiale de l'irradiation horizontale globale (Solaris) [40]

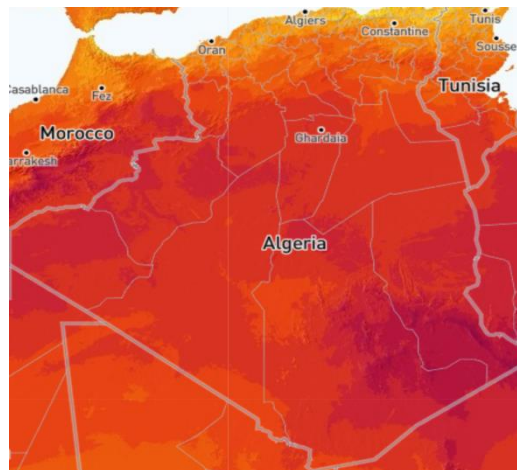


Figure 4—Énergie solaire au sol en Algérie, en kWh/m² [40]

I.6 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïque :

La production la plus connue est celle qui par le silicium mono ou poly cristallin à 83,46% et 98,63% pour l'ensemble des filières silicium [11].

I.6.1 Cellules de type monocristallines :

Cette cellule est la plus proche du modèle théorique. En réalité, elle est constituée d'un cristal unique qui est divisé en deux couches. Les cellules sont fabriquées à partir d'énormes cristaux de silicium spécialement conçus à cet effet. Ces cellules se distinguent par : Un taux de rendement remarquable. Les cellules au silicium ont un rendement théorique maximal de 28%. Dans la réalité, les cellules monocristallines offrent une efficacité d'environ 15 à 22%. La baisse est causée par le fait qu'une partie du rayonnement solaire, à savoir celui qui se trouve dans les rayons rouges et infrarouges, ne renferme pas suffisamment d'énergie pour générer un effet photovoltaïque ; Un coût élevé en raison de la méthode de fabrication laborieuse et complexe [12] [13].

I.6.2 Cellules de type polycristallines

Les cellules polycristallines ont une apparence similaire à celle des cellules monocristallines, mais elles sont constituées d'un ensemble de cristaux. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Un rendement moyen de 10 à 15% ; Un coût de production réduit ; Une méthode de fabrication qui requiert moins d'énergie [12] [13].

I.6.3 Cellules de type silicium amorphe

Depuis 1975, des études approfondies ont été menées afin d'exploiter le silicium à l'état amorphe. Cet intérêt découle du fait qu'il présente de nombreux avantages, dont un coefficient d'absorption élevé, ce qui permet de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron et une consommation d'énergie réduite tout au long du processus de production. Les particularités de ces cellules incluent : Un coût de production nettement inférieure ; Un rendement inférieur (environ 6 à 7%) ; Une durée de vie réduite (dégradation sous l'effet de la lumière) [12] [13].

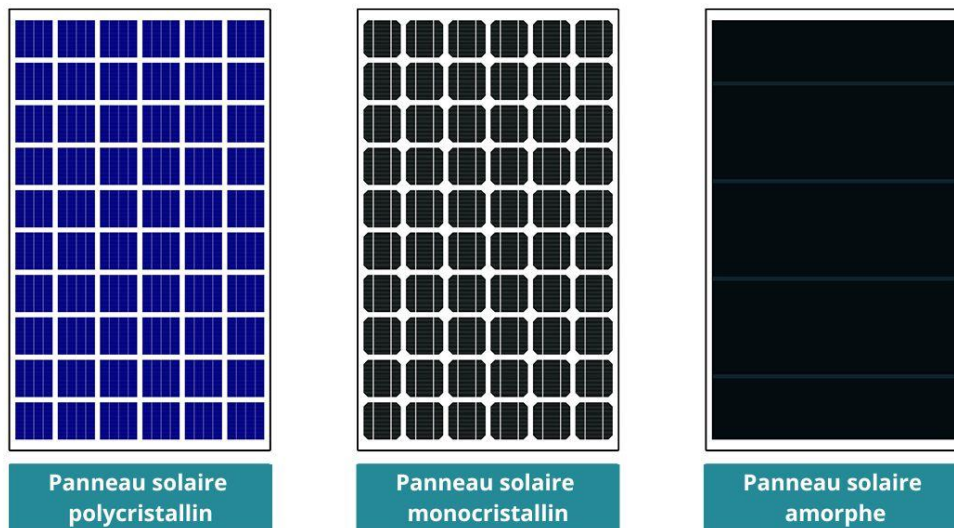


Figure 5–les types des panneaux solaires

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
Monocristalline	12 à 16%	-0.442% Par ⁰ C	-0.38% Par An
Polycristalline	11 à 14 %	-0.416% Par ⁰ C	-0.35% Par An
Amorphe	6 à 7%	-0.175 % Par ⁰ C	-1.15% Par An

Tableau 1 – Performances des différentes filières silicium [5]

I.7 Installation des panneaux solaires :

Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être installés soit sur des supports fixes au sol, soit sur des systèmes mobiles de suivi du soleil connus sous le nom de trackers. Dans cette situation, la quantité d'électricité produite augmente d'environ 30% par rapport à une installation fixe.

Actuellement, les installations fixes sont principalement installées sur les toits des logements ou des bâtiments, que ce soit en intégrant le toit ou en surimposant. Le lieu de pose doit être parfaitement dégagé, aéré et sécurisé. Il est recommandé de laisser une profondeur d'environ 10 cm sous les modules et de les positionner avec une inclinaison d'au moins 10° afin de garantir un nettoyage automatique pendant les pluies. Afin d'améliorer les performances, il est conseillé d'adopter une inclinaison de 30° à 60° [14].

I.8 Classification des systèmes photovoltaïques :

I.8.1 Système PV autonome :

En ce qui concerne les installations autonomes, les systèmes photovoltaïques opèrent sans interruption des réseaux électriques. Les panneaux solaires PV génèrent de l'énergie qui peut être utilisée immédiatement (pour le pompage d'eau, la ventilation, etc.) ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le courant continu généré est utilisé directement pour alimenter des appareils spécifiquement conçus ou est converti en 230 V alternatif grâce à un onduleur. Le couplage direct est la configuration la plus simple des systèmes autonomes, où le GPV est directement relié à la charge continue. La charge ne peut être utilisée dans cette connexion que pendant les périodes d'ensoleillement adéquat. Il est possible de réaliser des applications qui ne nécessitent pas de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité, telles que le pompage de l'eau [14] [15].



Figure 6–Couplage direct GPV-charge

Pour des applications nécessitant de l'énergie électrique même pendant la nuit et pendant les moments d'obscurité, il est possible d'inclure un système de stockage dans le système. L'énergie générée par le système solaire est stockée dans l'accumulateur d'énergie afin d'être utilisée lorsque l'éclairage est insuffisant. Effectivement, c'est généralement la batterie qui a la durée de vie la plus courte dans une application solaire. Pour prolonger la durée de vie d'une batterie, il est essentiel de prévenir la surcharge (éviter que la tension dépasse un certain seuil) et la décharge profonde (éviter que la batterie soit dépourvue de plus de 60% de sa charge). [14] [15].

Il est envisageable d'utiliser un contrôleur de charge pour des applications. Par conséquent, lorsque l'énergie générée dépasse l'énergie consommée, l'excédent d'électricité est conservé dans les batteries jusqu'à ce que la capacité de charge des batteries soit atteinte. De manière opposée, lorsque l'énergie générée est plus faible que l'énergie consommée, les batteries fournissent la quantité d'énergie manquante jusqu'à ce que la limite de décharge des batteries soit atteinte. Un dispositif de régulation de charge-décharge est donc essentiel [14] [15].

I.8.2 Systèmes PV connectés aux réseaux :

Dans cette catégorie, on retrouve habituellement trois catégories de systèmes dans les applications de photovoltaïque.

- 1) Les centrales photovoltaïques de grande envergure ont pour but de fournir de l'électricité à haute tension (50 à 400 kV) ou à moyenne tension (3 à 50 kV) aux réseaux électriques. Les charges seront alimentées par le réseau public et toute l'énergie produite sera vendue.
- 2) Les installations sont connectées au réseau et génèrent de l'électricité directement, ce qui évite les pertes liées au transport et à la distribution. Dans ces systèmes, il est possible de se débarrasser du coûteux et complexe stockage d'énergie. Par ailleurs, lorsque la consommation locale dépasse la production de la centrale, le réseau assure l'appoint. Si ce n'est pas le cas, l'électricité est fournie au réseau public et est utilisée pour alimenter les consommateurs proches.
- 3) Cette configuration est reliée au réseau et offre également un système de stockage qui peut être bénéfique en cas de dysfonctionnement du réseau. Les utilisateurs sur place sont alimentés par l'énergie produite, tandis que le surplus sera stocké dans des batteries jusqu'à ce qu'elles soient chargées, puis le reste sera injecté dans le réseau. Si l'approvisionnement de toutes les charges ne peut pas être assuré par la production et le stockage, on fait appel au réseau public [14] [15].

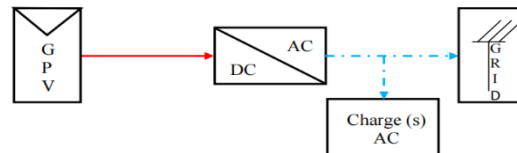


Figure 7–Système PV raccordé au réseau central

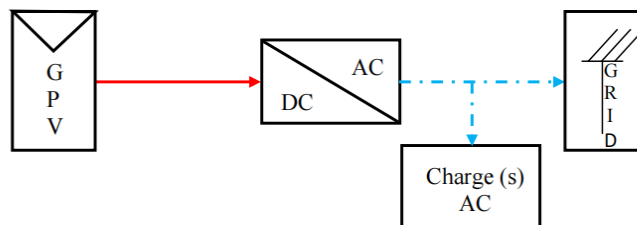


Figure 8–Système PV raccordé Au réseau sans stockage d'énergie

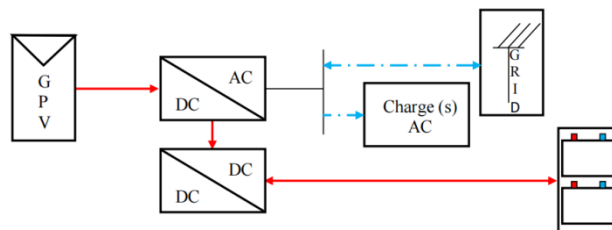


Figure 9–Système PV raccordé au réseau avec stockage d'énergie

I.9 Conclusion :

L'énergie est aujourd'hui un point essentiel de l'économie des pays. L'une des sources d'énergie les plus intéressantes et avec moins d'effets secondaires est l'énergie solaire. Pour exploiter cette énergie, plusieurs facteurs entrent en jeu. Tout d'abord, l'angle par rapport au

soleil, qui influence la quantité d'énergie reçue. Deuxièmement, les récepteurs qui absorbent cette énergie. Dans ce chapitre, nous avons utilisé des panneaux photovoltaïques qui génèrent de l'électricité à partir des photons. Il existe plusieurs technologies pour cela, mais la technologie des cristaux est la plus efficace, offrant un rendement élevé. Enfin, il existe deux façons de consommer cette énergie : la première consiste à connecter les panneaux au réseau, et la deuxième à la stocker dans des batteries.

CHAPITRE II : Modélisation des générateurs photovoltaïque

II.1 Introduction :

La cellule photovoltaïque constitue une source d'énergie non linéaire, où le courant et la tension de sortie dépendent de l'irradiation solaire G et de la température T . Ainsi, pour prédire les performances des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de développer un modèle mathématique capable d'étudier leur fonctionnalité dans diverses conditions météorologiques (éclairage, température). De nombreux travaux se concentrent sur l'élaboration de modèles mathématiques pour simuler les caractéristiques (I-V) des cellules photovoltaïques.

Ce chapitre expose le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque et les différents modèles électriques disponibles, ainsi que les courbes caractéristiques (P-V) et (I-V) de la cellule photovoltaïque. De plus, il aborde le modèle mathématique du générateur photovoltaïque et les différentes configurations de montage, ainsi que les techniques de MPPT et les diverses commandes appliquées. Nous avons également discuté du convertisseur DC-DC de type boost et de ses caractéristiques. Enfin, nous avons simulé un générateur photovoltaïque de type MSX60 pour déterminer ses caractéristiques électriques.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

En général, la simulation du comportement des modules photovoltaïques repose sur leurs caractéristiques I-V. Dans cette optique, plusieurs études ont été proposées, utilisant différents modèles mathématiques. Cette section présente trois modèles principaux : Idéalement, nous utiliserions un modèle réel à deux diodes et un modèle réel à une seule diode.

II.2.1 Modèle électrique idéal à une diode :

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les cellules photovoltaïques sont une grande diode, sa lumière produira un photocourant I_{ph} . En effet, une partie du courant est dissipée au niveau de la jonction, ce qui conduit au modèle d'une cellule photovoltaïque simplifiée agit comme une source de courant shunt Diode (Figure II.1).

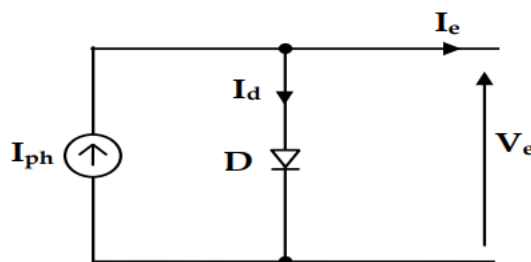


Figure II.1 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode

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

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

Avec :

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

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

Où :

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

II.2.2 Modèle électrique réel à deux diodes :

La représentation précédente de la cellule photovoltaïque est idéale, ce qui n'est pas le cas en réalité. Afin de prendre en compte les différents phénomènes physiques présents au niveau de la cellule photovoltaïque, le modèle électrique précédent est complété par deux résistances série (R_s) et parallèle (R_p) comme le montre la figure II.2. En effet, le modèle réel à deux diodes est constitué de deux diodes parallèles D_1 et D_2 ayant les courants de saturation respectifs I_{sat1} et I_{sat2} et les facteurs de diode respectifs n_1 et n_2 , d'une source de courant produisant le courant I_{ph} qui dépend de l'éclairement solaire G . Une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques du matériau et des contacts (résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal). La valeur de R_s peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I - V$ pour la tension à circuit ouvert V_{co} . Enfin, une résistance parallèle R_p qui présente l'admittance parallèle du générateur de courant (la présence d'un courant de fuite dans la jonction).

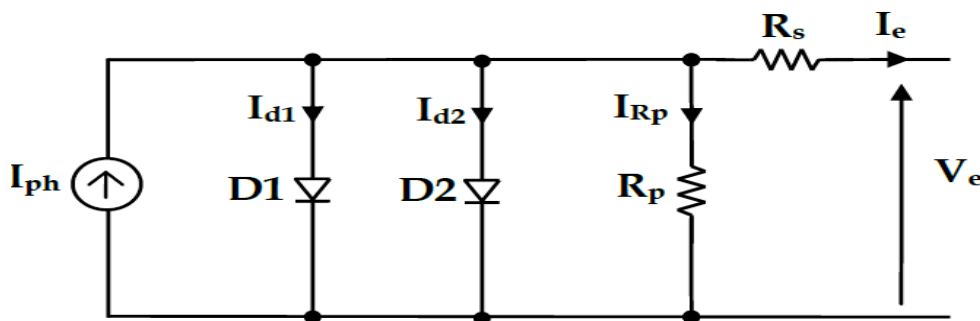


Figure II.2 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes

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

$$I_e = I_{ph} - I_{d_1} - I_{d_2} - I_{Rp} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$I_{d_1} = I_{sat1} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

$$I_{d_2} = I_{sat2} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

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

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

Où :

- I_{sat1} : Courant de saturation inverse de la diode $D1$;
- I_{sat2} : Courant de saturation inverse de la diode $D2$;
- n_1 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode $D1$;
- n_2 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode $D2$;
- I_{Rp} : Courant de la résistance parallèle R_p ;
- R_p : Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction ;
- R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions ;

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

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

II.2.3 Modèle électrique réel à une diode :

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

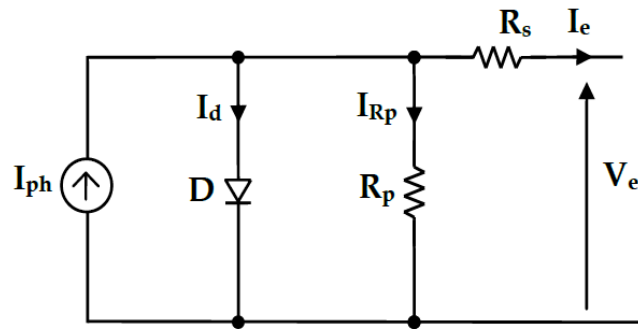


Figure II.3 – Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

En se basant sur le circuit de la figure II.3, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante [16] :

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

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

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_e + R_s I_e}{R_p} \quad (\text{II.10})$$

La résistance parallèle R_p est très grande par rapport à la résistance série R_s , son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger, ce qui nous permet d'aboutir à un modèle simplifié qui est largement utilisé. La figure II.4 illustre ce modèle simplifié de la cellule photovoltaïque [17] [18] [19].

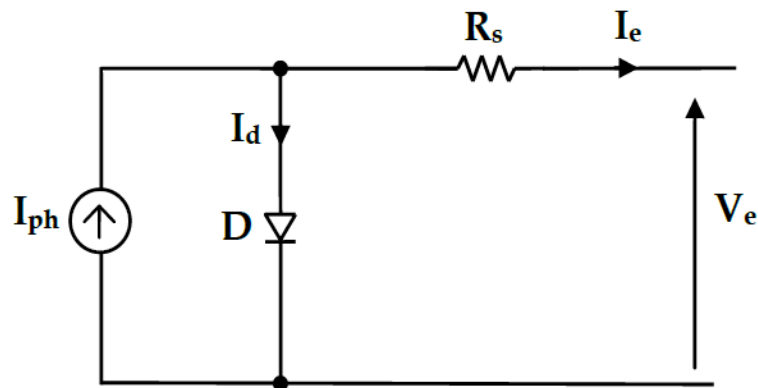


Figure II.4 – Modèle électrique équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

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

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

II.2.4 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

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

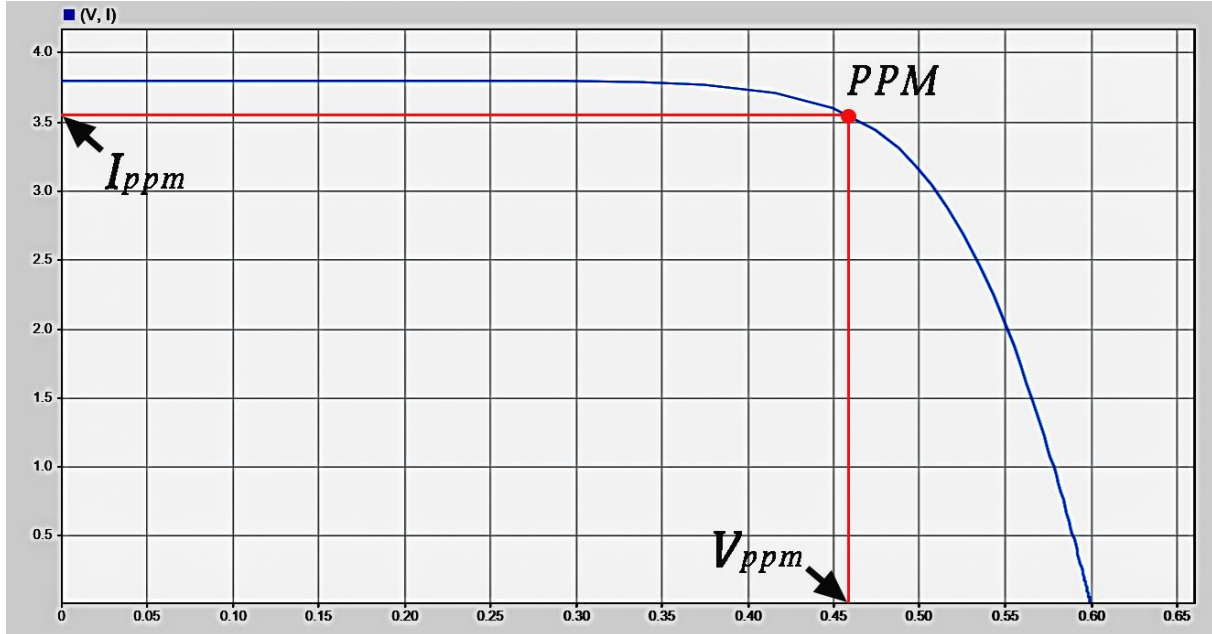


Figure II.5 – Caractéristique Courant-Tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque

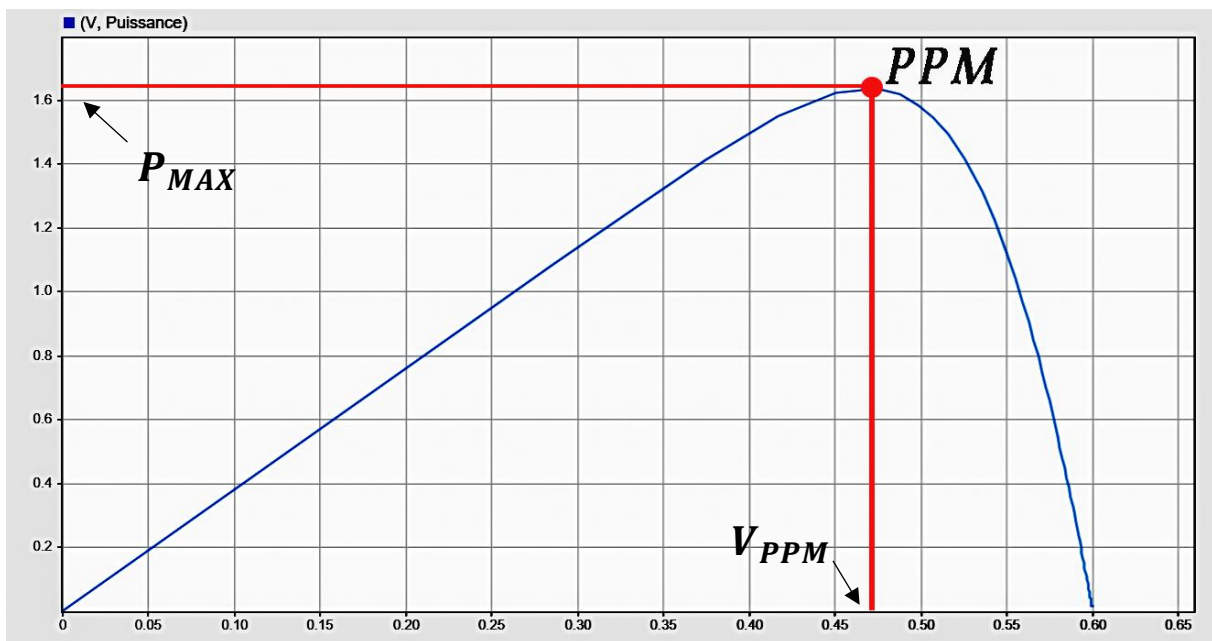


Figure II.6 – Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque

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

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

Selon les graphiques caractéristiques précédents, il est évident que la cellule photovoltaïque présente une caractéristique $I - V$ non linéaire, allant du point de fonctionnement extrême correspondant au courant de court-circuit I_{cc} vers un autre point extrême correspondant à la tension en circuit ouvert V_{co} , tout en passant par le point de fonctionnement souhaité (optimal) qui est le Point de Puissance Maximale (PPM) [14].

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

- **Si sa tension est inférieure à 0,4 V** : Elle agit comme un générateur de courant I_{cc} en fonction de l'irradiation G . Dans cette zone, le fonctionnement de la cellule génère des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.[5]
- **Si son courant est moins de 3 A** : Elle joue le rôle de générateur de tension V_{co} en fonction de la température T . Dans cette zone, le fonctionnement de la cellule génère des puissances limitées, des courants lents et des tensions élevées.[5]
- **Entre ces deux limites** : Elle opère dans son état optimal de fonctionnement PPM. Dans cette zone, le fonctionnement de la cellule génère des puissances élevées avec des valeurs de courant et de tension modérées, ce qui permet d'optimiser l'exploitation du gisement solaire [5].

II.2.5 Calcul des paramètres du modèle

Les fiches techniques photovoltaïques offrent des informations expérimentales concernant les propriétés électriques et thermiques du dispositif photovoltaïque qui fonctionne dans des conditions de référence telles que l'irradiation $G = G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ et la température $T = T_{ref} = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$.

Ces fiches renferment principalement les informations suivantes : le courant de court-circuit $V_{cc,ref}$, la tension de circuit ouvert $V_{co,ref}$, la tension correspondante au point de puissance maximale $V_{ppm,ref}$, le courant correspondant au point de puissance maximale $I_{ppm,ref}$, les coefficients de variation de la tension du circuit ouvert et du courant de court-circuit en fonction de la température définis respectivement par k_v et k_i , ainsi que les caractéristiques $I - V$ des dispositifs photovoltaïques à différentes températures et irradiances.

Toutefois, il est impossible de trouver certains paramètres dans la fiche technique du fabricant, tels que le photo-courant, le courant de saturation de la diode, le facteur d'idéalité et les résistances série et parallèle. En outre, il convient de souligner qu'il est impossible de supposer que les paramètres du modèle sont des constantes dans différentes conditions météorologiques. En règle générale, la température T et l'irradiation G ont un impact sur les paramètres de la cellule [2] [20].

Les paramètres clés du modèle photovoltaïque et leur fluctuation en fonction des conditions météorologiques seront présentés dans ce qui suit [5].

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

La manière dont le courant de court-circuit est exprimé est influencée par la température et l'exposition au soleil. Elle est indiquée pour toute température T et toute irradiation solaire G de la manière suivante :

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

Où :

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

II.2.5.2 Photo-courant I_{ph} :

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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

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

Où :

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

technique du constructeur.

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

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

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

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

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

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

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

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

II.2.5.5 Résistance série R_s :

La pente de la caractéristique courant-tension $I - V$ est directement influencée par la résistance série R_s dans la région proche de la tension en circuit ouvert V_{co} . On obtient l'équation de la résistance série R_s en différenciant l'équation (II.11) [17].

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

Ce qui donne :

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

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

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

$\frac{dV_e}{dI_e} \Big|_{V_{co}}$ Représente la pente de la caractéristique $I - V$, calculée dans la région proche de V_{co} en utilisant les courbes publiées par le constructeur dans la fiche technique puis on la divise par le nombre de cellules mises en série N_s .

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique $I - V$ d'un générateur photovoltaïque ne se reflète pas dans l'équation de base (II.11) de la cellule photovoltaïque élémentaire. Le GPV est une association de nombreuses cellules élémentaires, reliées dans diverses configurations. On utilise principalement trois types de structure d'interconnexion : la série parallèle, le Total Cross Tied (TCT) et le Bridge Linked (BL). Les différentes configurations pour un module photovoltaïque de 2×6 sont illustrées dans la Figure II.7 [20].

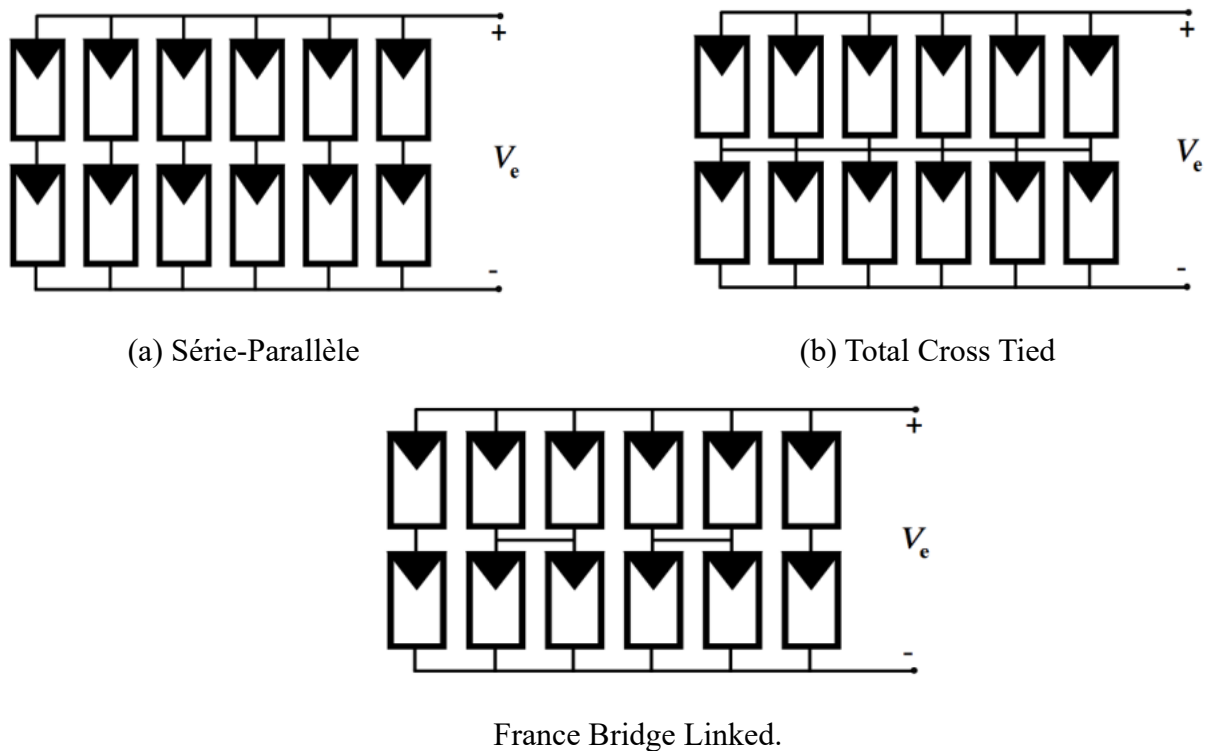


Figure II.7 – Configuration de connexion des cellules photovoltaïques

- Série-Parallèle** : Dans cette configuration, les cellules photovoltaïques sont d'abord connectées en série pour former des chaînes de cellules. Ensuite, plusieurs chaînes sont connectées en parallèle pour former l'ensemble du générateur PV [21].
- Total Cross Tide** : Dans cette configuration, chaque cellule d'une ligne est connectée à une cellule correspondante de la ligne suivante via des connexions croisées. Cela crée un réseau où chaque nœud est relié à plusieurs autres, répartissant les courants entre les cellules [21].
- Bridge Linked** : Cette configuration est un hybride entre la série-parallèle et le Total Cross Tide. Les cellules sont connectées en série pour former des chaînes, et chaque chaîne est ensuite reliée à une autre chaîne via des connexions croisées, formant des ponts entre les chaînes [21].

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

II.3.1 Association de N_s cellules en série :

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

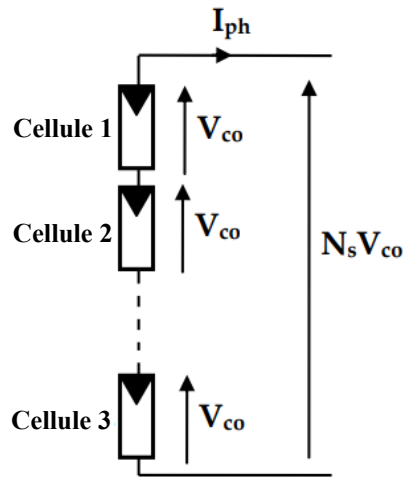


Figure II.8 – Association de N_s cellules en série

II.3.2 Association de N_p cellules en parallèle :

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

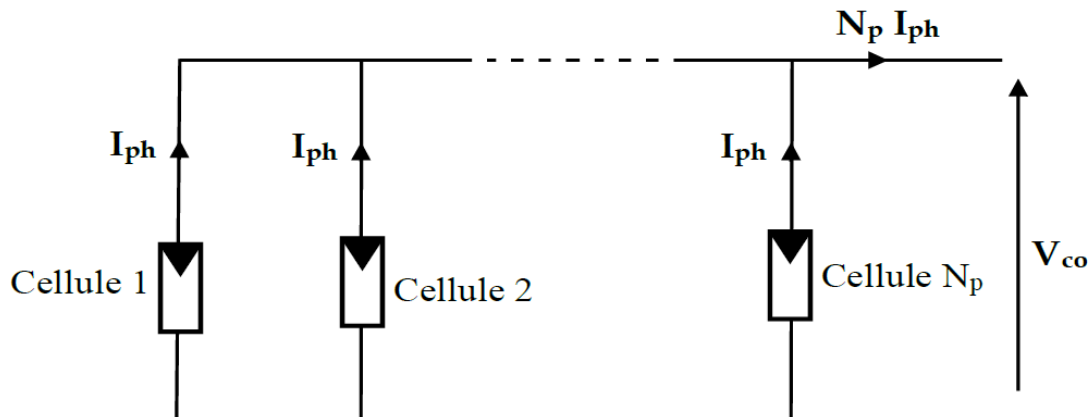


Figure II.9 – Association de N_p cellules en parallèle

II.3.3 Association série-parallèle des cellules :

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

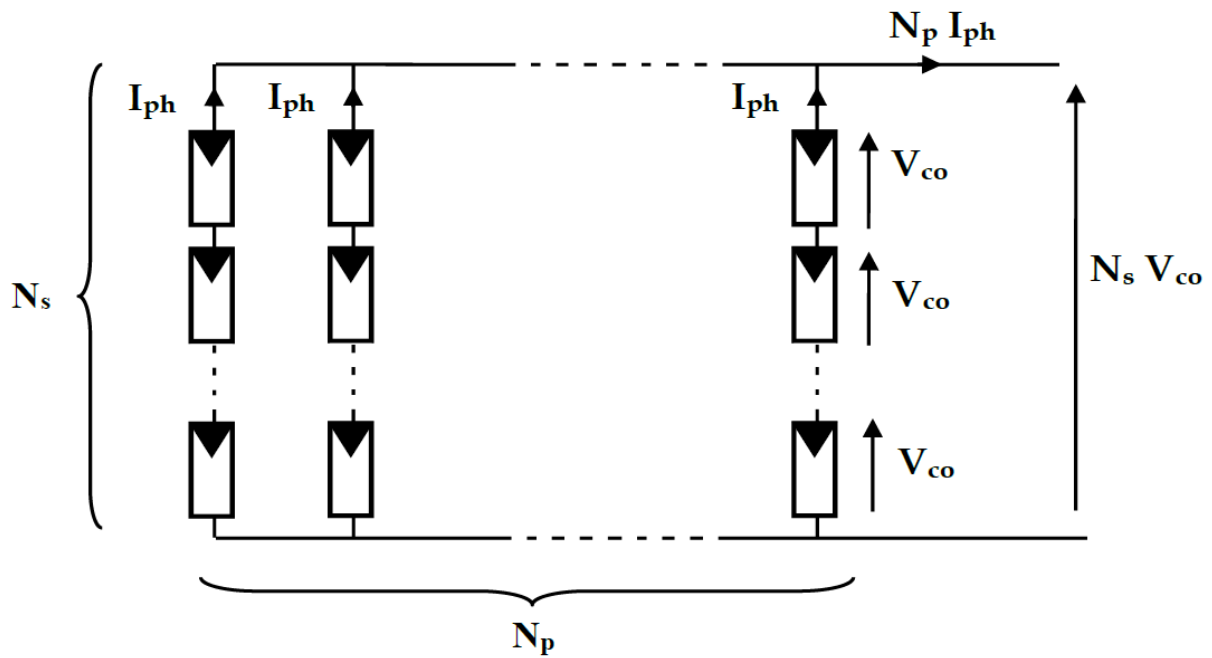


Figure II.10 – Association série-parallèle des cellules

À partir de l'équation (II.11) et de la figure II.10, la relation entre le courant et la tension dans un générateur photovoltaïque, constitué de N_s cellules connectées en série et de N_p cellules connectées en parallèle est donnée par l'équation suivante :

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

II.4 La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

La commande MPPT, également appelée Maximum Power Point Tracking, est un élément essentiel du système photovoltaïque qui permet de trouver le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, en fonction des conditions météorologiques et de la variation de la charge [22].

II.4.1 Principe de la commande MPPT :

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

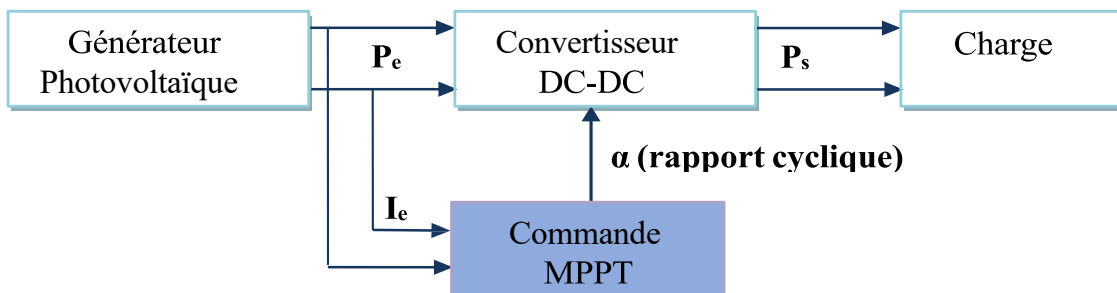


Figure II.11 – Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

II.4.2 Les différentes commandes MPPT :

Il existe de nombreuses méthodes de contrôle pour la commande MPPT, parmi lesquelles :

- **La méthode Perturbation et Observation (P&O) :**
Cette méthode est largement utilisée en pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cette méthode implique une perturbation de la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Lorsque le GPV est connecté à un convertisseur de puissance, cette perturbation affecte le rapport cyclique et, par conséquent, la tension [23][24].
- **La méthode Incrément des conductances (INC) :**
La méthode MPPT de conductance incrémentale (INC) est l'une des stratégies MPPT les plus répandues en raison de sa capacité à suivre rapidement le point de puissance maximale (PPM). Comparée à la stratégie P&O MPPT, l'INC combine et exploite les caractéristiques uniques des courbes de sortie P-V et des courbes I-V du générateur photovoltaïque, ce qui lui permet de poursuivre le PPM de manière plus rapide et précise [23][25].
- **Commande par la logique floue :**
Cette méthode intègre la logique floue pour accélérer la réponse du contrôleur et améliorer la stabilité du système une fois le point de puissance maximale (MPP) atteint. La poursuite du MPP se divise en deux phases distinctes : une première phase de recherche grossière avec un pas de recherche important pour accélérer la réponse du contrôleur MPPT, suivie d'une phase plus précise avec un pas très petit visant à assurer la stabilité du système et à minimiser les oscillations autour du PPM. Cette approche du contrôleur flou démontre son efficacité, ce qui le classe parmi les meilleurs dispositifs de suivi MPPT [23][26].
- **Commande par mode glissant (SMC) :**
Le mode glissant, un mode de fonctionnement spécifique des systèmes à structure variable, est devenu l'une des techniques de contrôle les plus prisées pour une vaste gamme de classes de systèmes non linéaires. Il se distingue par sa facilité de mise en œuvre, sa réponse dynamique efficace, et surtout par sa robustesse face aux incertitudes internes, se traduisant par une insensibilité aux variations des paramètres du système à contrôler ainsi qu'aux perturbations externes. L'approche fondamentale de la commande par mode glissant consiste tout d'abord à attirer les états du système dans une région préalablement définie, puis à concevoir une loi de commande qui maintiendra constamment le système dans cette région [23][26].

La méthode de contrôle couramment employée implique d'intervenir automatiquement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC afin d'atteindre la valeur optimale de fonctionnement du générateur, peu importe les fluctuations météorologiques ou les variations brusques de charges qui peuvent survenir à tout moment [16].

II.5 Convertisseurs continu – continu (DC/DC) :

Les hacheurs, (convertisseurs continu-continu), offrent la possibilité de réguler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé. Ce sont des condensateurs, des inductances et des commutateurs qui les composent. Dans le meilleur des cas, tous ces appareils ne nécessitent aucune puissance active, c'est pourquoi on obtient de bons rendements [27].

II.5.1 Rapport cyclique :

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

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

II.5.2 Choix de convertisseur :

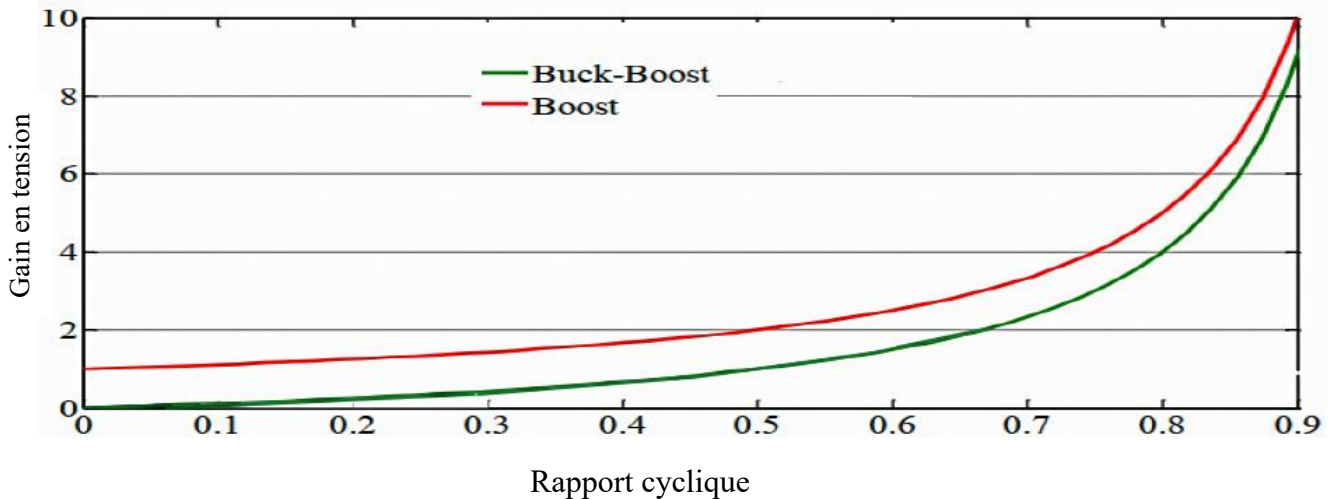


Figure II.11 – Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

❖ Discussion :

- En ce qui concerne le gain en tension, le Boost occupe la première position, comme le montre la Figure II.11 qui illustre l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

II.5.3 Convertisseur élévateur de tension Boost :

On retrouve fréquemment dans la littérature le convertisseur Boost sous le nom de hacheur survolteur ou hacheur parallèle. Il y a une source d'entrée de courant continu et une charge de sortie de tension continue.

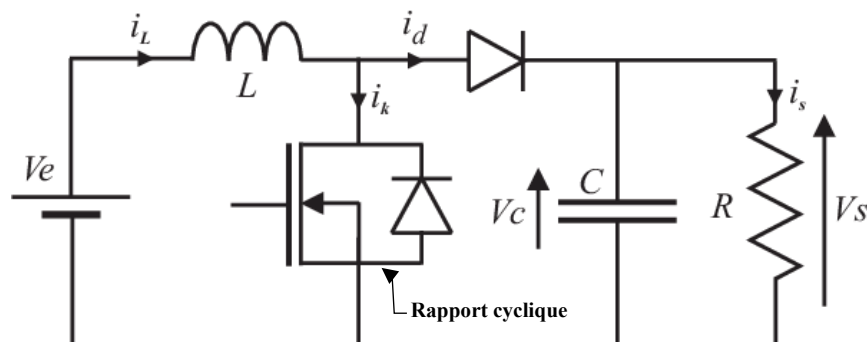


Figure II.12–Schéma électrique du convertisseur Boost

II.6 Simulation du générateur photovoltaïque (Module solaire The Solarex MSX60) :

Le module PV MSX 60 de Solarex en silicium polycristallin était l'un des plus puissants de la série Méga module de Solarex [28].

II.6.1 Description du module :

Le module PV MSX 60 offrant plus de 3 A de courant à la puissance de crête. On peut utiliser ce panneau en tant que module unique ou le déployer dans des champs multi-modules, qui peuvent être câblés en série ou en parallèle en fonction des besoins, Le MSX 60 a été développé selon le concept d'intégration du système « IntegraSystem », ce qui assure une compatibilité avec d'autres systèmes solaires et composants [28][29].

II.6.2 Caractéristiques électriques :

La Température	T	25	C
Tension en circuit ouvert	V_{co}	21	V
Courant de court-circuit	I_{cc}	3.74	A
Tension au point de puissance maximale	V_{ppm}	17.1	V
Courant au point de puissance maximale	I_{ppm}	3.8	A
Puissance maximale	P_{max}	59.9	W

Tableau II.1 – Spécification du module photovoltaïque MSX60

II.6.3 Simulation du module photovoltaïque MSX60 :

a) Influence de la température :

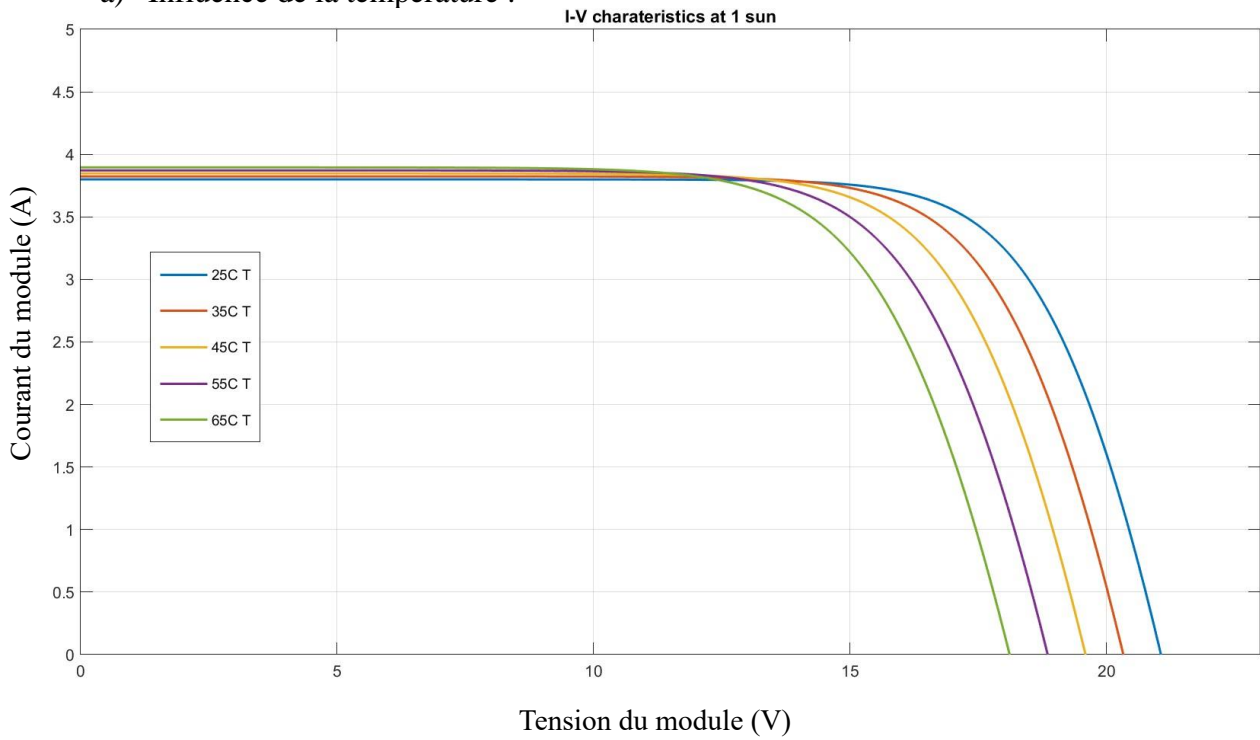


Figure II.13 – Caractéristique $I - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs de températures.

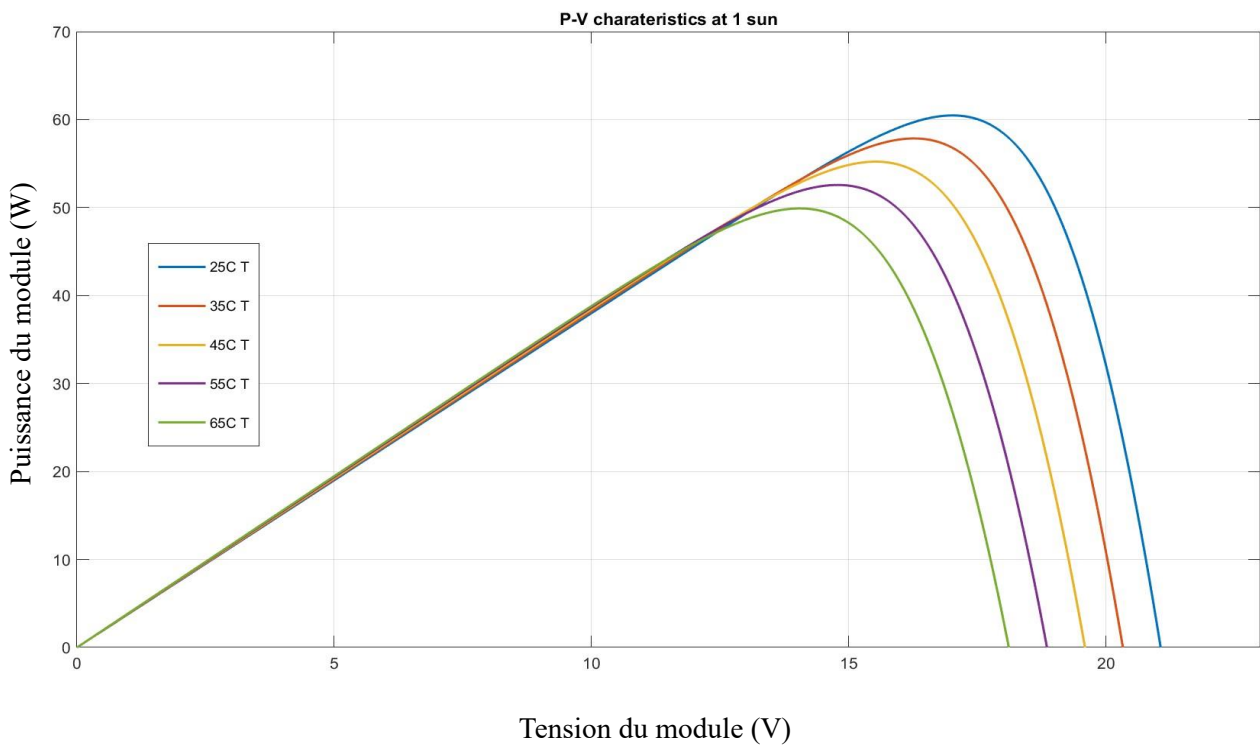


Figure II.14 – Caractéristique $P - V$ du module MSX60 pour différentes valeurs de températures.

Les figures II.13 et II.14 illustrent la variation des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ suite à la variation de la température, sachant que $G=cts=1000W/m^2$.

❖ **Discussion :**

- Comme le montre la figure II.13, le courant de court-circuit reste presque constant en fonction de la température (avec une légère augmentation), mais la tension du circuit ouvert diminue de quelques millivolts par degré Celsius à mesure que la température augmente.
- Ainsi, la puissance maximale diminue lorsque la température augmente, comme illustré dans la figure II.14. Il convient de noter que le module perd environ 0,5 % de sa puissance à chaque degré d'augmentation de la température. Lors de la planification d'une installation, il est essentiel de prendre en considération la fluctuation de la température du site.

Nous allons maintenant examiner la fluctuation des caractéristiques $I-V$ et $P-V$ en fonction de l'éclairement G , en tenant compte de la température constante $T=ctse=25^{\circ}C$.

b) Influence de l'éclairement

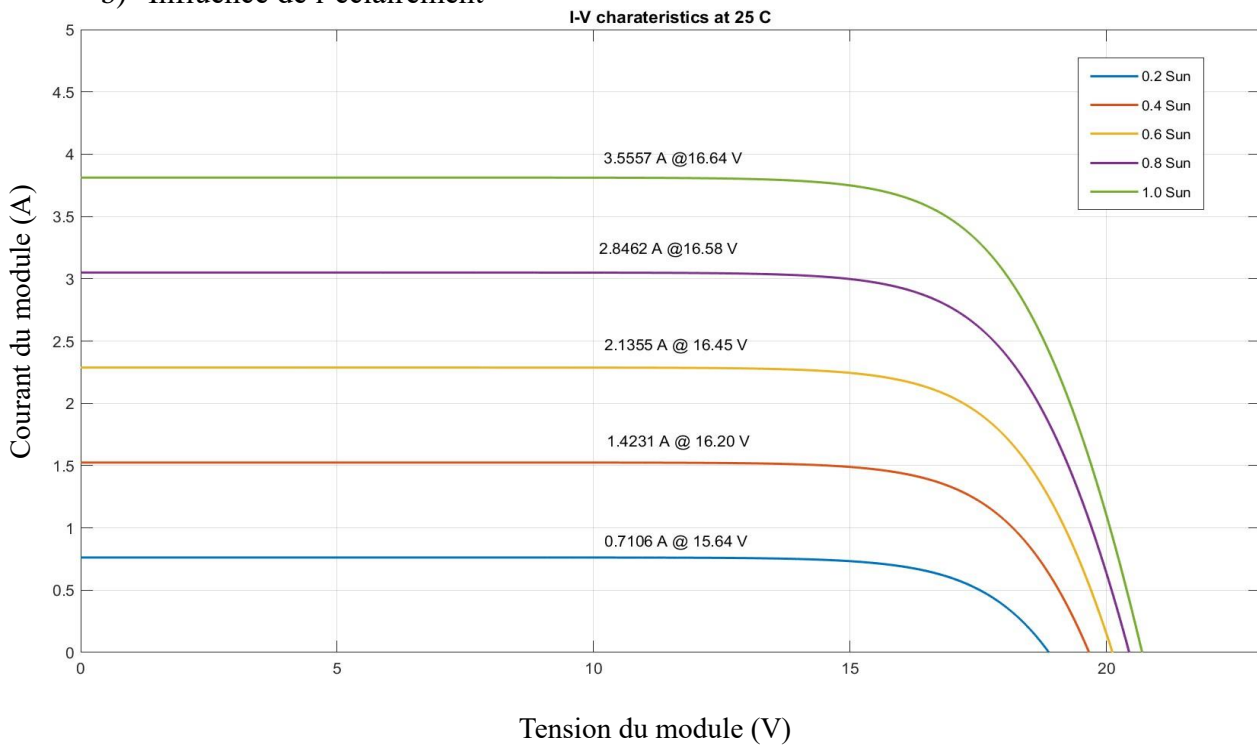


Figure II.15 – Caractéristique $I-V$ du module MSX60 pour différentes valeurs d'éclairement.

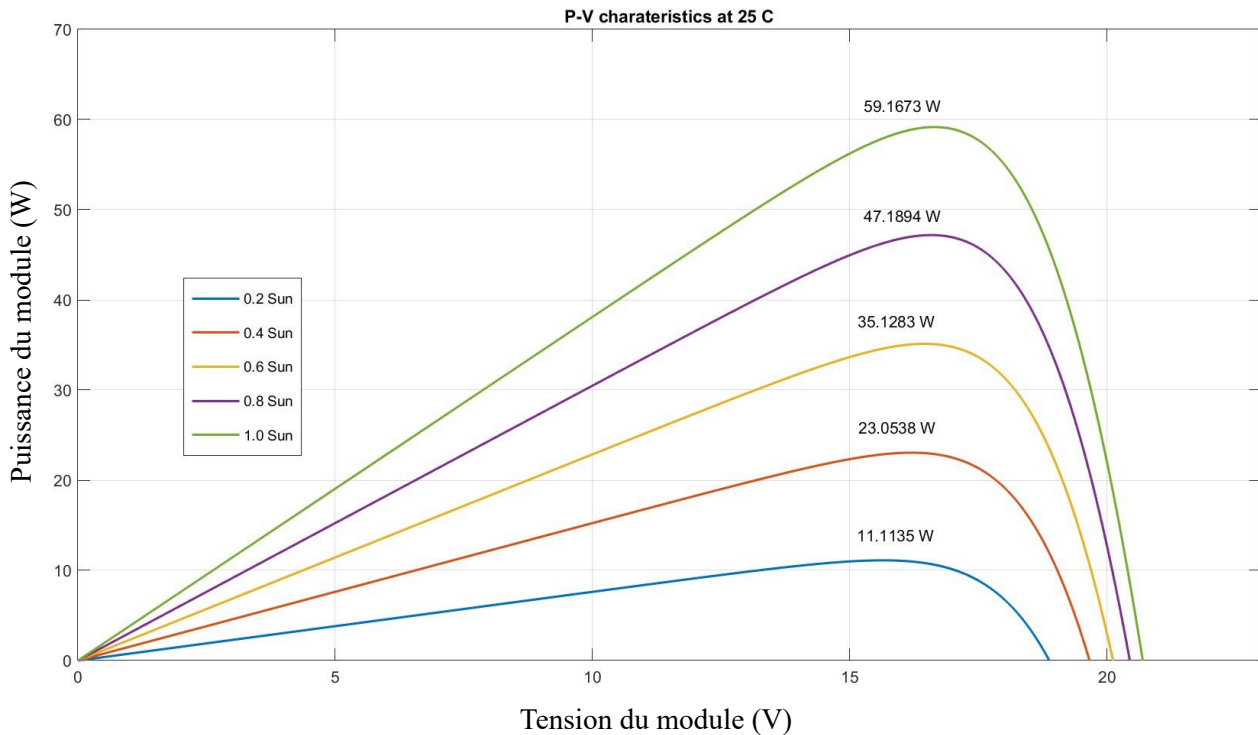


Figure II.16– Caractéristique P – V du module MSX60 pour différentes valeurs d'éclairement.

❖ Discussion :

- Selon la figure II.15, on observe une forte variation du courant du module en fonction du changement de l'éclairement, tandis que la tension du module reste pratiquement constante. En d'autres termes, la valeur du courant de court-circuit est directement liée à l'intensité du rayonnement, tandis que la tension en circuit ouvert ne change pas dans les mêmes proportions, mais reste presque constante même à faible éclairage.
- Le module photovoltaïque fournit une puissance en fonction de l'irradiation qu'il reçoit, comme illustré dans la figure II.16. En effet, l'effet de l'éclairement n'est exprimé que par :
 - Le module photovoltaïque possède une puissance maximale qui est presque directement liée à l'éclairement.
 - La puissance maximale se situe à peu près à la même tension.

II.7 Conclusion :

Ce chapitre résume les différents modèles électriques et leur méthode d'installation, ainsi que les variations de courant et de tension selon chaque configuration. Il aborde également les composants associés au système photovoltaïque et l'impact de la température et du rayonnement solaire sur la puissance produite par la cellule.

**CHAPITER III : COMMANDE PAR MODE GLISSANT
D'ORDRE FRACTIONNAIRE**

III.1 Introduction :

Dans les systèmes à structure variable, la commande par mode glissant est une méthode de contrôle robuste qui permet à un système de commuter sa commande entre deux valeurs en fonction d'une surface de commutation préétablie. Ce mode de fonctionnement garantit la stabilité des trajectoires du système sur cette surface, ce qui rend le système insensible à certaines perturbations. Malgré son efficacité dans le traitement des non-linéarités, cette méthode a longtemps été restreinte par le phénomène de chattering, qui entraîne des oscillations indésirables autour de la surface de commutation. Différentes solutions ont été mises au point depuis les années 1980 afin de résoudre ce problème, ce qui rend la commande par modes glissants plus attrayante et adaptée à une grande variété de systèmes linéaires et non linéaires. La commande par mode glissant présente principalement des avantages tels que la stabilité et la résistance face à de grandes variations des paramètres du système, de l'entrée et des perturbations sur le système. En outre, sa souplesse en ce qui concerne la synthèse [5] [30] [31].

Le calcul fractionnaire permet d'étendre les opérations d'intégration et de différentiation à des ordres non entiers, ce qui permet une modélisation plus précise de nombreux systèmes physiques. L'introduction du calcul fractionnaire par Leibniz au 17^{ème} siècle permet de décrire plus précisément des phénomènes complexes tels que les systèmes thermiques et électrochimiques, Grâce à l'apparition de nouvelles techniques d'approximation et d'outils mathématiques, les régulateurs d'ordre fractionnaire tels que le $PI^\lambda D^\mu$ ont montré des résultats plus performants que les régulateurs classiques, notamment dans les domaines du contrôle automatique, du traitement du signal et des énergies renouvelables [32] [33].

III.2 Principe de la commande par mode glissant :

Le principe de mode de glissement consiste à forcer le système à atteindre une surface spécifique appelée surface de glissement en fonction des objectifs de commande. Cela entraîne une boucle fermée de la dynamique, après avoir atteint la surface, le système se déplace le long de cette surface jusqu'au point d'équilibre, comme illustré dans la figure [5] [31][34].

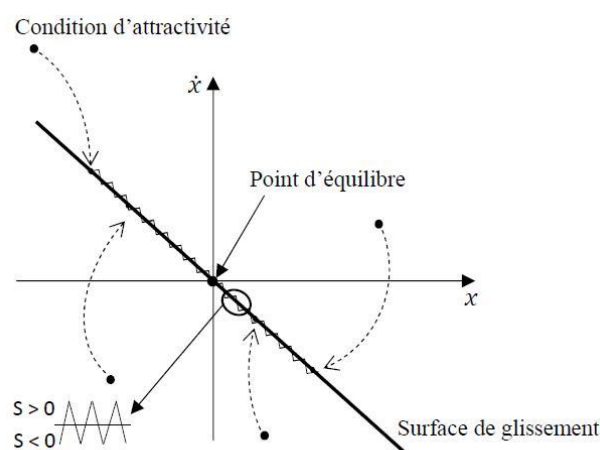


Figure (III.1) –Plans de phase en mode glissant.

III.3 Synthèse de la loi de commande par mode glissant :

Il y a trois étapes pour synthétiser la commande par mode glissant :

- Choix de la surface de glissement
- Etablir la condition de convergence
- Déterminer la loi de commande [5]

III.3.1 Choix de la surface de glissement :

Pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u + d(t) \\ y = x \end{cases} \quad (III.1)$$

Où $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in R^n$ est le vecteur d'état du système supposé mesurable. f Et g sont deux fonctions non linéaires. $d(t)$ Est une perturbation externe bornée, c.-à- d. $|d(t)| \leq D$. u et y sont respectivement l'entrée et la sortie du système. [5]

Remarque III.1 : Pour garantir la commandabilité du système, la fonction g doit être inversible, c.-à-d. $g(x, t) \neq 0, \forall t \in R, x \in R^n$.

Soit $x_d(t)$ la consigne désirée et $e(t)$ l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x - x_d(t) \quad (III.2)$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit :

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (III.3)$$

où λ est une constante positive. N est le degré relatif du système par rapport à la sortie $y(t)$. Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie par rapport au temps voir apparaître l'entrée u . [30]

III.3.2 Etablir la condition de convergence :

Il s'agit des conditions d'existence et de convergence qui permettent aux dynamiques du système de se rapprocher de la surface de glissement et de rester à cette surface indépendamment de la perturbation. Deux choses sont à prendre en compte pour le mode de convergence de l'état du système :

- 1) La fonction de Lyapunov $V = \frac{1}{2} s^2$
- 2) Afin de garantir l'attractivité de la surface $s(x, t) = 0$, il faut que la fonction \dot{v} Doit être définie négative, qui peut être traduit mathématiquement par :

$$\dot{v} = s\dot{s} < 0 \quad (III.4)$$

Cette condition signifie que les trajectoires du système convergent asymptotiquement vers la surface de glissement $s(t, x) = 0$ puis restent dans un voisinage de cette surface [34] [5].

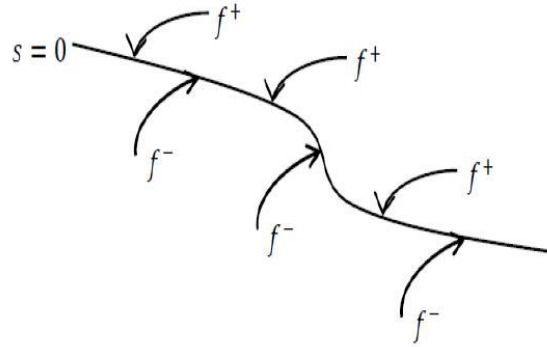


Figure (III.2) –Attractivité de la surface.

III.3.3 Détermination de la loi de commande :

Après avoir sélectionné la surface de glissement et vérifier la condition de convergence, une loi de commande est élaborée afin de garantir l’attraction des trajectoires d’état vers la surface de glissement. $S(x) = 0$.

La loi de commande en mode de glissement se compose de deux grandeurs : une première, appelée commande équivalente, calculée pour maintenir le régime glissant une fois atteint, et une deuxième, appelée commande discontinue, chargée de contraindre ces états à se diriger vers cette surface. Cette dernière est cruciale car elle permet d’éliminer les effets d’imprécision du modèle et de rejeter les perturbations.

La loi de commande est donnée par la relation suivante :

$$u = u_{eq} + u_n \tag{III.5}$$

Avec

u_{eq} : la commande équivalente

u_n : la commande discontinue

En régime glissant la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n’a pour but que de maintenir les conditions de glissement [32][35].

1470.1.1.1 Commande équivalente :

La commande équivalente est une fonction continue linéaire, peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que peut prendre u lors des commutations successives entre U^+ et U^-

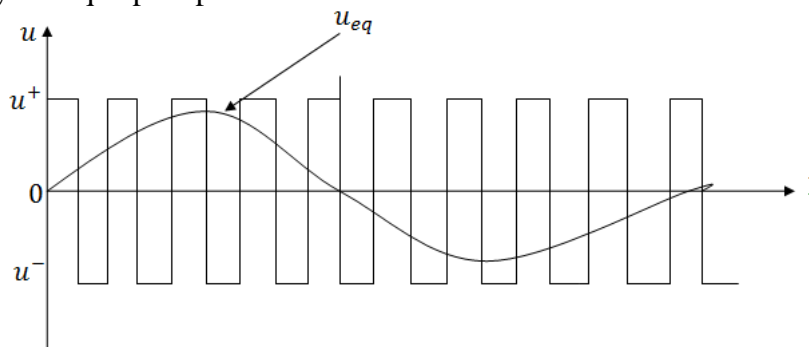


Figure (III.3) –la commande équivalente

Elle est déterminée en résolvant l’équation du comportement dynamique du système durant le mode de glissement $\dot{S}(x) = 0$

$$\dot{s} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \tag{III.6}$$

Alors \dot{s} s'écrit par :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) + g(x)u) = 0 \quad (\text{III.7})$$

De l'équation précédente on tire l'expression de u

$$u = u_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (\text{III.8})$$

Pour que la commande équivalente existe il faut que :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right) \neq 0 \quad (\text{III.9})$$

On exprime la dynamique du système sur la surface de glissement par :

$$\dot{x} = f(x) - g(x) \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} f(x)\right) \quad (\text{III.10})$$

On suppose que le système est en mode de glissement idéal, et la commande équivalente assure le maintien des trajectoires d'état sur ce mode. Cependant, en réalité, les effets des imprécisions du modèle ou des perturbations extérieures entraîneront la sortie de ces trajectoires de la surface. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser une commande discontinue dite à hautes fréquences pour compenser ces incertitudes [35][36].

III 3.3.2 Commande discontinue :

Pour maintenir la trajectoire d'état sur la surface de commutation et satisfaire la condition de convergence :

On remplace l'expression de u_{eq} dans (III.5) on obtient :

$$u = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + u_n \quad (\text{III.11})$$

On remplace l'expression de u dans l'expression de $\dot{s}(x)$ on obtient :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} \left(f(x) - g(x) \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + g(x)u_n \right) \quad (\text{III.12})$$

Après un bref calcul on aura

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n \quad (\text{III.13})$$

On a

$$\frac{\partial \dot{s}}{\partial u_n} = \frac{\partial s}{\partial x} g(x) \neq 0 \quad (\text{III.14})$$

Condition bien définie dans le choix de la surface de glissement pour assurer la commandabilité afin d'assurer la condition de l'attractivité :

$$\dot{s}(x) s(x) < 0 \Rightarrow s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n < 0 \quad (\text{III.15})$$

Il suffit que u_n soit de sign opposé à $s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est de la forme :

$$u_n = -K \text{sign}(s(x)) \quad (\text{III.16})$$

K : Gain positif

Signe (.) : la fonction signe

$$k \text{ sign}(s(x)) = \begin{cases} +K & \text{si } s(x) > 0 \\ 0 & \text{si } s(x) = 0 \\ -K & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

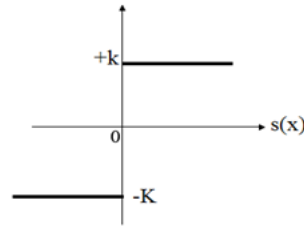


Figure (III.4) – la fonction signe

Par conséquent, la loi de commande par modes de glissement est donnée par la relation suivante :

$$u = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} f(x)\right) - K \operatorname{sign}(s(x)) \quad (\text{III.18})$$

D'autres expressions de la commande discontinue ont été proposées :

- 1- $u_n = a.\dot{e} + \gamma.\operatorname{sign}(s)$
- 2- $u_n = (a.|e| + \beta|\dot{e}| + \gamma).\operatorname{sign}(s)$

Remarque III.2 Cette démarche pour la détermination de la loi de commande est applicable pour les systèmes monos variables comme pour les systèmes multi variables. Pour ce dernier cas Le calcul de u_{eq} solution de $\dot{s}(x) = 0$ nécessite une partie de découplage afin d'obtenir m sous systèmes tel que $\dot{s}(x_i) = u_n$ (avec $i=1 \dots \dots M$) [36] [5].

III.4 Phénomène de broutement :

Une commande pouvant commuter à une fréquence infinie est nécessaire pour un régime glissant idéal. De cette manière, pendant le régime glissant, les interruptions appliquées à la commande peuvent provoquer un phénomène de broutement, connu sous le nom « chattering » en anglais. Cette situation se distingue par des variations significatives des trajectoires du système autour de la surface de glissement (figure (III.5) [30][31].

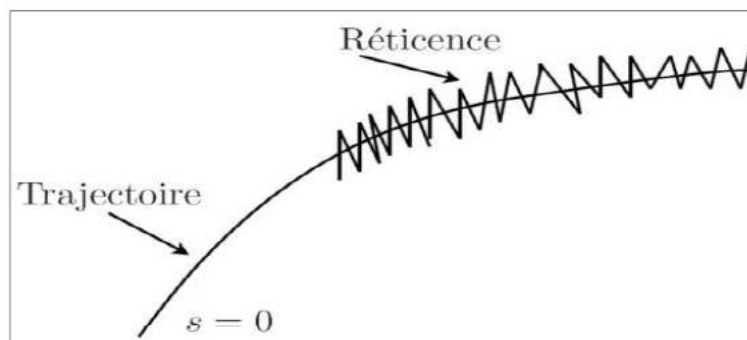


Figure (III.5) – Phénomène de broutement.

La précision de la commande est altérée par ces commutations, ce qui peut être préjudiciable à l'organe de commande en entraînant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une augmentation de la température dans les systèmes électriques (perte d'énergie importante).

De nos jours, de nombreuses approches ont été mises au point pour éliminer ou au moins diminuer ce phénomène.

- 1) Remplacer la fonction signe ($s(x)$) par des fonctions sigmoïdes qui sont lisses telle que les fonction $\frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{s}{w}\right)$, $\tanh\left(\frac{s}{w}\right)$ ect
- 2) Remplacer la fonction signe ($s(x)$) par des fonctions saturation représentée par la figure (III.6)

$$\text{sat}\left(\frac{s}{w}\right) = \begin{cases} \frac{s}{w} & \text{si } |s| \leq w \\ \text{sign}(s) & \text{si } |s| > w \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

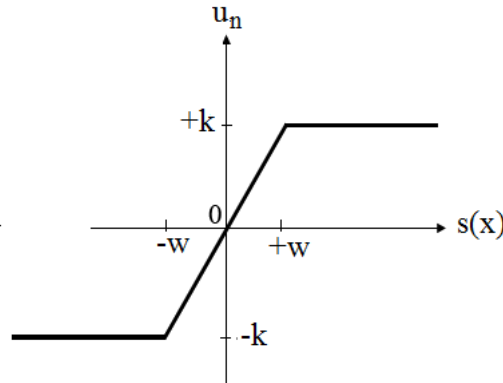


Figure (III.6) –la fonction saturation

L'épaisseur du voisinage de la surface où les composantes hautes fréquences sont filtrées est représentée par w . Lorsque le seuil w est élevé, il y a moins de commutation, mais la précision diminue. De cette manière, la création d'une méthode basée sur les modes glissants demande un compromis entre la robustesse et les performances.

- 3) Utiliser des commandes à gain décroissant définies par $u = -K |s|^a \text{signe}(s)$ où la commande diminue en amplitude à mesure que l'on s'approche de la surface de glissement. Aussi pour cette méthode la précision, la robustesse et le temps de réponse sont dégradés.[13]
- 4) Les modes glissants d'ordre supérieur : Dans les années 80, [Levantovsky] et [Emelyanuv] ont introduit cette méthode récente qui consiste à introduire de nouvelles dynamiques dans la commande, ce qui permet de déplacer le problème de discontinuité lié à l'élément de commutation vers les dérivées d'ordre supérieur de la commande, Dans ce cas on contraint le système à évoluer sur la surface $s(t) = 0$ et maintenir ses $(P - 1)$ premières dérivées successives à zéro $s = \dot{s} = \ddot{s} = \dots = s^{(p-1)} = 0$ où p désigne l'ordre du mode glissant et il fixe le degré de douceur du système, il est choisi supérieur ou égal au degré relatif de système [13].

Cette méthode extrêmement performante offre les bénéfices suivants :

- Maintien des qualités de robustesse et de précision telles que définies dans la loi de commande glissante d'ordre 1.
- Supprimer la 36ticence.
- Optimisation des résultats de la commande.

Toutefois, l'un des principaux inconvénients de l'application des algorithmes glissants est que le nombre d'informations requis augmente en fonction de l'ordre du régime glissant [35] [36].

III.5 Définition du calcul fractionnaire :

Dans le domaine du calcul fractionnaire, on étudie et on applique les intégrales et les dérivées d'ordre non entier. En Automatique, le calcul fractionnaire est également employé, en particulier pour la modélisation des systèmes dont le comportement peut être contrôlé par des équations différentielles d'ordre fractionnaire, ainsi que pour la synthèse des systèmes de commande [32].

III.6 Fonction GAMMA :

La fonction Gamma d'Euler est l'une des fonctions de base utilisées dans le calcul fractionnaire. Elle est simplement interprétée comme la généralisation du factoriel $n (n !)$ et elle permet à n de prendre des valeurs non entières. La fonction Gamma est définie comme suit :

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt \quad z > 0 \quad (\text{III.20})$$

Elle est plus souvent utilisée même si elle est restreinte aux valeurs positives de z .

L'intégration par partie de (III.20) conduit à la relation de récurrence suivante [32] [38] :

$$\Gamma(z + 1) = z\Gamma(z) \quad (\text{III.21})$$

Puisque $\Gamma(1) = 1$, en utilisant la relation (III.21), nous obtenons pour $z = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$\Gamma(2) = 1 \quad \Gamma(2) = 1 ! \quad \Gamma(3) = 2 \quad \Gamma(3) = 2 !$$

$$\Gamma(4) = 6 \quad \Gamma(4) = 3 ! \quad \Gamma(n+1) = n \cdot \Gamma(n) = n \cdot (n-1) ! = n !$$

[37][29]

III.7 Fonction de Mittag-Leffler :

La fonction de Mittag-Leffler joue un rôle essentiel dans le calcul fractionnaire, comparable à celui d'une fonction exponentielle dans le calcul entier.

La définition de cette fonction est donnée par :

$$E_a(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(ak+1)} \quad (a > 0) \quad (\text{III.22})$$

La fonction exponentielle usuelle correspond à une valeur de $a = 1$ [34][39].

III.8 Opérateurs d'ordre non entier :

Les opérateurs d'ordre non entier seront exposés dans ce paragraphe : l'opérateur du calcul d'intégration d'ordre non entier et l'opérateur de la différenciation d'ordre non entier.

Il y a diverses définitions dans la littérature, nous en mentionnons quelques-unes, en tenant compte que les deux sont vraies.

Les plus couramment employées sont celles de Riemann-Liouville et de Caputo [38].

III.8.1 Intégration d'ordre non entier :

Soit une fonction réelle $f(t)$, de la variable réelle t , continue et intégrable sur $[0, +\infty [$,

L'intégration répétée k fois de la fonction $f(t)$, notée $I^k f(t)$ s'exprime par la formule de Cauchy suivante :

$$\int_{t_0}^t dt_n \int_{t_0}^{t_n} dt_{n-1} \dots \int_{t_0}^{t_1} dt_1 f(t) = \frac{1}{(k-1)!} \int_{t_0}^t (t - \tau)^{(k-1)} f(\tau) d\tau \tag{III.23}$$

k : doit être un nombre entier positif à cause de l'utilisation de la fonction factorielle qui n'a de sens que pour les valeurs positives entières.

Pour généraliser la formule de Cauchy à un nombre réel positif ($a \in \mathcal{R}_+$), Riemann a proposé de remplacer la fonction factorielle par la fonction Gamma définie comme suit :

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \tag{III.24}$$

Avec $\Gamma(1) = 1$ et $\Gamma(0_+) = +\infty$

On obtient alors la fonction d'intégration sous cette forme

$$I^a f(t) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_{t_0}^t (t - \tau)^{(a-1)} f(\tau) d\tau \tag{III.25}$$

L'intégrale unilatérale d'ordre réel (III.24) est appelée l'intégrale de Riemann Liouville car Liouville a aussi proposé la même définition mais en remplaçant la borne inférieure d'intégration par $(-\infty)$, dans ce cas l'intégration est dite bilatérale Pour $f=1$ on aura l'expression de l'intégration classique

$$I^1 f(t) = \frac{1}{\Gamma(1)} \int_{t_0}^t (t - \tau)^{(1-1)} f(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau \tag{III.26}$$

L'équation (III.25) peut être réécrite sous la forme d'un produit de convolution

$$I^a f(t) = p_a(t) \otimes f(t) \tag{III.27}$$

Avec \otimes produit de convolution

$$p_a(t) = \frac{t^{a-1}}{\Gamma(a)} \text{ Fonction causale nommée par Oustaloup facteur d'oubli}$$

Si l'intégration classique de la fonction $f(t)$ correspond à l'aire délimitée par la fonction $f(t)$ et l'axe des abscisses sur l'intervalle $[t_0, t]$, en attribuant à toute valeur de $f(t)$ le même poids. La valeur de l'intégration d'ordre non entier peut alors être interprétée comme l'aire délimitée par la fonction $f(t)$ pondérée par le facteur d'oubli Figure (III.9) et l'axe des abscisses, sa valeur en un point t est plus influencée par les points de son voisinage que par les points plus éloignés, ainsi les valeurs les plus récentes ayant plus de poids que les anciennes.

Cette prise en compte du passé montre bien l'aptitude naturelle de cet opérateur à décrire les phénomènes à mémoire longue [35][39].

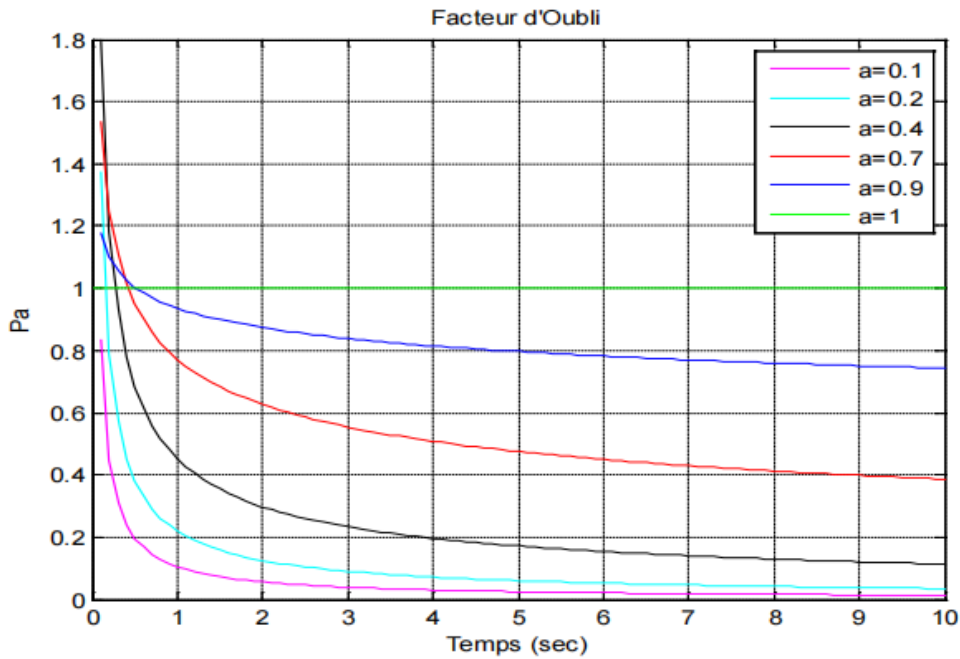


Figure (III.7) –variation du facteur d'Oubli pour différentes valeurs de l'ordre de dérivation a

1470.1.1.1 **quelque propriété d'Intégration d'ordre non entier :**

L'intégration d'ordre non entier présente les mêmes propriétés connues pour l'intégration classique

1- Intégration à un ordre $\alpha = 0$ est l'opérateur identité.

$$I^0 f(t) = f(t) \tag{III.28}$$

2- L'opérateur d'intégration fractionnaire vérifie la propriété du semi groupe

$$I_{t_0}^a I_{t_0}^b = I_{t_0}^{a+b} \quad a, b \in R_+ \text{ Qui implique la propriété de commutativité}$$

$$I^a I^b = I^b I^a \tag{III.29}$$

III.9 Dérivation non entière au sens de Riemann-Liouville :

C'est la définition la plus connue et la plus répandue, elle est obtenue en deux étapes :

1470- Intégrer d'abord la fonction $f(t)$ à l'ordre non entier

1470- Dériver le résultat ainsi obtenu à l'ordre entier $(n - \alpha)$.

Son expression mathématique est donnée par :

$${}^{RL}D_t^a f(t) = \frac{d^n}{dt^n} \left\{ \frac{1}{\Gamma(n-a)} \int_{t_0}^t (t-\tau)^{(n-a-1)} f(\tau) d\tau \right\} \tag{III.30}$$

$${}^{RL}D_t^a f(t) = \frac{d^n}{dt^n} \{ I_{t_0}^{n-a} f(t) \} \tag{III.31}$$

Avec $(n-1) < a < n$

${}^{RL}D_t^a f(t)$ Cette notation symbolise la dérivée d'ordre non entier a par rapport au temps de la fonction $f(t)$ selon la définition de Riemann-Liouville dans l'intervalle du temps $[t_0, t]$ [32][39]

Exemple d'illustration

On considère la dérivation à l'ordre ($a = 2.3$) d'une fonction $f(t)$ au moyen de la définition (III.29).

On utilise l'inégalité $a - 1 < a < n$ pour calculer l'entier positif n . Soit $n= 3$ On fait l'intégration de $f(t)$ à l'ordre ($n-a= 0.7$) ensuite la dérivation de la fonction résultante ($f^{(0.7)}(t)$) à l'ordre ($a= 3$) [34].

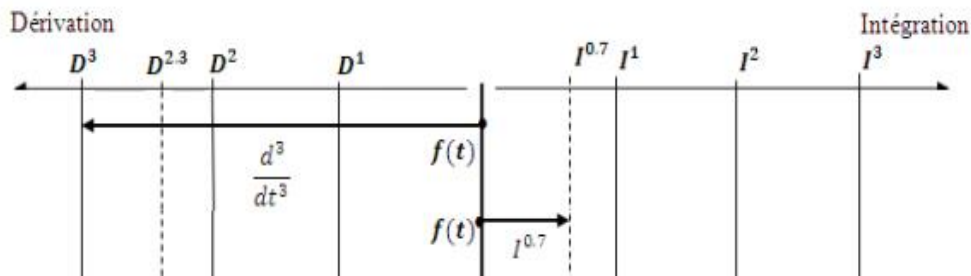


Figure (III.8) –illustration de la dérivation au sens de Riemann-Liouville

Remarque III.3 Lorsque la fonction à dériver est une constante Dans le cas de la définition de Riemann-Liouville

$$D_t^a C = \frac{C(t-t_0)^{-a}}{\Gamma(1-a)}, \text{ est une fonction non nulle dépendante du temps}$$

III.10 Quelques Propriétés de dérivées non entières :

Certaines propriétés des dérivées et intégrales fractionnaires sont :

- 1) Si $f(z)$ est une fonction analytique en z , alors sa dérivée fractionnaire ${}^{RL}D_z^a f(z)$ est une fonction analytique en z et a
- 2) Pour $\alpha=n$ où n est un nombre entier, l'opérateur ${}^{RL}D_z^a$ produit le même résultat que la dérivation classique d'ordre entier.
- 3) Pour $\alpha=0$ l'opérateur ${}^{RL}D_z^a$: est l'opérateur identité

$${}^{RL}D_z^a f(z) = f(z)$$

III.11 Transformée de Laplace de la dérivée fractionnaire :

La transformée de Laplace est fréquemment employée comme un moyen de résoudre les problèmes rencontrés en ingénierie. Nous présenterons dans ce paragraphe les modifications des opérateurs d'intégration et de dérivation d'ordre non entier définis précédemment.[33]

III.11.1 Transformée de Laplace de l'intégrale non entière:

La transformée de Laplace de l'opérateur d'intégration non entier défini par (III.25) est donnée par :

$$\mathcal{L}\{I_t^a f(t)\} = \frac{f(s)}{s^a}, a > 0 \quad (III.32)$$

Où s représente la variable de Laplace et $(n-1) < a < n$ [32]

III.11.2 Transformée de Laplace de la dérivée non entière :

Au sens de Riemann-Liouville

$$\mathcal{L}\{{}^{RL}D_t^a f(t)\} = s^a f(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k [{}^{RL}D_t^{a-1-k} f(t)]_{t=0} \quad (III.33)$$

Les conditions initiales apparaissant dans (III.33) sont données en fonction d'une dérivée entière évaluée à l'origine

Au sens de Caputo

$$\mathcal{L}\{{}^C D_t^a f(t)\} = s^a F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{a-k-1} f^{(k)}(0) \quad (III.34)$$

Remarque III.4 : Les transformées de Laplace des dérivées d'ordre non entier de Riemann-Liouville et de Caputo sont équivalentes si et seulement si le système est au repos pour $t < 0$ [39]. Elles se réduisent à:

$$\mathcal{L}\{{}^{RL}D_t^a f(t)\} = \mathcal{L}\{{}^C D_t^a f(t)\} = s^a F(s) \quad (III.35)$$

Remarque III.5 : La transformée de Laplace de la dérivée de Riemann-Liouville est bien connue. Mais son applicabilité en pratique est limitée à cause de l'absence d'interprétation physique des conditions initiales [39].

III.12 Commande d'ordre fractionnaire :

Le calcul fractionnaire a été largement utilisé dans la modélisation, la commande et l'observation des systèmes. Les dispositifs basés sur la diffusion d'une grandeur (champ, température, etc.) sont particulièrement intéressants pour être représentés par des systèmes d'ordre fractionnaire. Ils se rencontrent de plus en plus dans les divers domaines de recherche. Il a été démontré par Schmidt et Drumheller que le courant qui traverse un condensateur est inversement proportionnel à la dérivée non entière de la tension. Plusieurs schémas ont été suggérés dans le domaine de la commande, notamment la Commande

Robuste d'Ordre non entier (CRONE), le régulateur $PI^\lambda D^\mu$, qui est une extension du correcteur PID classique, avec une intégration fractionnaire d'ordre λ et une dérivation fractionnaire d'ordre μ , ainsi que la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire [34].

III.13 Conclusion :

Ce chapitre a introduit de nouvelles notions qu'il convient de récapituler. Dans un premier temps, nous avons présenté la commande par mode glissant et les étapes de construction de cette commande. Ensuite, nous avons exposé quelques concepts fondamentaux concernant le calcul et les opérateurs d'ordre fractionnaire, en soulignant leurs caractéristiques mathématiques. Nous avons ensuite expliqué la description des systèmes par modèles d'ordre fractionnaire.

**CHAPITRE IV : COMMANDE MPPT PAR MODE GLISSANT
D'ORDRE FRACTIONNAIRE D'UN SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUE**

IV.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant d'ordre fractionnel sur les systèmes photovoltaïques. L'intérêt de cette commande ne cesse d'augmenter en raison de sa simplicité d'élaboration et ses multiples applications dans l'automatique, ainsi que son efficacité. Qui a absorbé les vibrations du système résultant de l'instabilité des conditions extérieures contrôlant la cellule photovoltaïque.

IV.2 FOSMC pour le convertisseur Boost :

Depuis le schéma de figure II.12 on a les équations d'espace d'état lorsque le MOSFET est en état ON est représentées par :

$$\begin{cases} \dot{I}_L = \frac{1}{L} (V_e) \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Et, lorsque MOSFET est en état OFF :

$$\begin{cases} \dot{I}_L = \frac{1}{L} (V_e - V_s) \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C} \left(I_L - \frac{V_s}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Le choix de la tension de sortie (V_s) et du courant de l'inducteur (I_L) comme variables d'état du système, telles que :

$$\begin{aligned} x_1 &= I_L \\ x_2 &= V_s \end{aligned} \quad (\text{IV.3})$$

Conduit à un modèle d'espace d'état décrivant le système comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{(V_e - x_2)}{L} + \frac{x_2}{L} u \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C} \left(x_1 - \frac{x_2}{R} - \frac{x_1}{C} \right) u \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

Lorsque les deux équations suivantes sont prises en considération pour simplifier les calculs :

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{(V_e - x_2)}{L}, \quad b_1(x) = \frac{x_2}{L} \\ f_2(x) &= \frac{1}{C} \left(x_1 - \frac{x_2}{R} \right), \quad b_2(x) = \frac{-x_1}{C} \end{aligned}$$

IV.2.1 La Commande $u(t)$:

Calcul du commande $u(t)$ est donné par l'équation suivante :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n \quad (IV.5)$$

u_{eq} : la commande équivalente

u_n : la commande discontinue

- **Le courant désiré x_{1d} :**

Le courant désiré x_{1d} Donné par l'équation suivante :

$$x_{1d} = \frac{V_s^2}{RV_e} \quad (IV.6)$$

IV.3 Choix de la surface de glissement :

Pour le convertisseur de boost présenté par l'équation (III.4), nous proposons la surface de glissement suivante basée sur l'intégrateur d'ordre fractionnel :

$$S(t) = \lambda D_t^{-\alpha} e(t) \quad (IV.7)$$

Où l'erreur $e(t) = I_L - \left(\frac{V_s^2}{RV_e}\right)$, λ est une constante positive, et $1 < \alpha < 0$

Nous différenciant l'équation $S(t)$ pour obtenir l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq}(t) = \frac{-1}{V_s} L \left(\frac{V_e - V_s}{L} \right) - \dot{x}_{1d}(t) \quad (IV.8)$$

L'expression la commande discontinue est la suivante :

$$u_n = KD_t^\alpha (\text{sign}(S)) \quad (IV.9)$$

Ensuite, la commande globale est donnée par :

$$u(t) = \frac{-1}{V_s} L \left(\left(\frac{V_e - V_s}{L} \right) - \dot{x}_{1d}(t) \right) + KD_t^\alpha (\text{sign}(S)) \quad (IV.10)$$

La figure suivante montre le schéma fonctionnel du FOSMC proposé pour le convertisseur Boost DC-DC.

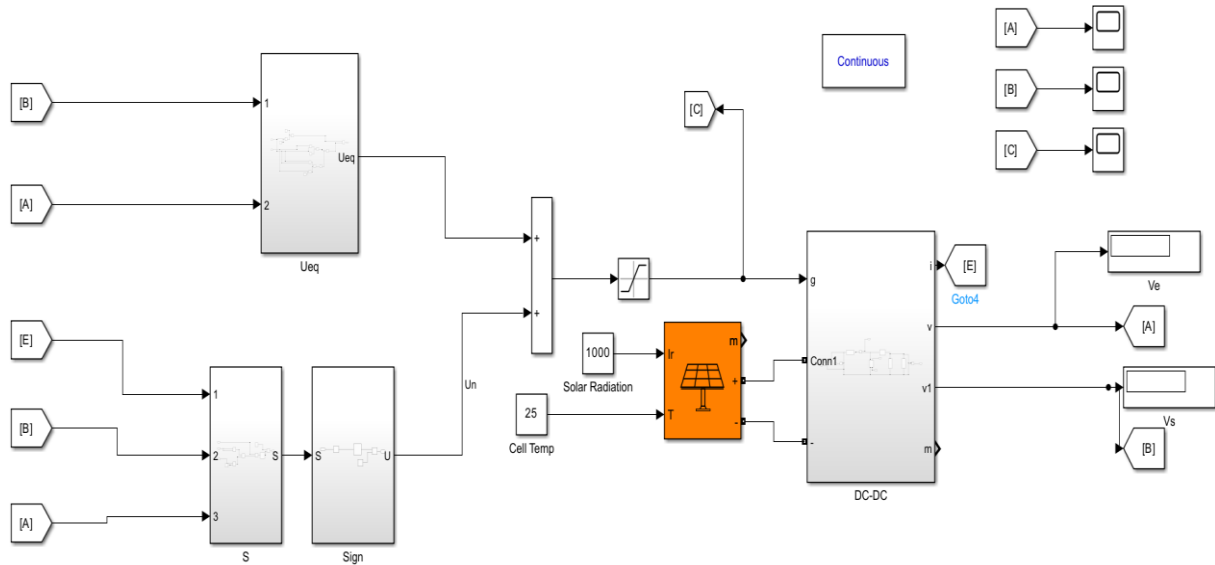


Figure IV.1 – Le schéma fonctionnel du FOSMC proposé pour le convertisseur élévateur intégré dans un système photovoltaïque.

a) Choix d'ordre α :

La simulation de diagramme de fonction (figureIV-1) effectuée par Matlab Simulink dans différents cas avec des paramètres spécifiques qui sont résumés ci-dessous.

Paramètres de convertisseur : $L=0.2$ mH, $C=25$ μ F, $R=10\Omega$.

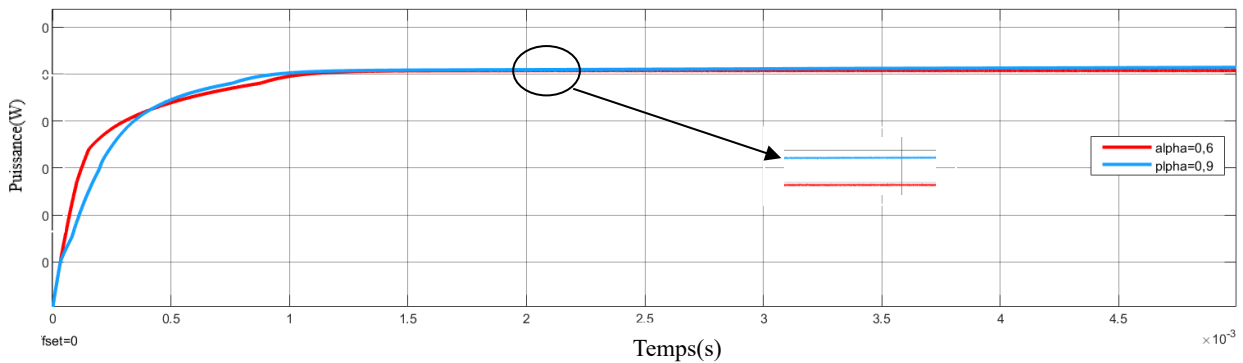
Paramètres de contrôleur : $\lambda=10$, $K=0.01$, $\alpha=$ variable.

Premier cas :

$\alpha = 0.6$

Deuxième cas :

$\alpha = 0.9$



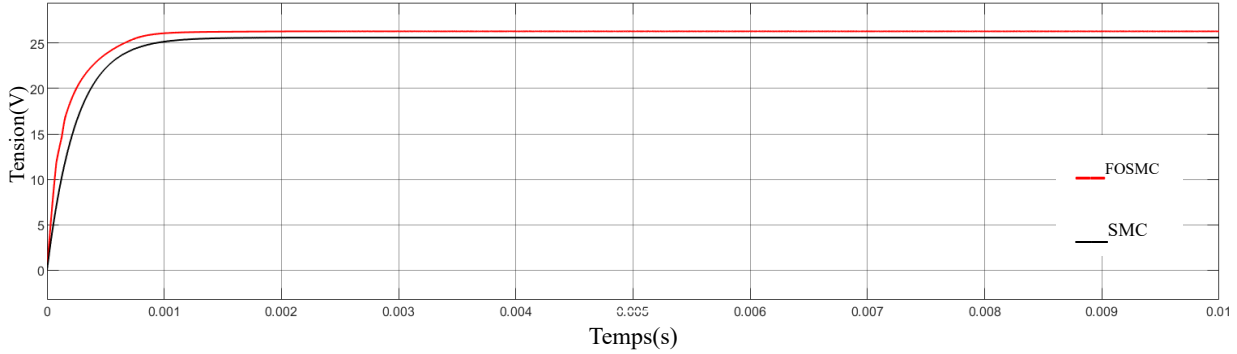
FigureIV.2—résultats de simulation pour différents α

❖ Interprétation des résultats:

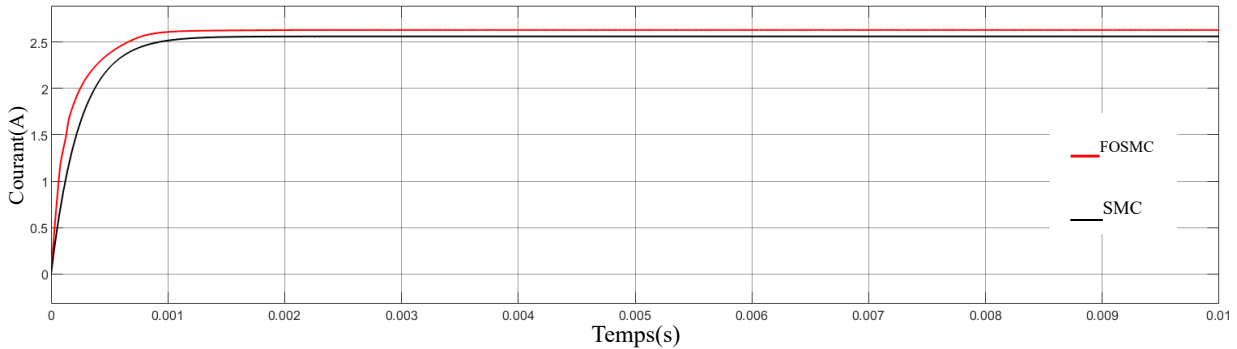
Cette simulation montre la différence entre $\alpha = 0,9$ et $\alpha = 0,6$ et son impact sur la puissance maximale. Nous observons que $\alpha = 0,9$ a donné de meilleures performances avec un temps plus rapide par rapport à $\alpha = 0,6$.

IV.4 La différence entre la commande SMC et FOSMC :

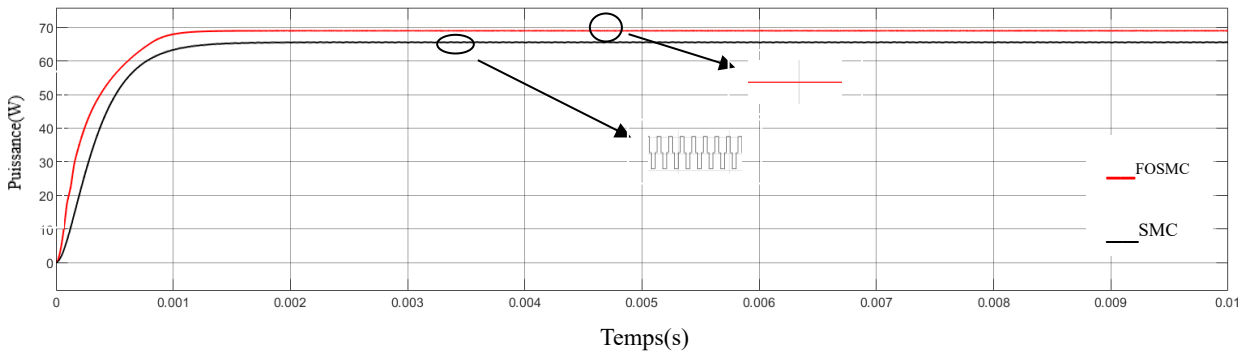
Pour les composants $C= 25\mu F$, $L= 0.2mH$, $R = 10\Omega$ et $\alpha =0,9$ une température $T=25^\circ C$, et l'éclairement : $G =1000W/m^2$. Pour les deux commandes. La comparaison se fera en termes de tension courant et puissance entre les deux systèmes.



FigureIV.3–La différence de tension entre SMC et FOSMC



FigureIV.4–La différence de courant entre SMC et FOSMC



FigureIV.5–La différence de puissance entre SMC et FOSMC

❖ Interprétation des résultats :

Nous remarquons que FOSMC dépasse SMC en termes de suivi de consigne, en particulier pour la tension et le courant de sortie, et par conséquent, la puissance dans FOSMC augmente de 6% par rapport à SMC. De plus, le système SMC souffre de vibrations

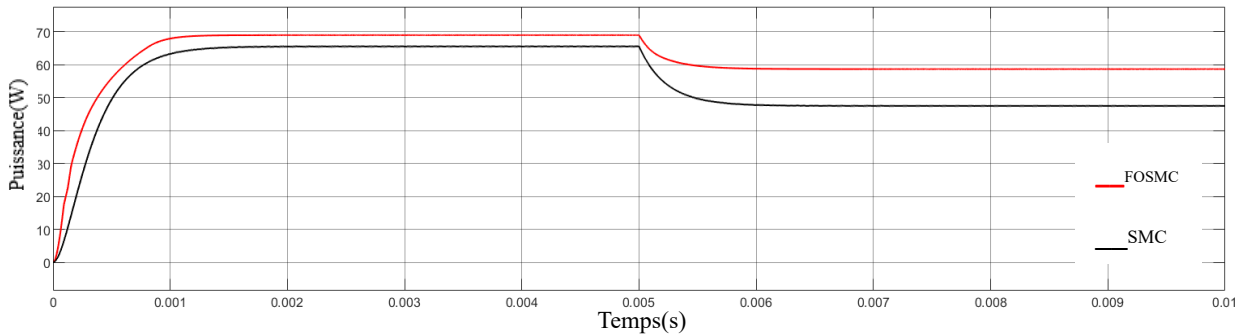
en raison d'une commande instable, tandis que FOSMC est efficace pour supprimer ces vibrations.

a) Influence de l'éclairement :

Pour les composants $C= 25\mu F$, $L= 0.2mH$ et $R = 10\Omega$, une température constante $T=25^{\circ}C$, et l'éclairement qui change :

$G = 1000W/m^2$ pour $t \in [0,0.005]$.

$G = 700W/m^2$ pour $t \in [0.005,0.01]$.



FigureIV.6–L'impact de la puissance lors du changement du rayonnement solaire pour SMC et FOSMC

❖ Interprétation des résultats :

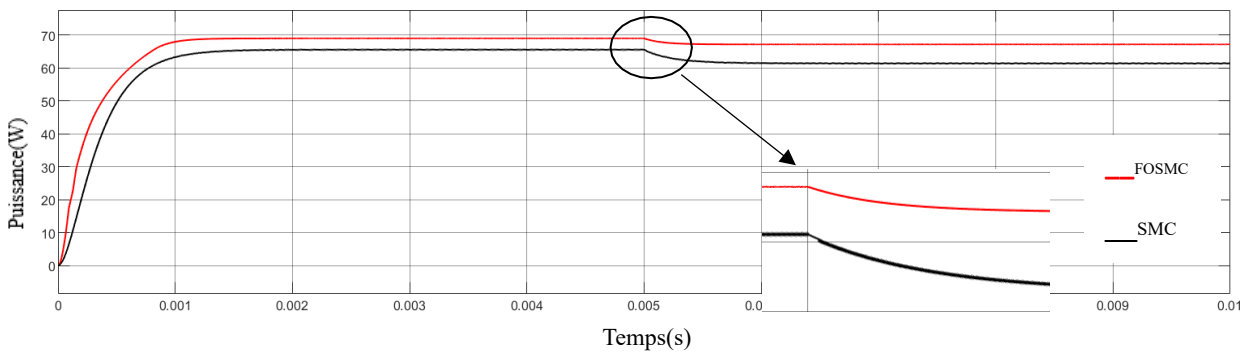
Nous remarquons que les deux systèmes répondent presque simultanément, mais le changement dans le rayonnement solaire a un effet différent sur chacun d'eux. Pour SMC, le taux de diminution avoisine les 27%, tandis que pour FOSMC, il est d'environ 17%, ce qui augmente l'efficacité de FOSMC dans la commande malgré les variations soudaines des facteurs externes.

b) Influence de la température :

Pour les composants $C= 25\mu F$, $L= 0.2mH$ et $R = 10\Omega$, l'éclairement constante $G=1000W/m^2$, et la température qui change :

$T=25^{\circ}C$ pour $t \in [0, 0.005]$,

$T= 35^{\circ}C$ pour $t \in [0.005, 0.01]$.



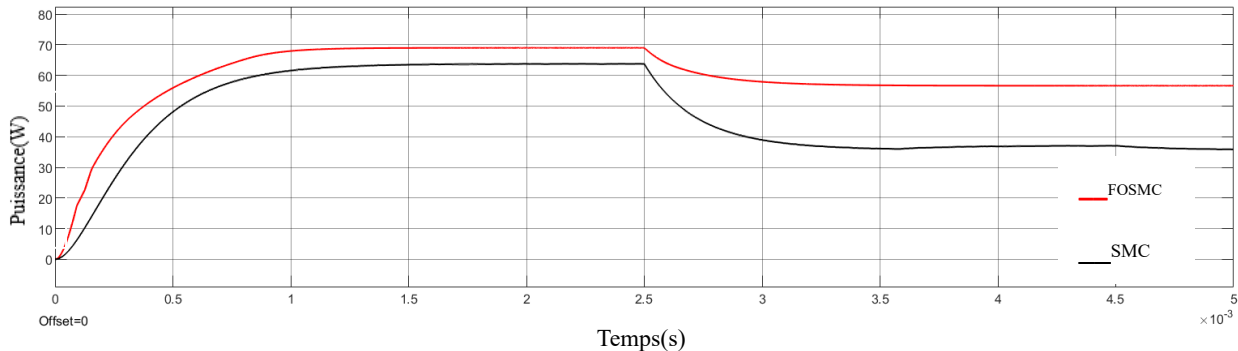
FigureIV.7–L'impact de la puissance lors du changement de la température pour SMC et FOSMC

Interprétation des résultats :

En regardant la courbe, nous remarquons que l'influence de la température est légère par rapport à celle du rayonnement solaire. Nous observons également que le SMC est affecté de manière significative par rapport au FOSMC.

c) Influence de la résistons R :

Pour les composants $C = 25\mu F$, $L = 0.2mH$, l'éclairement $G = 1000W/m^2$, température $T = 25^\circ C$, et la résistons qui change : $R = 10\Omega$ pour $t \in [0, 0.002]$, $R = 5\Omega$ pour $t \in [0.002, 0.004]$.



FigureIV.8–L'impact de la puissance lors du changement du résistance pour SMC et FOSMC

Interprétation des résultats :

On remarque que l'influence de la variation de la résistance du convertisseur Boost sur la commande SMC est plus importante que sur la commande FOSMC. En effet la commande FOSMC rejoint sa trajectoire dans un temps plus rapide que la commande SMC et sans oscillations ni dépassement ce qui montre la forte robustesse de la commande FOSMC par rapport à la commande SMC vis-à-vis des variations des paramètres internes du système étudié (Boost et système pv).

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire FOSMC sur un générateur photovoltaïque. Cette commande a été faite au niveau du convertisseur Boost afin d'extraire le maximum de puissance et d'améliorer les performances du système à savoir un bon suivi de consigne, un bon rejet de perturbations et une robustesse vis-à-vis des variations de paramètres. Cette commande a été comparée avec la commande par mode glissant SMC en utilisant les simulations par MATLAB SIMULINK.

Les résultats de simulations obtenus ont montré que la commande FOSMC est efficace par rapport à la commande SMC, qui présente des réponses sans oscillations et avec une réponse rapide aux changements des paramètres extérieurs comme la température et l'éclairement et des paramètres intérieurs du systèmes comme la résistance du convertisseur Boost, ce qui implique un bon rejet de perturbation et une robustesse de cette commande.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous sommes intéressés à la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire qui nous permette d'extraire le maximum de l'énergie solaire à partir des panneaux solaires, cette commande qui connue pour sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations extérieures, ainsi que son adaptation aux convertisseurs électriques qui présentent un mode de fonctionnement discontinu.

Pour ceci, le premier chapitre a été consacré aux notions de base de production de l'électricité à partir du soleil, avec les technologies existantes et les plus utiles, ainsi les influences importantes sur la production d'énergie, finalement les différents types d'installation des panneaux solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque et les différents modèles électriques disponibles, ainsi que l'analyse des courbes caractéristiques (P-V) et (I-V) de la cellule photovoltaïque. Nous avons abordé le modèle mathématique du générateur photovoltaïque, les différentes configurations de montage et les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et les diverses méthodes de commande. De plus, nous avons examiné le convertisseur DC-DC de type boost et ses caractéristiques spécifiques.

En outre, nous avons simulé un générateur photovoltaïque de type MSX60 pour déterminer ses caractéristiques électriques et vérifier les performances attendues des modèles mathématiques et théoriques discutés. Cette simulation offre une perspective pratique utile sur la manière dont les différents composants interagissent au sein d'un système photovoltaïque intégré, renforçant ainsi notre compréhension théorique et fournissant une base solide pour la recherche et le développement dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque.

Et pour le troisième chapitre Avant d'entamer l'application de la commande fractionnaire par mode glissant nous avons expliqué le principe de la commande par mode glissant et les étapes de la synthèse. Ainsi que le phénomène de chattering et les solutions pour le réduire.

Ensuite les notions des opérations fractionnaires avec des dérivées et des intégrales fractionnaires et les fonctions les plus utilisées Gamma et Fonction de Mittag-Leffler.

Dans le dernier chapitre, nous avons exploré l'application de la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire (FOSMC) dans les systèmes photovoltaïques, avec un accent particulier sur le convertisseur DC-DC de type boost. Nous avons détaillé le processus d'extraction de l'équation de commande U et simulé son application pour analyser ses performances dans le système.

À travers cette étude, nous avons comparé les réponses du système sous la commande FOSMC avec celles obtenues sous la commande par mode glissant classique (SMC). Les résultats de la simulation ont montré les avantages potentiels de la commande FOSMC en termes de robustesse et d'efficacité dans le suivi du point de puissance maximale et la régulation de la tension de sortie du convertisseur boost.

Ainsi, cette analyse approfondie démontre que la commande FOSMC peut offrir des améliorations significatives par rapport à la SMC traditionnelle, ouvrant des perspectives prometteuses pour l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques. Ce chapitre

jette les bases pour des recherches futures sur l'implémentation et l'optimisation de techniques de commande avancées dans les systèmes d'énergie renouvelable.

Perspectives pour de futurs travaux :

Comme suite à notre travail, nous pouvons dresser une liste de quelques travaux que nous avons jugés intéressants à développer :

- Faire une étude expérimentale sur cette commande.
- Comparer cette commande avec d'autres commandes telles que la commande de glissement d'ordre supérieur et en particulier par supertwisting...etc.
- Étudier l'intégration de la commande par mode glissante d'ordre fractionnaire avec d'autres sources d'énergie renouvelable, telles que l'éolien, pour créer des systèmes hybrides plus efficaces et résilients.
- Intégrer des techniques de commande avancées pour maximiser l'utilisation de l'Énergie stockée dans les batteries, en synchronisant la charge et la décharge avec la demande énergétique.

Bibliographies

[1] Abdellatif MAHAMMEDI, Contribution to the control of a Power Converter with Improved Topologies Associated with a Photovoltaic Generator Based on Advanced Techniques. Thèse de doctorat, Université Ziane Achour de Djelfa, 2020

[2] S. Diaf « Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2009.

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

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

[5] BOUCHAMA Messaoud, LAOUAR Mohammed Islam, Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques, Mémoire de Fin d'Études Pour l'obtention du diplôme Master en Automatique, Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel, 2018

[6] Edmond Becquerel ; « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires », 1839.

[7] R. Fillon, « Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe », Grenoble Alpes, 2016

[8] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de L'énergie pour les applications photovoltaïques », Université Paul Sabatier Toulouse III, 2009.

[9] Stambouli, A. Boudghene, Khiat, Z, Flazi, S, Kitamura, Y. A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues, Oran, 2012.

[10] S. Hadji. Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie photovoltaïque. Thèse de doctorat, Université de Sétif 1, 2018

[11] revue des energies renouvelables énergies photovoltaïque et éolienne Tlemcen, 20 22 décembre publication du centre de développement des énergies renouvelables, 2003

[12] A. Selman mohamed, M. Taibi, étude des panneaux solaires photovoltaïques, mémoire de licence, Anaba, 2021.

[13] Serhane Mouad, Merrouche Younes, (Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via double étages). Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en automatique, Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel, 2020.

- [14] Abdelhakim BELKAID, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome ». Thèse de doctorat en électrotechnique. Université ferhat abbas – sétife 1, algérie. 2015.
- [15] A. B. Arostegi, « New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency », Thèse Doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2013, pp. 167.
- [16] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.v
- [17] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque. Étude comparative » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.
- [18] M. Francisco and L. « Gonzalez Model of photovoltaic module in matlab », CIBELEC, 2005.
- [19] G. Walker, « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane, 2000.
- [20] M. Abdelmoula, « Phénomènes non linéaires et chaos dans les systèmes d'énergie renouvelable – Application à une installation photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2017.
- [21] B. Guemouni, R. Messahli, “application des différentes techniques de reconfiguration d'un générateur photovoltaïque sous un ombrage partiel”, université A.mira-bejaia, 2022.
- [22] A.Aziz, K.Kassmi, F. Olivier, G.Sarrabayrouse, A.Martinez «Analyse dans l'environnement Orcad-Pspice l'adaptation DC-DC des systèmes PV par des convertisseurs Boost fonctionnant à haute fréquence » rapport LAAS /CNRS N° 05267,19P Toulouse-France, Juin 2005.
- [23] Mr. OUARI Mondher et Mr. ZINE Yakoub, Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique, École nationale polytechnique, 2020.
- [24] N. Khaehintung, T. Wiangtong, and P. Sirisuk, “Fpga implementation of mppt using variable step-size p&o algorithm for pv applications,” in *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp. 212–215, IEEE, 2006.
- [25] J. H. Lee, H. Bae, and B. H. Cho, “Advanced incremental conductance mppt algorithm with a variable step size,” in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 603–607, IEEE, 2006.
- [26] M. Al-Dhaifallah, A. M. Nassef, H. Rezk, and K. S. Nisar, “Optimal parameter design of fractional order control based inc-mppt for pv system,” *Solar Energy*, vol. 159, pp. 650–664, 2018.
- [27] D. Boukhetala «Sliding Mode Control based On Fractional order Calculus for DC-DC Converters», *International Journal of Mathematical Modelling & Computations*, October 2015.

- [28] OUKACI Manel Dalila, ZAMIME Amina, Modélisation sur NI-MULTISIM et Cosimulation par LABVIEW des générateurs photovoltaïques, Mémoire de Fin d'Études, 2020.
- [29] site solar electric supply, inc. <https://www.solarelectricsupply.com/solarex-msx-60-w-junction-box>
- [30] N,Frédéric,Lois de commande par mode glissant d'un moteur pas a pas ,thèse pour obtenir le grade de Docteur spécialité automatique et informatique industrielle, l'université de science et technologie de Lille, 2006.
- [31] H. Malek, Control of Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Fractional Control of Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Fractional Order Operators, Utah state university, 2014.
- [32] Acharef , Fractal systems as represented by Sun, H.H., Tsao, Y.Y, and Onaral, B. 1470-singularity function. IEEE, Trans. Aut. Control 37 :1465 ,1992.
- [33]A.si amour, Contribution à la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, Thèse présentée en vue d'obtenir le grade de DOCTEUR Spécialité : Automatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [34] N. KAHIL, T. CHEKARI, Commande par Modes Glissants d'ordre Fractionnaire d'un Convertisseur DC/DC, Thèse pour obtenir le grade de Master en automatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [35] H.Saib , D.Kassouri, Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique, Thèse pour obtenir le grade de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou , 2018.
- [36]F, Belarbi, Régulation par mode glissant d'un variateur de vitesse MCC Hacheur, Thèse pour obtenir le grade de Master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2022
- [38] N. Bouarroudj ET all, Sliding Mode Control based On Fractional order Calculus for DC-DC Converter, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaia, Algeria, 2015.
- [39] N.Bouarroudj, Commande par mode de glissement d'ordre fractionnaire optimisé par métaheuristique .Application aux Systèmes Non Linéaires et Interconnectés . Thèse pour obtenir le grade de Magister en automatique de l'ENP, École nationale polytechnique, 2017.
- [40] www.solargis.com

Résumé :

L'énergie généralement est un grand défi en industrie mais l'Energie renouvelable est la solution parfaite pour moins des effets secondaires, l'un de ces énergies est l'énergie solaire qui est très utilisées en Algérie, Alors l'optimisation du transfert d'énergie dans la chaîne de production est vraiment nécessaire et intéressante pour que sera le rendement de cette source plus important que les frais de l'Equipment, l'installation et la maintenance.

Pour cela L'objectif de cette thèse est d'avoir une commande qui permet d'extraire le maximum de puissance d'énergie et qui assure la robustesse des systèmes malgré la présence des perturbations internes et externes.

La méthode que nous avons étudiée est la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire, cette méthode implique sur le MPPT qui maximise la puissance à partir de la commande appliquée au Convertisseurs DC/DC (Boost).

L'efficacité de cette commande proposée est vérifiée par simulation sous le logiciel Matlab/Simulink.

Les résultats sont satisfaisants et démontrent que la technique proposée est robuste vis-à-vis les changements brusques des conditions climatiques et de variation des paramètres internes du système étudié. Ils confirment aussi la rapidité et la précision de la méthode.

Les mot clé : Système photovoltaïque, MPPT, Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire, Convertisseurs DC/DC boost.

Abstract:

Energy is generally a major challenge in the industry, but renewable energy is the perfect solution for fewer side effects. One of these energies is solar energy, which is widely used in Algeria. Therefore, optimizing energy transfer in the production chain is really necessary and interesting so that the yield from this source is greater than the costs of equipment, installation, and maintenance.

The objective of this thesis is to have a control system that allows extracting the maximum power and ensures the robustness of the systems despite the presence of internal and external disturbances.

The method we have studied is fractional order sliding mode control. This method is applied to the MPPT, which maximizes power through control applied to DC/DC converters (Boost).

The effectiveness of this proposed control is verified through simulation using Matlab/Simulink software. The results are satisfactory and demonstrate that the proposed technique is robust against sudden changes in climatic conditions and variations in the internal parameters of the studied system. They also confirm the speed and accuracy of the method.

Keywords: Photovoltaic system, MPPT, Fractional-order sliding mode control, DC/DC boost converters.

ملخص :

الطاقة تشكل تحديًا كبيرًا في الصناعة بشكل عام، ولكن الطاقة المتجددة هي الحل الأمثل لتقليل الآثار الجانبية. إحدى هذه الطاقات هي الطاقة الشمسية التي تُستخدم على نطاق واسع في الجزائر. لذا، فإن تحسين نقل الطاقة في سلسلة الإنتاج هو أمر ضروري ومهم لكي يكون العائد من هذا المصدر أكبر من تكاليف المعدات والتركيب والصيانة.

هدف هذه الأطروحة هو الحصول على نظام تحكم يسمح باستخلاص أقصى قدر من الطاقة ويضمن متانة الأنظمة رغم وجود الاضطرابات الداخلية والخارجية.

الطريقة التي درسناها هي التحكم بطريقة الانزلاق ذات الرتبة الكسرية. هذه الطريقة تُطبق على نظام تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) الذي يعظم القدرة من خلال التحكم المطبق على محولات (DC/DC تعزير).

تم التحقق من فعالية هذا التحكم المقترح من خلال المحاكاة باستخدام برنامج Matlab/Simulink. كانت النتائج مرضية وتبين أن التقنية المقترحة قوية في مواجهة التغيرات المفاجئة في الظروف المناخية وتغيرات المعاملات الداخلية للنظام المدروس. كما تؤكد سرعة ودقة هذه الطريقة.

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئي , تقنيات التحكم MPPT , التحكم في الوضع المنزلق بدرجة الأعداد الحقيقية , المحول الطاقوي (تيار مستمر / تيار مستمر).