

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - Bordj Bou Arréridj  
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj

Faculté des sciences et la technologie

Département d'Electromécanique



Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

**Thème :**

Commande par mode glissant terminal d'un  
générateur photovoltaïque

*Soutenu le : 25/06/2022*

*Présenté par :*

*- Benmerzoug Mouloud.*

*- Bendjeddou Boudjema.*

*Devant le jury:*

<i>Prénom &amp; Nom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Abderrahim. Reffas</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Ziyad. Bouchama</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Abdelfetah. Khatir</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur 1</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Fatiha Ouabed</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur 2</i>	<i>Univ-BBA</i>

**Année Universitaire : 2021/2022**



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - Bordj Bou Arréridj



Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

**Thème :**

Commande par mode glissant terminal d'un  
générateur photovoltaïque

Présenté par :

- Benmerzoug Mouloud.

*Signature*

- Bendjeddou Boudjemaa.

*Signature*

Avis favorable de l'encadreur :

Dr : Bouchama Ziyad.

**Avis favorable du Président du Jury**

*Nom Prénom*

*Signature*

**Année Universitaire : 2021/2022**



The background of the page is a soft, artistic illustration of flowers. On the right side, there is a large, vibrant pink lily-like flower with yellow and orange accents. The rest of the background is filled with lighter, translucent pink and yellow floral shapes, creating a delicate and elegant atmosphere.

## *Dédicaces*

Nous dédions ce travail à toutes les personnes qui nous ont encouragés de près ou de loin pour achever cette mémoire.

A nos chers parents tout en

Nous inclinant pour leur témoigner nos remerciements et notre reconnaissance envers les sacrifices et le soutien moral qu'ils ont fourni pendant toute la durée de mes études.

A nos frères et toutes nos familles.

A notre encadreur, nos professeurs qui nous ont soutenu tout le long de nos études.

Et enfin à tous nos amis sans exception surtout tous nos collègues des études.

***Benmerzoug Mouloud.***

***&***

***Bendjeddou Boudjemaâ.***



## *Remerciement*

Nous remercions Dieu tout puissant Pour nous accorder la volonté et  
le courage réaliser ce mémoire.

Nous tenons à exprimer mon encadreur

**Dr : Bouchama Ziyad**

Patience et précieux conseils.

Nos remerciements à nos parents pour leur soutien.

Nous tenons aussi à remercier tous mes amis qui m'ont aidé  
de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

# Liste des Figures

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.

<b>Figure I.1:</b> Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.....	04
<b>Figure I.2:</b> conversion de l'énergie solaire en électricité.....	05
<b>Figure.I.3:</b> Les différents composants du rayonnement solaire.....	05
<b>Figure I.4 :</b> principe de transformation de l'énergie solaire à l'énergie électrique.....	06
<b>Figure I.5:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque.....	08
<b>Figure I.6:</b> Cellule, module et panneau photovoltaïque.....	09
<b>Figure I.7:</b> Module PV de $N_p$ branches parallèles et $N_s$ cellule en séries.....	10
<b>Figure I.8:</b> (a,b) Influence de l'éclairement et de la température sur $I= f(V)$ et $P=f(V)$ .....	12
<b>Figure I.9:</b> Schéma général d'un générateur photovoltaïque.....	14
<b>Figure.I.10:</b> Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	15
<b>Figure.I.11 :</b> Structure du champ photovoltaïque.....	16
<b>Figure I.12 :</b> Schéma du convertisseur DC-DC Boost.....	16
<b>Figure I.13:</b> Schéma structurel du système à commander.....	17
<b>Figure I.14 :</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, une commande MPPT et une charge.....	18
<b>Figure I.15 :</b> Principe de la commande MPPT.....	18
<b>Figure I.16 :</b> Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.....	19
<b>Figure I.17 :</b> Organigramme de l'algorithme P&O.....	20
<b>Figure.I.18 :</b> Principe de fonctionnement de l'algorithme IncCond.....	22
<b>Figure I.19 :</b> Organigramme de l'algorithme IncCond.....	22

## Chapitre II : Commande par Mode glissant terminal.

<b>Figure. II.1.</b> Schéma du circuit équivalent d'un convertisseur abaisseur avec éléments parasitiques.....	32
<b>Figure. II.2 :</b> Tension de sortie du convertisseur abaisseur pour $V_{ref}= 5V$ .....	34
<b>Figure. II.3 :</b> Tension de sortie du convertisseur abaisseur pour une variation de la tension de référence de 8 à 10 à 8 à 10 volts.....	35
<b>Figure. II.4 :</b> Courant inducteur du convertisseur abaisseur pour une variation de la tension de référence de 8 à 10 à 8 à 10 volts.....	35
<b>Figure. II.5 :</b> Tension de sortie et courant charge du convertisseur abaisseur pour une variation de charge de 6 à 3 à 6 à 3 à 6 ohms.....	36
<b>Figure. II.6 :</b> Evolution du courant inducteur du convertisseur abaisseur pour une variation de charge de 6 à 3 à 6 à 3 à 6 ohms.....	36

## CHABITRE III: Commande par mode glissant terminal d'un système PV.

<b>Figure : III.1.</b> Evolution de la puissance $P_{PV}$ du panneau.....	44
<b>Figure : III.2.</b> Evolution de la tension $V_{PV}$ du panneau.....	44
<b>Figure : III.3.</b> Evolution du courant $I_{PV}$ du panneau.....	45
<b>Figure : III.4.</b> Evolution de la tension de sortie $V_0$ .....	45
<b>Figure : III.5.</b> Variation de l'éclairement en fonction du temps.....	46
<b>Figure : III.6.</b> Caractéristiques du panneau PV.....	46
<b>Figure : III.7.</b> Evolution de la puissance $P_{PV}$ du panneau.....	47
<b>Figure : III.8.</b> Evolution de la tension $V_{PV}$ du panneau.....	47
<b>Figure : III.9.</b> Evolution du courant $I_{PV}$ du panneau.....	48
<b>Figure : III.10.</b> Evolution de la tension de sortie $V_0$ .....	48
<b>Figure : III.11.</b> Variation de la température en fonction du temps.....	49

<b>Figure : III.12.</b> Caractéristiques du panneau PV.....	49
<b>Figure : III.13.</b> Evolution de la puissance $P_{PV}$ du panneau.....	50
<b>Figure : III.14.</b> Evolution de la tension $V_{PV}$ du panneau.....	50
<b>Figure : III.15.</b> Evolution du courant $I_{PV}$ du panneau.....	51
<b>Figure : III.16.</b> Evolution de la tension de sortie $V_0$ .....	51
<b>Figure : III.17.</b> Variation de la température et de l'éclairement en fonction du temps.....	52
<b>Figure : III.18.</b> Caractéristiques du panneau PV.....	53
<b>Figure : III.19.</b> Evolution de la puissance $P_{PV}$ du panneau.....	53
<b>Figure : III.20.</b> Evolution de la tension $V_{PV}$ du panneau.....	54
<b>Figure : III.21.</b> Evolution du courant $I_{PV}$ du panneau.....	54
<b>Figure : III.22.</b> Evolution de la tension de sortie $V_0$ .....	55
<b>Figure : III.23.</b> Variation trapézoïdale de l'éclairement en fonction du temps.....	55
<b>Figure : III.24.</b> Caractéristiques du panneau PV.....	56
<b>Figure : III.25.</b> Evolution de la puissance $P_{PV}$ du panneau.....	57
<b>Figure : III.26.</b> Evolution de la tension $V_{PV}$ du panneau.....	57
<b>Figure : III.27.</b> Evolution du courant $I_{PV}$ du panneau.....	58
<b>Figure : III.28.</b> Evolution de la tension de sortie $V_0$ .....	58

# Liste des Tableaux

<b>Tableau .III.1</b> : Spécifications du système.....	43
--	----

# Liste des abréviations

**PV** : Photovoltaïque.

**GPV** : Générateur Photovoltaïque.

**DC** : Courant Continu.

**DC/DC** : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

**MPPT** : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'.

**PPM** : Point de Puissance Maximale.

**IncCond** : Incremental Conductance (Conductance Incrémentale).

**P&O** : Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

**SMC** : algorithme de contrôle

**PI** : Proportionnel Intégral.

**PN** : la jonction

**TSM** : mode glissant terminal.

**TSMC** : mode glissant terminal d'un convertisseur DC- DC.

**MOSFET** : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

**IGBT** : Insulated-gate bipolar transistor.

**CS** : convertisseur statique.

**TSM** : mode glissant terminal.

**FTSM** : mode glissant terminal rapide.

# Liste des symboles

$E$  : Énergie en  $J$ .

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

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

$\lambda$  : longueur d'onde souvent exprimée en micromètre.

$I_{cc}$  : courant de court-circuit.

$V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

$I_{ph}$  : Courant photonique, du modèle d'une cellule photovoltaïque.

$G$  : Ensoleillement.

$P_c$  : Puissance électrique maximum.

$FF$  : Facteur de forme.

$P_{GPV}$  : La puissance du générateur PV.

$V_{GPV}$  : La tension du générateur PV.

$I_{GPV}$  : Le courant du générateur PV.

$V_{PV}$  : La tension de la cellule PV

$I_{PV}$  : Le courant de la cellule PV.

$\Delta V$  : Paramètre de mise à jour pour la recherché MPP

$K$ : ensoleillement ( $mW/cm^2$ )

$\lambda$  : Factor caractéristique de Junction P–N idéal

$C_1$ :capacité d'entrée du convertisseur élévateur ( $F$ )

$C_2$ : capacité de sortie ( $F$ )

$d$  :rapport cyclique du signal d'entrée de commande PWM

$i_L$ : courant sur inductance  $L$  (A)

$i_{or}$ : Courant de saturation inverse du générateur photovoltaïque (A)

$i_{ph}$ : Courant généré par la lumière du générateur photovoltaïque (A)

$i_{rs}$  : Courant de saturation inverse du générateur photovoltaïque à la température de référence (A)

$i_{scr}$ : courant de cellule de court-circuit à la température de référence et à l'ensoleillement (A)

$K_I$  : Coefficient de température du courant de court-circuit du générateur photovoltaïque suffisant (A/K)

$K_o$ : constant de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ )

$L$ : inductance du convertisseur élévateur (H)

$q$ : charge électrique ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

$R$ :résistance de charge ( $\Omega$ ).

$R_C$ : résistance interne sur la capacité  $C_2$  ( $\Omega$ )

$T$  : Temperature des cellules du générateur photovoltaïque (K)

$T_r$  : Temperature de référence du générateur photovoltaïque (K)

$V_D$ : tension direct de la diode de puissance (V)

$V_{C2}$ : tension sur le condensate  $C_2$  (V)

$V_{pvd}$ : puissance maximale de référence tension PV (V)

## Résumé :

Ce mémoire porte essentiellement sur l'étude des commandes robustes des systèmes photovoltaïques. Cette étude concerne le développement d'une méthode MPPT basée sur une approche non linéaire appelée commande par mode glissant terminale pour le transfert optimal de l'énergie depuis un générateur PV vers sa charge. Distinct du contrôleur par mode glissant classique (SC), le schéma de contrôle proposé présente les caractéristiques de convergence rapide et en temps fini. Pour évaluer l'amélioration effective apportée par la commande TSMC, une étude de simulation numérique est réalisée.

**Mots Clés :** énergies renouvelables, systèmes photovoltaïque, MPPT, convertisseurs statiques, commande par mode glissant terminale.

## الملخص:

تتركز هذه الأطروحة على دراسة الضوابط القوية للأنظمة الكهروضوئية. تتعلق هذه الدراسة بتطوير طريقة MPPT بناء إلى نهج غير خطي يسمى التحكم في وضع الانزلاق الطرفي من أجل نقل طاقة أمثل من مولد PV إلى حمولته. يتميز مخطط التحكم المقترح عن وحدة التحكم في وضع الانزلاق الكلاسيكي (SC)، بخصائص التقارب السريع و المحدود، لتقييم التحسين الفعال الذي يوفره تحكم TSMC، يتم إجراء دراسة محاكاة رقمية.

**الكلمات الرئيسية :** الطاقات المتجددة، الأنظمة الكهروضوئية، MPPT، التحكم في وضع الانزلاق الطرفي.

# Sommaire

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

## **CHAPITER I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.**

I.1. Introduction.....	03
I.2. Historique.....	03
I.3. Rayonnement solaire:.....	04
I.3.1. La conversion de la lumière en électricité.....	05
I.3.2. Les différents composants du rayonnement solaire.....	05
I.4. Énergie solaire.....	06
-L'énergie solaire thermique.....	06
-L'énergie solaire photovoltaïque.....	06
I.4.1. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	07
➤ Les avantages de l'énergie photovoltaïque .....	07
➤ Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	07
I.5. Cellule photovoltaïque.....	07
I.5.2 Principe de fonctionnement.....	08
I.5.3. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	08
1. Les cellules monocristallines.....	08
2. Les cellules poly cristallines.....	09
3. Les cellules amorphes.....	09
I.6. Système de captage photovoltaïque.....	09
I.6.1. Modules photovoltaïques.....	09

I.6.2. Modèle mathématique d'un module PV .....	11
I.6.3. Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV.....	11
1.6.4. Paramètres d'un module PV.....	12
- La puissance crête, $P_c$ .....	12
- La caractéristique $I=f(V)$ .....	12
- Tension de circuit-ouvert, $V_{co}$ .....	12
- Courant de court-circuit, $I_{cc}$ : - La puissance maximale $P_{max}$ .....	12
- La puissance maximale $P_{max}$ .....	13
- Rendement $TJ$ .....	13
- Facteur de forme $FF$ .....	13
I.6.5. Effet photovoltaïque.....	13
I.7. Générateur photovoltaïque.....	13
I.8. Modélisation du système PV .....	14
I.8.1. Présentation.....	14
a- Modèle mathématique du générateur photovoltaïque.....	14
b- Le convertisseur DC-DC boost .....	16
I.8.2. Modélisation de la commande MPPT.....	16
I.8.2.1. Principe de commande MPPT .....	17
I.8.3. Les Algorithmes MPPT.....	19
I.8.3.1. Commande « Perturbation et Observation » (P&O).....	19
a. Principe de la méthode P&O.....	19
b. Algorithme de la méthode P&O.....	20
I.8.3.2 Commande « Incrément des conductances » (IncCond).....	21
a. Principe de la méthode IncCond.....	21
b. Algorithme de la méthode IncCond.....	22
I.9. Conclusion.....	23

## CHAPITER II : Commande par mode glissant terminal.

II.1. Introduction.....	24
II.2. Définitions.....	24
II.2.1. Définition 1.....	24
II.2.2. Définition 2.....	24
➤ Lemme 1.....	25
II.2.3. Définition 3.....	25
➤ Lemme 2.....	25
II.3. Convergence en temps fini.....	26
II.4. Conception de la commande par mode glissant terminal.....	26
II.4.1. Description du système.....	27
II.4.2. Conception de la surface de glissement.....	27
II.4.3. Calcul de la commande.....	27
II.5. Commande par mode glissant terminal rapide des systèmes SISO (FTSM).....	29
II.5.1. Etude de la stabilité.....	31
➤ Remarque.....	32
II.6. Commande par mode glissant terminal (TSMC) d'un convertisseur DC-DC dévolteur ayant un modèle global.....	32
II.6.1. Formulation du modèle.....	32
Théorème 1.....	33
Démonstration.....	34
II.6.2. Résultats de simulation.....	34
II.7 Conclusion.....	37

## **CHABITREIII: Commande par mode glissant terminal d'un système PV.**

III.1. Introduction.....	38
III.2. Recherche du point de puissance maximale.....	38
III.3. Commande MPPT basée sur le mode glissant terminale.....	39
➤ Théorème 1.....	41
III.3.1. Analyse robustesse.....	41
III.4. Résultats de simulation .....	43
Cas 1 : Conditions climatiques standards.....	43
Cas 2 : Eclairement variable.....	46
Cas 3 : Température variable.....	48
Cas 4 : Eclairement et température variable.....	51
Cas 5 : Eclairement trapézoïdal.....	55
III.6. Conclusions.....	59
Conclusion Générale.....	60
Références Bibliographies.....	61

# Introduction Générale

# Introduction générale

Ces derniers temps, avec la croissance de la demande d'énergie, nous tournons de plus en plus vers les énergies alternatives, compte tenu également de l'augmentation du prix des énergies fossiles et de leur offre limitée. Le photovoltaïque est une alternative énergétique valable pour une production d'électricité plus propre et potentiellement illimitée, étant donné sa dépendance à l'étoile de notre système solaire, par rapport à l'utilisation de combustibles fossiles ou nucléaires. Les systèmes photovoltaïques sont également soumis, une fois mis en service, à de faibles coûts de maintenance et leur durée de vie est d'environ 25 à 30 ans.

La commande MPPT (Maximum power point tracking) [Int.gén] permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque suite à des variations climatiques et de charge. Son principe est basé sur la variation automatique du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour maximiser continuellement la puissance du générateur photovoltaïque (GPV). Parmi les méthodes classiques pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT), nous pouvons citer l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Cette dernière donne de bons résultats, mais elle souffre de quelques inconvénients, le plus important est son manque d'efficacité dans des conditions de faibles irradiances.

Pour résoudre ces problèmes, l'utilisation des techniques de commande non linéaire comme la commande par mode glissant s'avère envisageable. Dans ce cadre, l'objectif principal de ce travail est de résoudre le problème de transfert d'énergie dans la chaîne de conversion photovoltaïque, autrement dit, garantir un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque pour extraire une puissance maximale et la transférer vers la charge. Dans ce Projet de fin d'étude, nous avons implémenté deux commandes qui sont la fameuse commande Perturbation & Observation (P&O) et la commande mode glissant terminale.

Le contenu de notre mémoire est organisé en trois chapitres principaux.

Le 1<sup>er</sup> chapitre nous présentons des notions générales sur l'énergie photovoltaïque et sera consacré à la modélisation du convertisseur DC/DC (Boost) et du GPV ainsi que leur principe de fonctionnement et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement du générateur photovoltaïque et on termine le chapitre par l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la commande P&O & IncCond et ces définitions et expliqués son principe.

Au 2<sup>er</sup> chapitre une commande par mode glissant terminal a été proposée dans laquelle une nouvelle conception de la surface de glissement et de la commande est utilisée. Afin d'améliorer la performance en précision, l'approche terminale est revue dans le but d'obtenir une convergence de temps fini.

Dans le 3<sup>er</sup> chapitre, la commande par mode glissant terminale est synthétisée pour un système PV suivi de leur application sous l'environnement Matlab. Les résultats de simulation font l'objet d'une étude qui fait ressortir la prévalence de technique suggérée.

**CHAPITRE I :**  
Généralités sur les systèmes  
photovoltaïques.

### **I.1. Introduction:**

L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité et son utilisation. La conversion de l'énergie solaire (photovoltaïque) en énergie électrique est effectuée par des cellules photovoltaïques formant des générateurs photovoltaïques (PV). Ces derniers produisent des forces électromotrices dont leurs valeurs varient en fonction des conditions climatiques. Les différents types de cellules PV, leur structure de fonctionnement, ainsi que leur modélisation faisant l'objectif principal de ce chapitre.

### **I.2. Historique:**

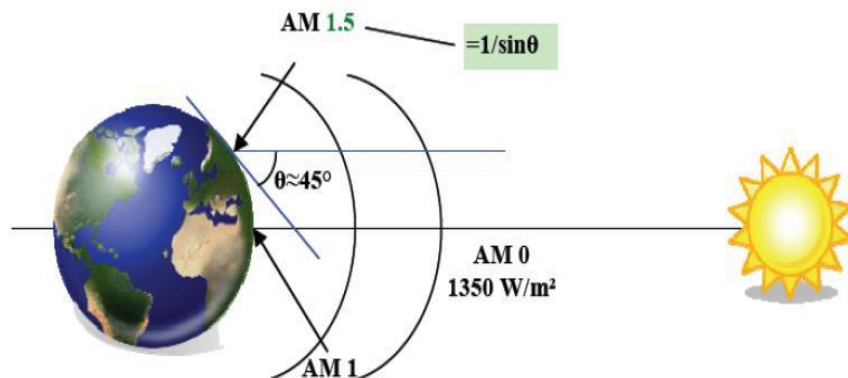
Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 45 ans et leurs applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [1]. Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont mentionnées ci-dessous [2] :

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

- **1983**: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.
- **2013** : la production mondiale des modules photovoltaïques a dépassé les 5 MW<sub>c</sub> en 1982 à 18GW<sub>c</sub>. et le groupe algérien Condor électronique, a lancé la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W [3].
- **2019** : la production d'énergie photovoltaïque est à la disposition de l'industrie, entreprises et des particuliers, incluant les applications domestiques [3].

### I.3. Rayonnement et énergie solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Dans l'espace hors atmosphère terrestre, l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de  $1350\text{W}/\text{m}^2$  (Figure I.1). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  au niveau du sol, à  $90^\circ$  d'inclinaison [4].



**Figure.I.1:** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

Du point de vue énergétique, le rayonnement solaire est constitué de photons de longueur d'onde transportant une énergie donnée par la relation [4]:

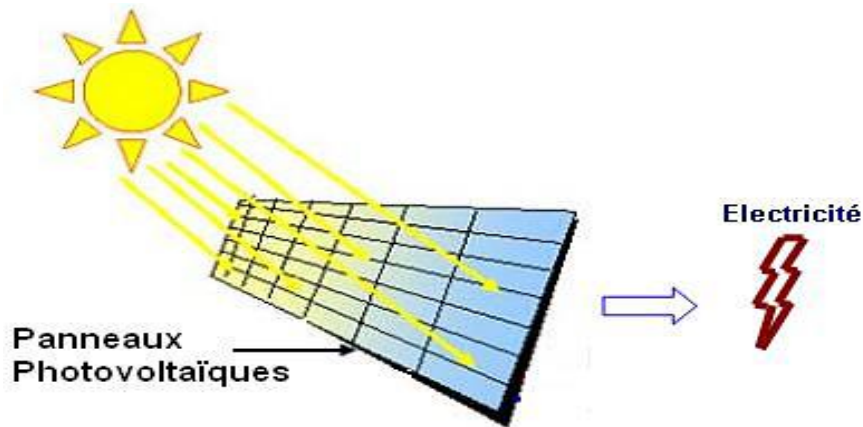
$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

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

### I.3.1. Conversion de la lumière en électricité:

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules solaires composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [5].

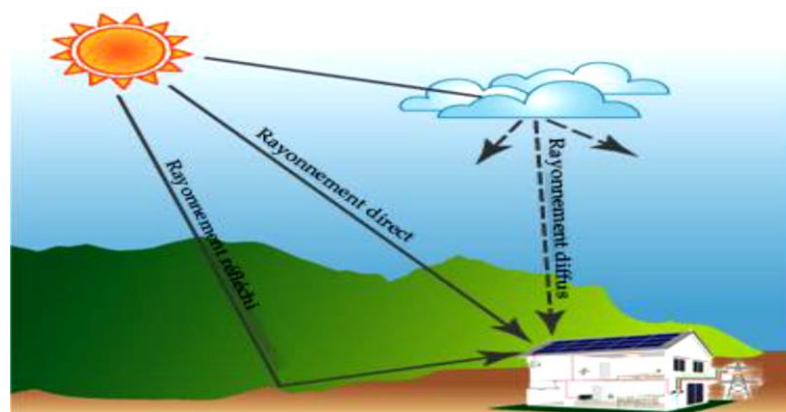


**Figure I.2:** conversion de l'énergie solaire en électricité.

Dans les semi-conducteurs, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

### I.3.2. Les différents composants du rayonnement solaire :

La terre reçoit le rayonnement solaire en différentes formes dont on peut distinguer quatre types de rayonnement que leurs valeurs dépendent de plusieurs paramètres à savoir les conditions météorologiques, les conditions atmosphériques, la rotation de la Terre et son inclinaison..., etc [6].



**Figure.I.3 :** Différents composants du rayonnement solaire [4].

Les quatre types du rayonnement solaire sont: le rayonnement reçu direct du soleil, le rayonnement diffus qui correspond à la diffusion de la lumière et le rayonnement solaire réfléchi du sol [6].

#### I.4. Énergie solaire:

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la Terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés [7]:

- **Énergie solaire thermique :** consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **Énergie solaire photovoltaïque :** consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon.

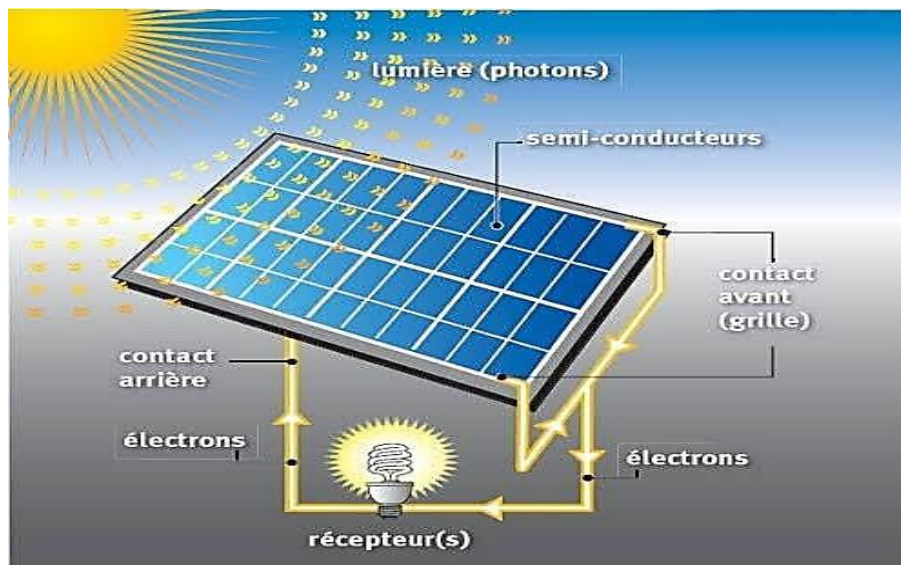


Figure I.4 : principe de transformation de l'énergie solaire à l'énergie électrique.

#### **I.4.1. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont [8] :

##### ➤ **Avantages de l'énergie photovoltaïque :**

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- l'énergie photovoltaïque est renouvelable, gratuite, non polluante et indépendante.
- les systèmes de cette filière ne génèrent pas de déchets, sans pollution et sans bruit.
- pas de gaz à effet de serre.
- peut se combiner avec d'autre source d'énergie avec une longue durée de vie.
- une nouvelle technologie décentralisée qui demande moins d'entretien.
- production d'énergie à la demande en allant des milliwatt au mégawatt.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

##### ➤ **Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- le rendement des modules PV est limité, notamment que leurs coûts encore élevé.
- l'intermittence et la sensibilité contre les conditions météorologiques.
- le recyclage des modules présente un souci pour l'environnement.

#### **I.5. Cellule photovoltaïque:**

Appelée aussi la photopile ; est l'unité de base du système de conversion d'énergie solaire en électricité du type continu directement utilisable ou convertit en alternatif. Elle est basée sur le phénomène physique « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.6 V en fonction du matériau semi-conducteur utilisé ainsi que de sa température et du vieillissement de la cellule. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et elle fortement dépendante de la température. Le courant maximal qui se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées est nommé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et il est fortement dépendant du niveau d'éclairement ( $G$ ) [9] [10].

### I.5.2. Principe de fonctionnement:

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

Lorsque les photons ; provenant du spectre solaire ; sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN, lorsque cette énergie supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite (l'énergie de la bande de gap)  $E_g$  du semi-conducteur, un couple électron-trou est créé. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités ce qui va créer une différence de potentiel aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé l'effet photovoltaïque. La figure I.5. illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque [9] [10].

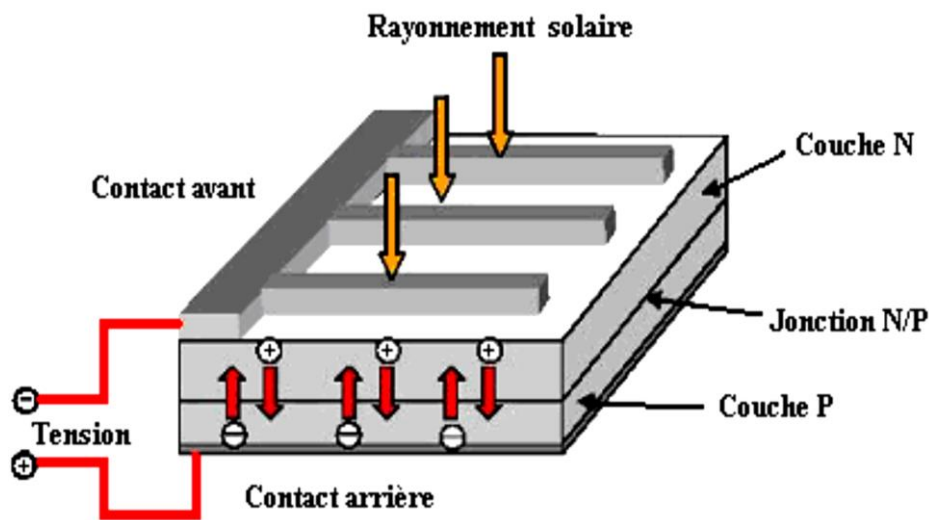


Figure I.5 : Structure générale d'une cellule photovoltaïque.

### I.5.3. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque):

Différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques dont on peut les distinguer. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [11]:

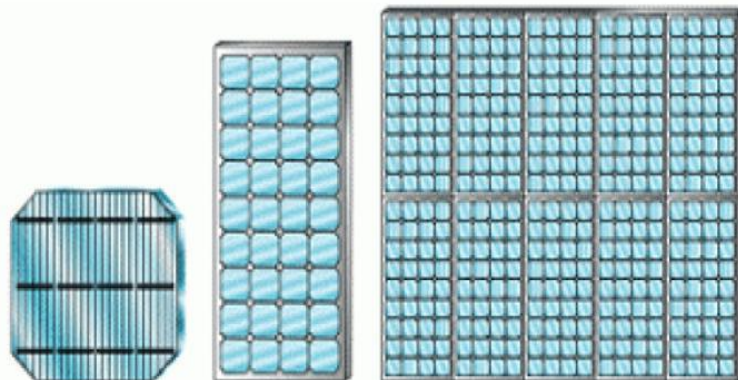
**1. Cellules monocristallines :** Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

**2. Les cellules poly cristallines :** leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant, leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

**3. Cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est-il fonctionnel avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

### I.6. Système de captage photovoltaïque:

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur ... [12].



**Figure I.6 :** Cellule, module et panneau photovoltaïque.

#### I.6.1. Modules photovoltaïques:

La cellule PV seule est souvent peu utilisable, sa faible épaisseur la rend très fragile d'une part, sa tension et son courant très faibles la rendent inutilisable directement dans des applications électriques courantes [13].

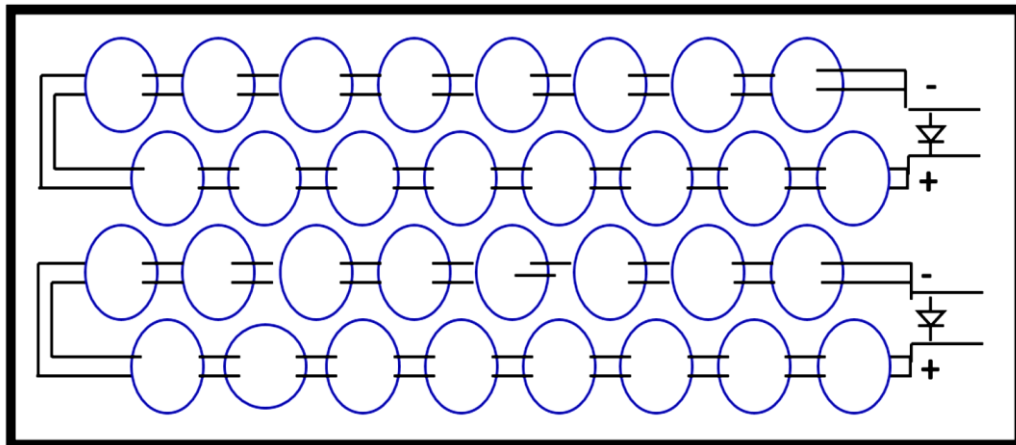
Les tensions de fonctionnement des équipements électriques sont normalisées (12, 24, 48V, etc...) 299 et une seule cellule PV ne permet pas de les alimenter directement. Ainsi, afin d'accroître 300 puissances disponibles et l'énergie produite par des cellules PV, les fabricants assemblent en série et en parallèle les cellules PV pour former un module PV (Fig. 1.7).

La tension désirée est atteinte en connectant plusieurs cellules en série ( $N_s$ ). Pour obtenir la puissance désirée, plusieurs de ces séries de cellules peuvent être montées sous forme de branches en parallèle ( $N_p$ ). Ces enchaînements sont ensuite protégés sous un conditionnement conférant à l'ensemble une bonne résistance mécanique et une protection efficace face aux agressions extérieures. Ainsi, la puissance  $P_{GPV}$  fournie à la sortie du générateur PV est donnée par [14]:

$$P_{GPV} = V_{GPV} * I_{GPV} \quad (\text{I.2})$$

$$P_{GPV} = N_s * V_{PV} * N_p * I_{PV} \quad (\text{I.3})$$

- $P_{GPV}$  : La puissance du générateur PV.
- $V_{GPV}$  : La tension du générateur PV.
- $I_{GPV}$  : Le courant du générateur PV.
- $V_{PV}$  : La tension de la cellule PV
- $I_{PV}$  : Le courant de la cellule PV.
- $N_s$  : Nombre de cellules PV connectées en série et qui constituent une branche PV.
- $N_p$  : Nombre de branches PV connectées en parallèle.



**Figure I.7** : Module PV de  $N_p$  branches parallèles et  $N_s$  cellule en séries.

Pour avoir un important courant  $I_{PV}$  du champ PV, on a la possibilité d'utiliser des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, ou de connecter plusieurs modules PV de paramètres identiques. Ce qui permet d'avoir un fonctionnement optimal du générateur PV [15].

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale ( $P_{max}$ ). La valeur maximale de cette puissance correspond à la crête de la courbe  $P(V)$  du champ PV.  $P_{max}$  est obtenue à partir des valeurs optimales de la tension ( $V_{mp}$ ) et du courant ( $I_{mp}$ ). Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas

commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré câblés, constitués de plusieurs cellules [15].

### I.6.2. Modèle mathématique d'un module PV :

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau PV, est donné par l'équation suivante [17] [18]:

$$I = I_{ph} - I_{s1} * \left[ e^{\left[ \frac{q(V + N_s * I * R_s)}{\alpha_1 * N_s * k * T} \right]} - 1 \right] - I_{s2} * \left[ e^{\left[ \frac{q(V + N_s * I * R_s)}{\alpha_2 * N_s * k * T} \right]} - 1 \right] - \frac{V + N_s * I * R_s}{N_s * R_p} \quad (\text{I.4})$$

### I.6.3. Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV :

Le comportement du module PV est très sensible aux variations de l'éclairement (E) et de la température (T) car ces variations ont un effet important sur la puissance fournie par le module. La Fig.I.8. (a) montre que pour une température constante de 25°C, le courant  $I_{PV}$  et la puissance  $PPV$  varient en fonction de la tension  $V_{PV}$  pour différentes valeurs d'éclairements, on constate plusieurs courbes P(V) qui correspondent aux Points de Puissance maximale MPP ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ) [15].

Selon la Fig. I.8. (a), le courant de court-circuit  $I_{sc}$  ou  $I_{cc}$  varie proportionnellement à 338 l'éclairement. Par contre, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  varie très légèrement [15]. 339

La Fig.I.8. (b) montre que si l'éclairement est constant (1000 W/m2) et la température augmente, la tension  $V_{oc}$  diminue par contre le courant  $I_{sc}$  varie peu. Donc le fonctionnement de module PV dépend essentiellement des conditions environnementales auxquelles il est soumis [16]. A cet effet, il faut prendre en considération ces facteurs afin de dimensionner correctement le générateur PV qui permettra d'obtenir la puissance souhaitée [15].

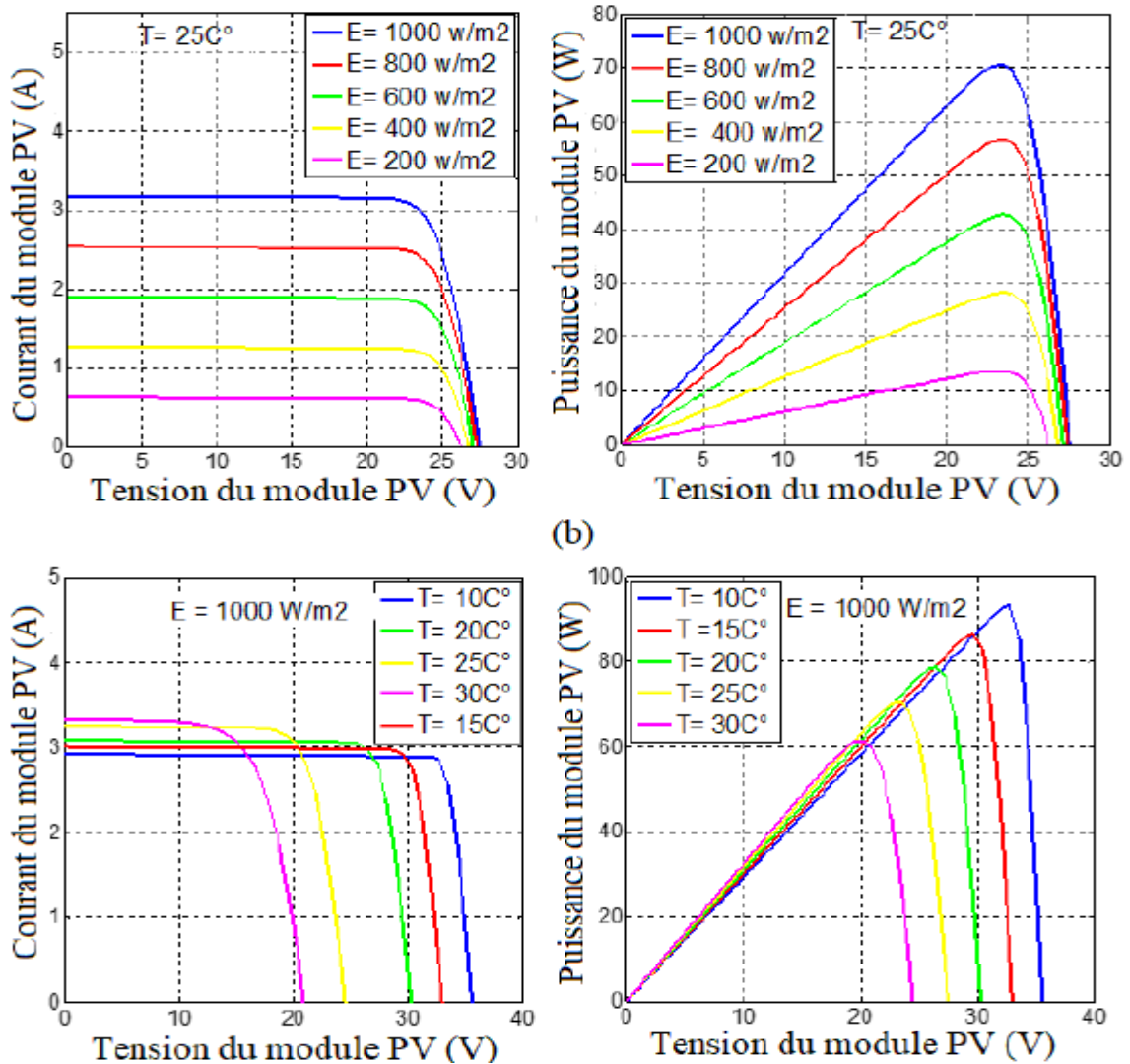


Figure I.8 : (a,b) Influence de l'éclairement et de la température sur  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ .

#### 1.6.4. Paramètres d'un module PV:

Les modules PV sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides et minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les paramètres suivants [19] :

- **La puissance crête,  $P_c$** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- **La caractéristique  $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension de circuit ouvert,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil".
- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où  $V = 0$ . (Pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ ).

- **La puissance maximale  $P_{max}$**  : C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module qui est associé à une tension maximale  $V_{max}$  et à une intensité maximale  $I_{max}$ .

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} . \quad (I.5)$$

- **Rendement  $TJ$**  : Rapport de la puissance électrique maximale  $P_{max}$  à la puissance de radiation incidente  $P_{inc}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (I.6)$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

- **Facteur de forme  $FF$** : Rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de  $(I_{cc}, V_{co})$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.7)$$

### I.6.5. Effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire. L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendues mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés, on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

### I.7. Générateur photovoltaïque :

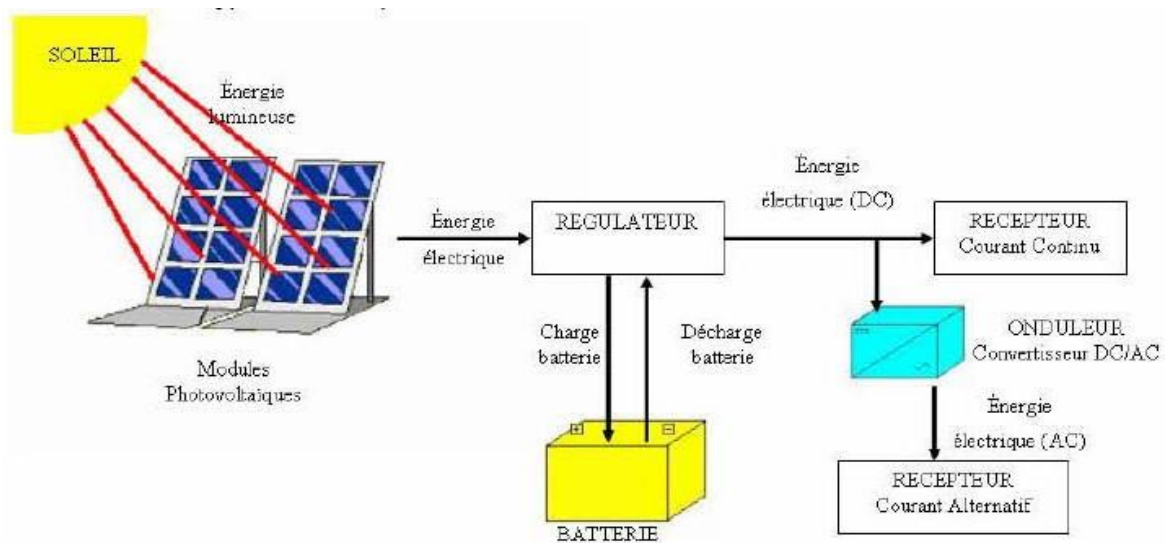
Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, les modules utilisés sont de type poly cristallin (BP 83), dont les caractéristiques sont données dans l'annexe A. La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries  $N_s$  et d'un nombre de modules parallèles  $N_p$ .

En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer le champ (générateur) photovoltaïque. Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$I_{GPV} = N_p \times I \quad (\text{I.8})$$

$$V_{GPV} = N_s \times V \quad (\text{I.9})$$

$I_{GPV}$ ,  $V_{GPV}$  est le courant et la tension du générateur photovoltaïque,  $P$ ,  $N$ ,  $S$  et  $N$  sont les nombres des modules en parallèle et en série.



**Figure I.9 :** Schéma général d'un générateur photovoltaïque

## I.8. Modélisation du système PV:

### I.8.1. Présentation :

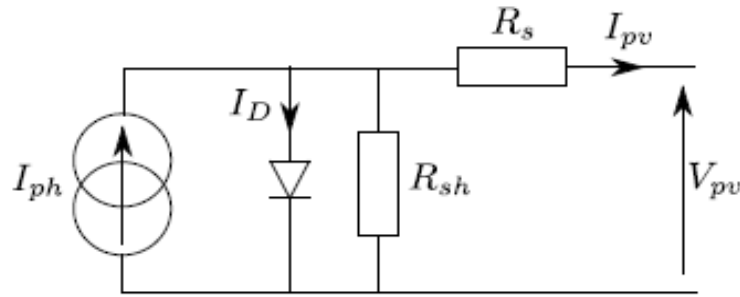
#### a- Modèle mathématique du générateur photovoltaïque :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique est assurée par des cellules solaires. Plusieurs modèles électriques équivalents d'une cellule photovoltaïque sont proposés et étudiés dans la littérature. [20],[21],[22] Notamment le modèle idéal, le modèle à une seule diode et résistance série, le modèle à une seule diode et résistance parallèle, le modèle à deux diodes. Le modèle à une seule diode et résistance parallèle est donné à la figure I.10 la caractéristique ( $I_p$ - $V_p$ ) idéale (i.e.  $R_s = 0$ ,  $R_{sh} = \infty$ ) d'un module solaire est donnée par l'équation suivante :

$$I_p = I_{ph} - I_o [e^{(AV_p)} - 1] \quad (\text{I.10})$$

$$A = \frac{q}{\gamma k T}; \quad I_{ph} = [I_{SCR} + k_1(T - T_r)] \frac{\lambda}{1000}; \quad I_0 = I_{or} \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 * \exp \left[ \frac{q E_{GO}}{\gamma k} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right];$$

où,  $I_{ph}$  est le photo-courant,  $I_0$  est le courant de saturation inverse de la cellule photovoltaïque,  $I_{or}$  est le courant de saturation de la cellule à la température  $T_r$ ,  $I_{SCR}$  est le courant de court circuit à la température 298:15°K et un ensoleillement de  $1kW=m^2$ ,  $K_1$  est le coefficient de température du courant de court circuit  $I_{SCR}$ ,  $\lambda$  est l'ensoleillement,  $E_{GO}$  est la bande de gap pour le silicium,  $\gamma$  est le facteur d'idéalité,  $T_r$  est la température de référence,  $T$  est la température de la cellule,  $K$  est la constante de Boltzmann et  $q$  est la charge de l'électron. Comme on peut le voir, le courant  $I_{ph}$  et  $I_0$  dépend de la température  $T$  et de l'ensoleillement  $\lambda$ .

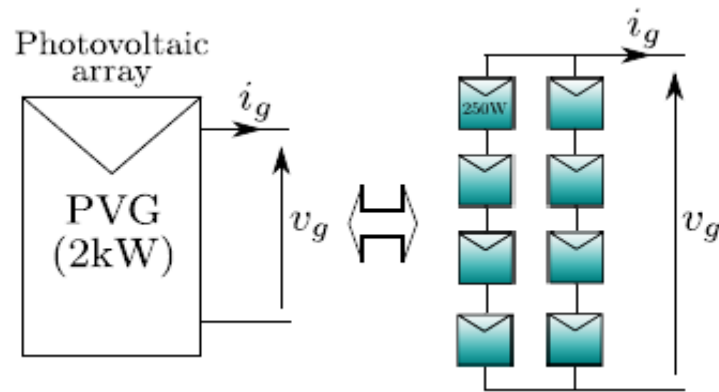


**Figure.I.10** : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque (**GPV**) est composé par la mise en parallèle de plusieurs chaînes de modules photovoltaïques connectés en série, afin d'assurer les niveaux de puissance désirés. Ce GPV présente une caractéristique ( $I_g$ - $V_g$ ) non linéaire et qui est exprimée approximativement et idéalement par l'équation suivante [20], [21],[22]:

$$I_g = I_{phg} - I_{og} [e^{(A_g V_g)} - 1] \quad (\text{I.11})$$

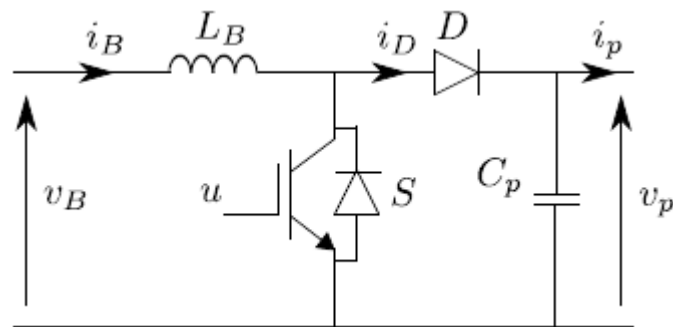
où,  $V_g$  et  $I_g$  sont respectivement la tension et le courant de sortie du PVG,  $A_g = A/N_s$  est la constante du GPV,  $I_{phg} = N_p * I_{ph}$  est le photo courant du GPV,  $I_{og} = N_p * I_0$  est le courant de saturation du GPV,  $N_s$  est le nombre de modules photovoltaïques connectés en série et  $N_p$  est le nombre de chaînes montées en parallèle [20], [21],[22].



**Figure.I.11** : Structure du champ photovoltaïque.

### b- Le convertisseur DC-DC Boost :

Un convertisseur DC-DC est généralement utilisé dans les systèmes photovoltaïques comme circuit d'interface assurant l'adaptation de la charge. La résistance de sortie du générateur photovoltaïque est ajustée en variant le rapport cyclique du convertisseur jusqu'à ce qu'une adaptation optimale de la charge au PVG se réalise. Un convertisseur Boost est utilisé dans ce travail, pour adapter la tension continue délivrée par le PVG à la tension nominale du moteur à courant continu de la pompe centrifuge. Son schéma structurel est donné à la figure I.12 il consiste en une inductance de haute fréquence  $L_B$ , une capacité  $C_p$  du filtre de sortie, une diode  $D$  et un transistor IGBT (insulated-gate bipolar transistor) constituant l'interrupteur commandé  $S$  [20], [21], [22].

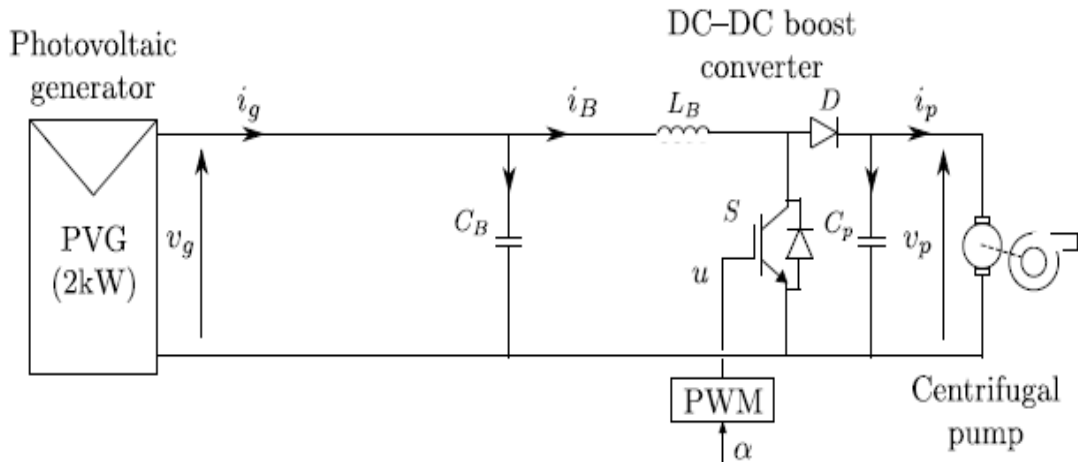


**Figure I.12** : Schéma du convertisseur DC-DC Boost.

### I.8.2. Modélisation de la commande MPPT standard :

Dans le cas où le câble de transport d'énergie photovoltaïque est considéré idéal, le schéma du système à commander correspond à celui donné par la figure I.13 ci-dessous :

En appliquant les lois de Kirchhoff au système de la figure I.13 [20], [21], [22].



**Figure I.13** : Schéma structurel du système à commander.

Nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dv_g(t)}{dt} = \frac{1}{C_B} i_g(t) - \frac{1}{C_B} i_B(t) \\ \frac{di_B(t)}{dt} = \frac{1}{L_B} v_g(t) - \frac{1-u}{L_B} v_p(t) \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

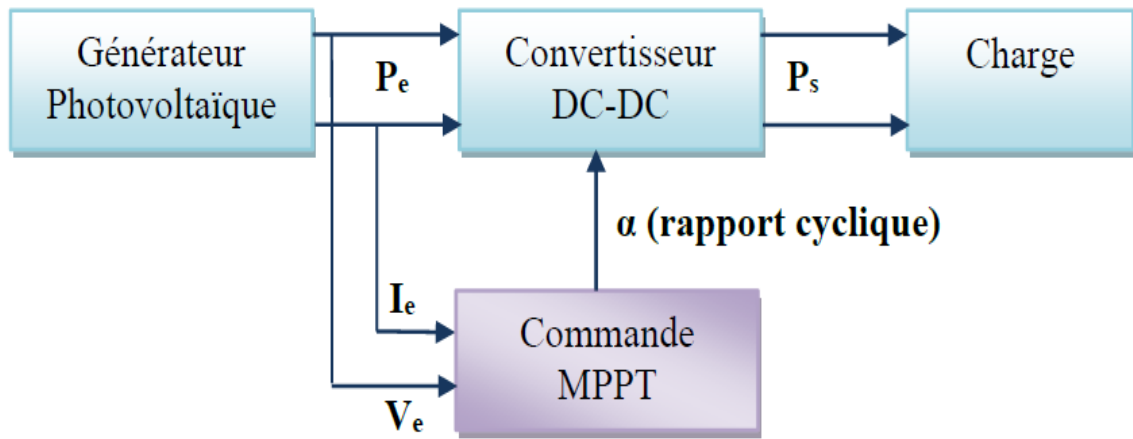
Où,  $i_g(t)$  et  $V_g(t)$  sont respectivement le courant et la tension en sortie du PVG,  $i_B(t)$  est le courant à l'entrée du convertisseur boost,  $V_p(t)$  et la tension de la pompe,  $u$  est le signal binaire de commande du convertisseur.

Le modèle moyenné du système (I.13) est décrit équations suivant [20], [21], [22]:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{C_B} \bar{i}_g - \frac{1}{C_B} x_1 \\ \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_B} x_2 - \frac{1-\alpha}{L_B} \bar{v}_p \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

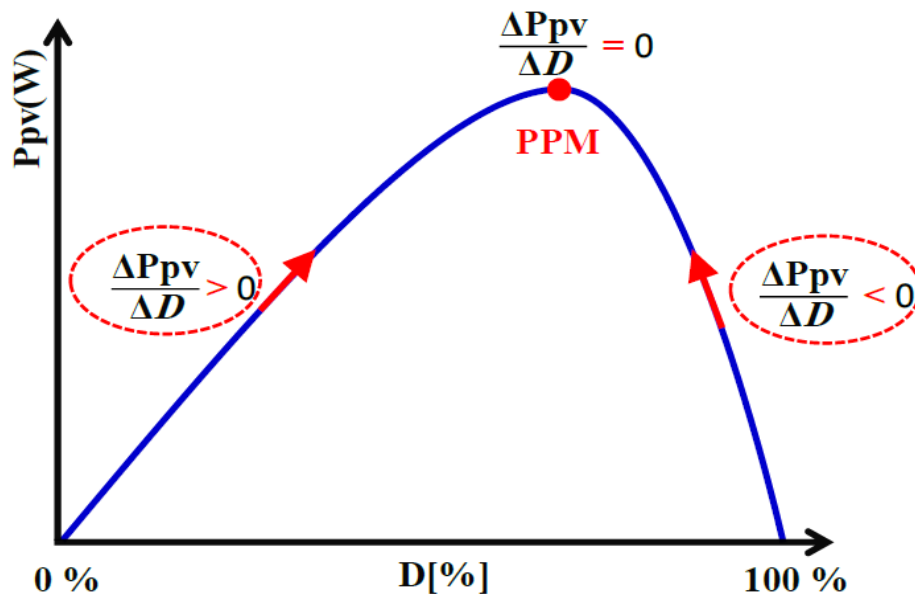
### I.8.2.1. Principe de commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [23]. Il peut être représenté par le schéma de la figure I.14.



**Figure I.14 :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier ( $I$  et  $V$  et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [24].



**Figure I.15 :** Principe de la commande MPPT.

### I.8.3. Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche de la PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

#### I.8.3.1. Commande « Perturbation et Observation » (P&O):

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

##### a. Principe de la méthode P&O :

Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau et l'observation de son impact sur le changement de la puissance à sa sortie. Le principe de cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique  $\alpha$  et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque [25].

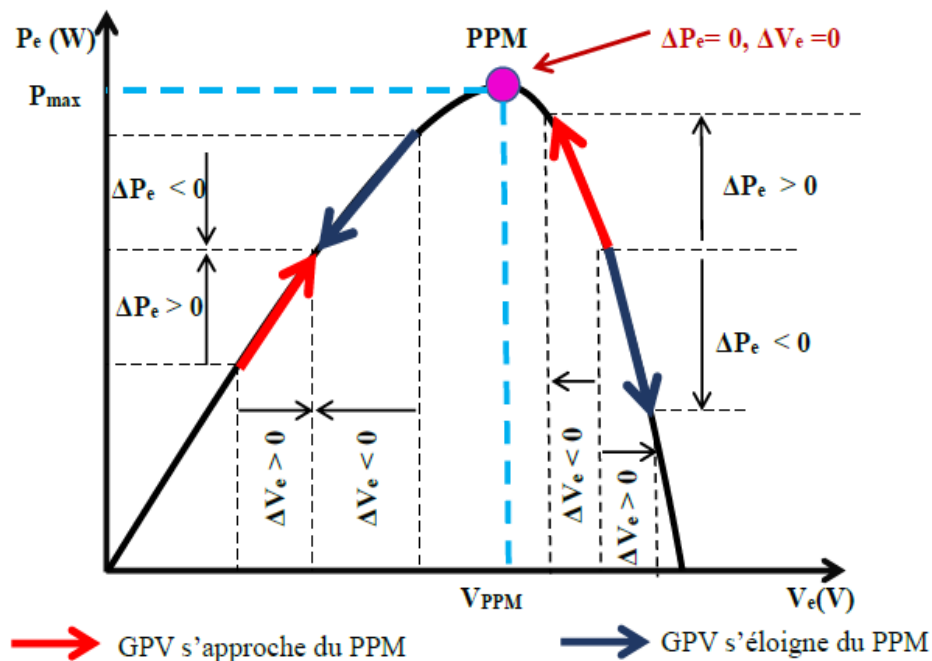
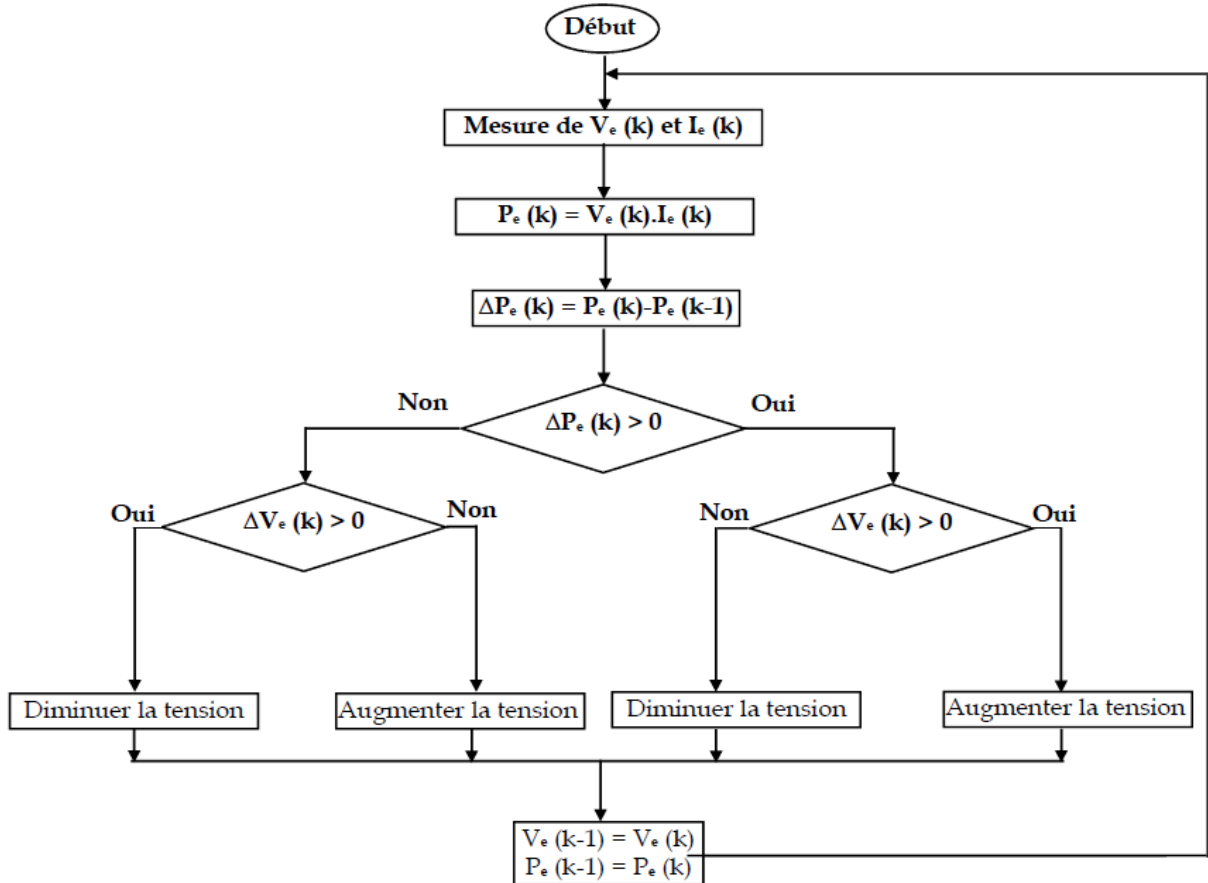


Figure I.16 : Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.

### b. Algorithme de la méthode P&O

La figure I.17 montre l'organigramme de l'algorithme P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, le courant et la tension du panneau sont mesurés pour calculer  $(k)$ . Cette valeur de  $(k)$  est comparée avec celle de  $(k-1)$  déjà calculée à l'itération précédente [26].



**Figure I.17 :** Organigramme de l'algorithme P&O.

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

**I.8.3.2. Commande « Incrément des conductances » (IncCond) :****a. Principe de la méthode IncCond :**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par [4] :

$$Co = \frac{I_e}{V_e} \quad (\text{I.14})$$

$$dCo = \frac{dI_e}{dV_e} \quad (\text{I.15})$$

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

- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$  le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

En utilisant la relation (I.15), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d[I_{pv} * V_{pv}]}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}. \quad (\text{I.16})$$

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

- Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

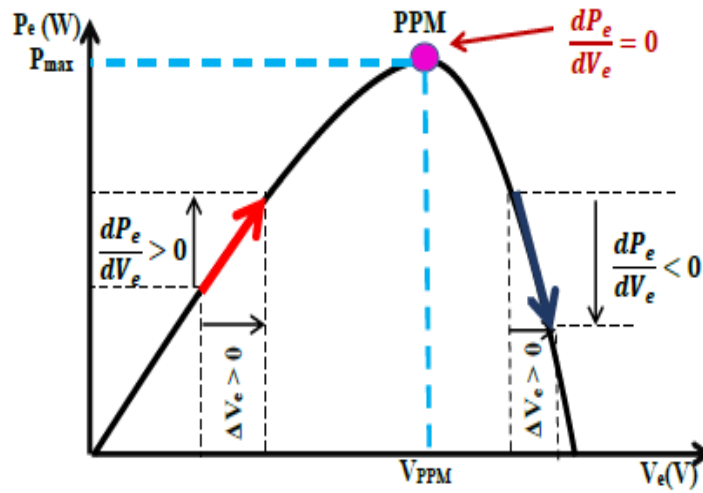


Figure.I.18 : Principe de fonctionnement de l’algorithme IncCond.

**b. Algorithme de la méthode IncCond :**

La figure I.19 montre l’organigramme de l’algorithme IncCond.

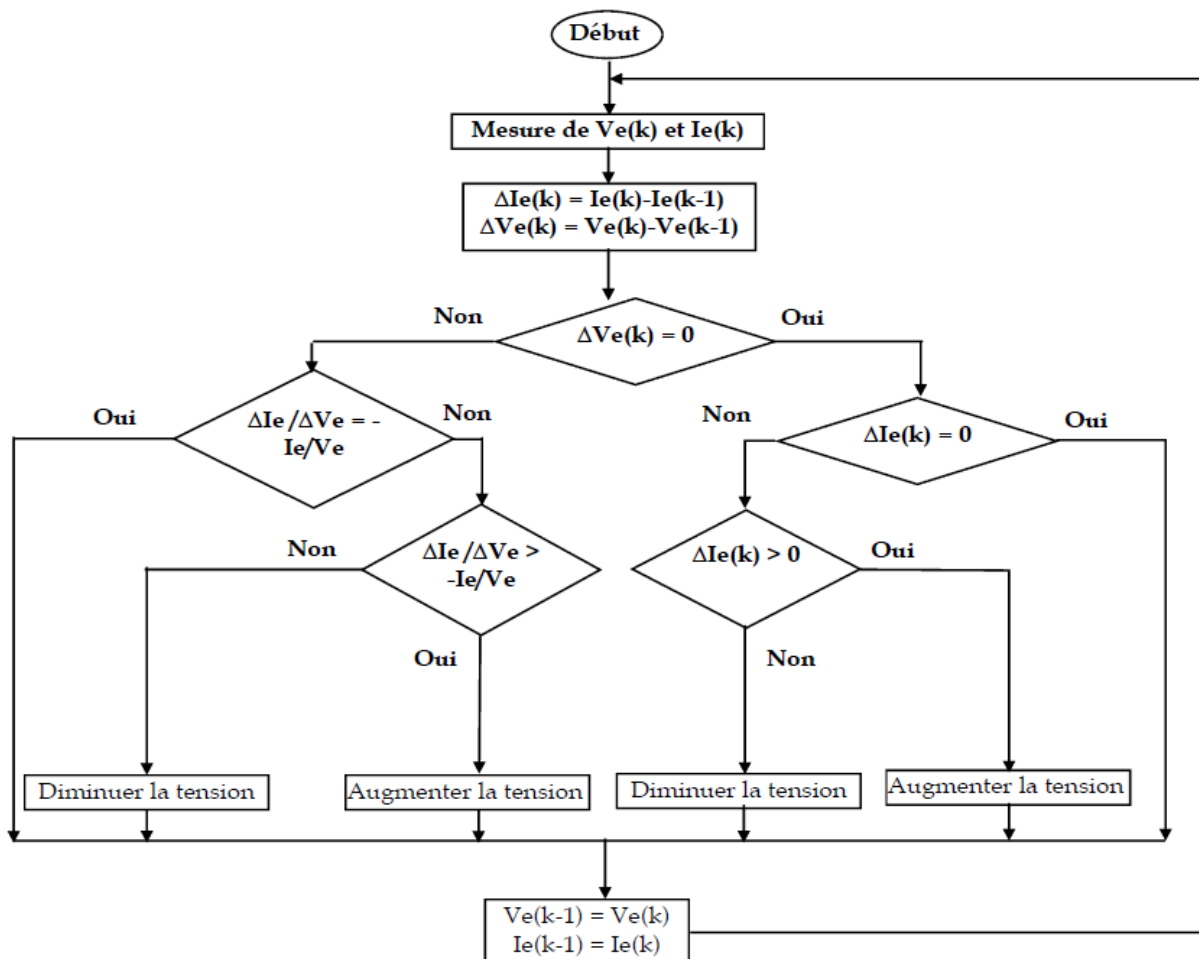


Figure I.19 : Organigramme de l’algorithme IncCond.

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

### **I.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les différentes notions importantes pour l'étude d'un système solaire photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire. Nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques. Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour certaines tensions et courants de fonctionnement. On a présenté la modélisation d'une cellule PV à une seule diode, le cœur du GPV, et le hacheur boost commandé par un algorithme MPPT. Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation) et IncCond (Incrément des conductances).

## **CHAPITRE II :**

Commande par Mode Glissant  
Terminal.

## II.1. Introduction

Un nouvel algorithme de contrôle SMC, nommé mode glissant terminal (TSM), a été récemment étudié pour améliorer davantage la performance de contrôle [27] [28]. En comparaison avec l'hyperplan linéaire à base de modes glissants, TSM offre des propriétés supérieures telles que : rapidité et convergence en temps fini. Ce contrôleur est particulièrement utile dans le traitement de haute précision, car il accélère, dans le cas des systèmes non linéaires incertains, d'ordres deux ou supérieurs, le taux de convergence près du point d'équilibre choisi [27] [28].

## II.2. Définitions

### II.2.1. Définition 1

Considérons un système [29] :

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0, \quad x \in \mathfrak{R}^n, \quad (\text{II.1})$$

Où  $f : D \rightarrow \mathfrak{R}^n$  est continue sur un voisinage ouvert  $D$  de l'origine, le point d'équilibre  $x=0$  du système est (localement) stable à temps fini s'il est Lyapunov stable et convergent en temps fini dans un voisinage  $U \subseteq D$ . Ici, la convergence à temps fini signifie: pour toute condition initiale  $x_0 \in U \setminus \{0\}$ , il ya une fonction du temps de stabilisation (de convergence)  $T(x_0) : U \setminus \{0\} \rightarrow (0, \infty)$  telle que chaque solution  $x(t, x_0)$  du système (II.1) est définie avec  $x(t, x_0) \in U \setminus \{0\}$  pour  $t \in [0, T(x_0)]$  et satisfait  $\lim_{t \rightarrow T(x_0)} x(t, x_0) = 0$  et  $x(t, x_0) = 0$ ,

Si :  $t \geq T(x_0)$ .

### II.2.2. Définition 2

Considérons un système à contrôler de la forme [29] :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad x \in \mathfrak{R}^n, u \in \mathfrak{R}^m. \quad (\text{II.2})$$

Avec  $g(x) \neq 0$ . Le système peut être stabilisé en temps fini s'il existe une loi de contre-réaction  $u(x)$  telle que  $x=0$  est un point d'équilibre à temps fini localement stable du système en boucle fermée.

➤ **Lemme 1** [30]

Considérons le système non linéaire décrit en **(II.1)**, supposons qu'il existe une fonction  $V(x)$  (continuellement différentiable)  $C^1$ , définie dans un voisinage  $D \subset \mathfrak{R}^n$  de l'origine, et qu'il existe des nombres réels  $\beta' > 0$  et  $0 < \gamma < 1$ , tel que  $V(x) > 0$  sur  $D$  et :

$$\dot{V}(x) + \beta' V^\gamma(x) \leq 0. \quad (\text{II.3})$$

(le long de la trajectoire) sur  $D$ . Alors l'origine du système est stable en temps fini. Par ailleurs, le temps de stabilisation, dépendant de l'état initial  $x(0) = x_0$ , est donné par :

$$T(x_0) \leq \frac{1}{\beta'(1-\gamma)} V^{1-\gamma}(x_0). \quad (\text{II.4})$$

Pour  $x_0$  dans un voisinage ouvert de l'origine. Si  $U = \mathfrak{R}^n$  et  $V(x)$  sont également radialement non bornés, l'origine est globalement stable à temps fini.

### II.2.3. Définition 3

Les macro-variables des commandes **TSC** et **FTSC** peuvent être décrites par les équations différentielles non linéaires de premier ordre suivantes [31]:

$$\psi = \dot{x} + \beta' x^\gamma = 0, \quad \psi = \dot{x} + \alpha x + \beta' x^\gamma = 0. \quad (\text{II.5})$$

Où  $\alpha, \beta' > 0$ ,  $0 < \gamma < 1$ .

Dans [32], l'expression **(II.6)** a été rapportée comme **TSC** et **FTSC**

$$\psi = \dot{x} + \beta' x^{\frac{p}{q}} = 0, \quad \psi = \dot{x} + \alpha x + \beta' x^{\frac{p}{q}} = 0. \quad (\text{II.6})$$

Où  $\alpha, \beta' > 0$ ,  $q > p > 0$  sont des entiers impairs.

➤ **Lemme 2** [30]

Le point d'équilibre  $x=0$  des équations différentielles continues non-lipchitziennes **(II.6)** est globalement stable en temps fini, c'est-à-dire que pour toute condition initiale donnée  $x(0) = x_0$ , les états du système convergent vers  $x=0$  en temps finis:

$$t(x_0) = \frac{1}{\beta'(1-\gamma)} |(x_0)|^{1-\gamma}. \quad (\text{II.7})$$

$$t(x_0) = \frac{1}{\alpha(1-\gamma)} \ln \frac{\alpha |x_0|^{1-\gamma} + \beta'}{\beta'}. \quad (\text{II.8})$$

Respectivement et y restent pour toujours. En outre, une autre description de la fonction de Lyapunov étendue relative à la stabilité en temps fini du lemme 1 peut être décrite en utilisant la forme du contrôleur **FTSC** comme:

$$\dot{V}(x) + \alpha V(x) + \beta' V^\gamma(x) \leq 0. \quad (\text{II.9})$$

et le temps de convergence peut être donné par :

$$t(x_0) \leq \frac{1}{\alpha(1-\gamma)} \ln \frac{\alpha V^{1-\gamma}(x_0) + \beta'}{\beta'}. \quad (\text{II.10})$$

Il est évident que les inégalités **(II.9)** et **(II.10)** incluent une stabilité exponentielle en plus d'une stabilité en temps fini [30]. Cela fournit une stabilité en temps fini plus rapide que celle obtenue avec le contrôleur **TSC**.

### II.3. Convergence en temps fini

Le traitement avec une poursuite en temps fini n'a seulement pas pour but d'améliorer les performances du système, mais il rend aussi les propriétés de stabilité plus fortes. Il n'a donc pas seulement un intérêt théorique premier, mais il fait également appel aux implications pratiques : il assure par exemple que la tâche est faite exactement comme désiré, c'est-à-dire d'une manière robuste. Une question pertinente se pose ainsi sur la possibilité d'obtenir ce contrôleur sous certaines contraintes physiques, telle que par exemple la continuité et pas l'illimité de la commande d'entrée. Dans ce chapitre, nous nous occupons de ce problème et nous proposons une solution réalisable dans la commande par mode glissant terminal [33].

### II.4. Conception de la commande par mode glissant terminal

La conception de la commande par mode glissant terminal est basée sur le choix particulier de la surface de glissement et la détermination d'une loi permettant de conduire l'état du système à rester sur cette surface.

### II.4.1. Description du système

Considérant une classe des systèmes non-linéaires d'ordre deux sous la forme suivante [34]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(t) + g(t)u(t) + d(t) \\ y = x_1. \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Où  $x = [x_1, x_2]^T$  est le vecteur d'état du système.  $f(t)$  et  $g(t)$  sont des fonctions continues.  $d(t)$  est une perturbation externe.

### II.4.2. Conception de la surface de glissement

On définit une surface de glissement comme suit [35]:

$$S = x_2 + \beta x_1^{q/p}. \quad (\text{II.12})$$

Où  $\beta > 0$  et  $p, q$  sont des nombres entiers impairs positifs vérifiant  $p > q$ .

La dérivée de S dans (II.12) :

$$\dot{S} = \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} \dot{x}_1. \quad (\text{II.13})$$

### II.4.3. Calcul de la commande

La condition suffisante pour l'existence de TSM est:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 < -\eta |S|. \quad (\text{II.14})$$

Où  $\eta > 0$ .

La condition (II.14) mène à:

$$S\dot{S} < -\eta |S|. \quad (\text{II.15})$$

Différenciant (II.12) par rapport au temps et à l'aide de (II.15), on a :

$$S \left( \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} \dot{x}_1 \right) < -\eta |S|. \quad (\text{II.16})$$

En substituant **(II.11)** dans cette inégalité, on obtient

$$S(f(t) + g(t) + d(t) + \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} x_2) < -\eta |S|. \quad (\text{II.17})$$

Si  $S > 0$  alors :

$$U < \frac{1}{g(t)} (-\eta - f(t) - d(t) - \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} x_2). \quad (\text{II.18})$$

Si  $S < 0$  alors :

$$U > \frac{1}{g(t)} (-\eta - f(t) - d(t) - \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} x_2). \quad (\text{II.19})$$

Pour vérifier ces deux inégalités **(II.18)** et **(II.19)**, il suffit de prendre  $u$  dans l'expression suivante [35] :

$$U = -\frac{1}{g(t)} (f(t) + d(t) + \beta \frac{q}{p} x_1^{(q-p)/p} x_2 + (\eta + k) \text{sign}(s)). \quad (\text{II.20})$$

Ou  $k > 0$ .

Si  $S(0) \neq 0$ , l'état du système atteint le mode glissant  $S = 0$  dans un temps fini vérifiant [30].

$$t_r \leq \frac{|s(0)|}{\eta}. \quad (\text{II.21})$$

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique **(II.12)** devient alors

$$\dot{x}_1 = -\beta x_1^{q/p}. \quad (\text{II.22})$$

Soit donné un état initial  $x_1(0) \neq 0$ , la dynamique **(II.12)** atteindra l'état 1  $x_1 = 0$  dans un temps fini [34]. La période  $s t$  prise à partir de l'état initial  $1x(0)$  à 0, est déterminée par :

$$t_s = -\beta^{-1} \int_{x_1(0)}^0 \frac{dx_1}{x_1^{q/p}} = \frac{p}{\beta(p-q)} |x_1(0)|^{(p-q)/p}. \quad (\text{II.23})$$

On peut également démontrer que l'équilibre 0 est un attracteur [36], c'est-à-dire. Quand l'état atteint zéro, il restera à zéro pour toujours. Ceci peut être prouvé en prenant une fonction de Lyapunov La dérivée de  $V$  dans **(II.22)** est :

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 = \beta x_1 \dot{x}_1^{q/p} = -\beta x_1^{(p+q)/p}. \quad (\text{II.24})$$

Puisque  $(p+q)$  est pair, alors,  $\dot{V}$  est définie négative, ce qui rend ainsi  $x_1 = 0$  stable (mais pas nécessairement asymptotiquement stable) [36].

Le temps  $t_s$  exigé pour atteindre l'équilibre 0 et qui est déterminé par (II.23) dépend des paramètres  $p, q, \beta$ , et de la valeur initiale  $x_1(0)$ . De même que  $x_1(0)$  est soit fixé ou appartenant à une région limitée connue, on peut choisir  $\beta$  de telle sorte que,  $t_s$  soit très petit [36].

### II.5. Commande par mode glissant terminal rapide des systèmes SISO (FTSM)

Le concept du mode glissant terminal rapide est déterminé par [36], [37]:

$$S = \dot{x}_1 \alpha x_1 + \beta x_1^{q/p} = 0. \quad (\text{II.25})$$

Où  $x_1 \in \mathbb{R}^1$ , est une variable scalaire  $\alpha, \beta > 0$  et  $p, q$  sont des nombres entiers impairs positifs vérifiant  $p > q$ . Il peut être déduit que le temps pour atteindre l'équilibre  $x_1 = 0$  est déterminé par [31], [32] :

$$t_s = \frac{p}{\alpha(p-q)} \ln \frac{\alpha |x_1(0)|^{(p-q)} + \beta}{\beta}. \quad (\text{II.26})$$

La performance de convergence rapide en comparaison avec le mode de glissement linéaire classique peut être démontrée par l'exemple suivant en utilisant Matlab. Considérant  $\alpha = 1, \beta = 1$  et la condition initiale  $x_1(0) = 1$ .

D'abord, on suppose que  $p = 3$  et  $q = 1$ . A partir de (II.26), on peut facilement trouver que le temps d'atteindre zéro est  $t_s = 1.03972077083992$  sec.

Nous comparons maintenant ce qui précède à la situation où  $p$  et  $q$  sont mis à 1. Pour  $p = 3$  et  $q = 1$ ,  $x_1(t_s) = 0.00000009178540$  sec, tandis que le système avec  $p = 1$  et  $q = 1$ ,  $x(t) = 0.12500519281775$  sec.

Il est évident que le taux de convergence du mode glissant terminal rapide est beaucoup mieux que son homologue linéaire (réglage  $p=q$ ). La raison évidente est quand près de l'équilibre, la vitesse de convergence du mode de glissement linéaire ralentit exponentiellement vers le bas tandis que le taux de convergence de la mode glissant rapide accélère de façon exponentielle [37].

La structure hiérarchique basée sur le concept de mode de glissement rapide pour les systèmes d'ordre supérieur peut être utilisée [36], [37] :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= S_0 + \alpha_0 S_0 + \beta_0 S_0^{q/p} . \\
 S_2 &= S_1 + \alpha_1 S_1 + \beta_1 S_1^{q_1/p_1} . \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 S_{n-1} &= S_{n-2} + \alpha_{n-2} S_{n-2} + \beta_{n-2} S_{n-2}^{q_{n-2}/p_{n-2}} .
 \end{aligned} \tag{II.27}$$

Où  $\alpha_i, \beta_i > 0$ , et  $p, q$  ( $p > q$ ) sont des nombres entiers impairs positifs et  $i = 1, 2, \dots, n-2$ .

C'est évident que, si  $n-1$   $S$  atteint zéro,  $S_{n-2}, S_{n-3}, \dots, S_0$  atteindront zéro séquentiellement.

La commande par mode glissant  $u$  peut être conçue de sorte que

$$S_{n-1} \dot{S}_{n-1} \leq -k |S_{n-1}|, k > 0. \tag{II.28}$$

Ce qui représente un état suffisant. Par conséquent  $S_{n-1} = 0$  peut être atteint dans un temps fini, ainsi que  $x_1 = 0$  [36].

Prenant  $S_0 = x_1$ ,  $S_i$  peut être exprimé comme suit [37] :

$$S_i = \dot{S}_{i-1} + \alpha_{i-1} S_{i-1} + \beta_{i-1} S_{i-1}^{q_{i-1}/p_{i-1}}. \tag{II.29}$$

La dérivée  $l^{\text{ème}}$  de  $S_i$  est donnée par l'équation suivante :

$$S_i^{(l)} = \dot{S}_{i-1}^{(l)} + \alpha_{i-1} S_{i-1}^{(l)} + \beta_{i-1} \frac{d^{(l)}}{dt^{(0)}} S_{i-1}^{q_{i-1}/p_{i-1}}. \tag{II.30}$$

Prenant la dérivée d'ordre 1 de  $S_{n-1}$  on obtient l'équation suivante :

$$\dot{S} = \ddot{S}_{n-2} + \alpha_{n-2} \dot{S}_{n-2} + \beta_{n-2} \frac{d}{dt} S_{n-2}^{q_{n-2}/p_{n-2}}. \tag{II.31}$$

Ensuite, il peut facilement être induit étape par étape jusqu'à l'équation suivante est arrivée [37]:

$$\dot{S} = S_0^n + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k S_k^{n-k-1} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} S_k^{q_k/p_k}. \quad (\text{II.32})$$

A partir de (II.31), Prenant  $S_{n-1}$  comme suivant :

$$\dot{S}_{n-1} = -\phi S_{n-1} - \gamma S_{n-1}^{q/p}. \quad (\text{II.33})$$

Avec  $\phi, \gamma > 0$ , et  $p, q$  sont des nombres entiers impairs positifs vérifiant  $p > q$ .

Alors pour le système (II.1), la loi de commande est donnée par l'équation suivant :

$$U = -\frac{1}{g(x)} \left( f(x) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k S_k^{n-k-1} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} S_k^{q_k/p_k} + \phi S_{n-1} + \gamma S_{n-1}^{q/p} \right). \quad (\text{II.34})$$

Avec  $S_0 = x_1$  alors les états du système atteindra la surface de glissement  $S_{n-1} = 0$  selon

l'attracteur terminal  $\dot{S}_{n-1} = -\phi S_{n-1} - \gamma S_{n-1}^{q/p}$  dans un temps fini  $t_{s_{n-1}}$ . où

$$t_{s_{n-1}} = \frac{p}{\phi(p-q)} \ln \frac{\phi |x_1(0)|^{(p-q)} + \gamma}{\gamma}. \quad (\text{II.35})$$

Avec  $\phi, \gamma > 0$ , et  $p, q$  sont des nombres entiers impairs positifs vérifiant  $p > q$ . Le système suit la structure hiérarchique (II.27) pour converger vers l'équilibre du système en temps fini [37].

### II.5.1. Etude de la stabilité

On considère l'équation de Lyapunov suivante [38] :

$$V = \frac{1}{2} S_{n-1}^2. \quad (\text{II.36})$$

La dérivée de  $V$  par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = S_{n-1} \dot{S}_{n-1}. \quad (\text{II.37})$$

Substituant (II.33) dans (II.37), on obtient

$$\dot{V} = -\phi S_{n-1}^2 - \gamma S_{n-1}^{q+p/p}. \quad (\text{II.38})$$

Puisque  $p, q$  sont des nombres entiers impairs positifs,  $(p+q)$  est pair, alors,  $\dot{V}$  est définie négative. Donc le système est stable [38].

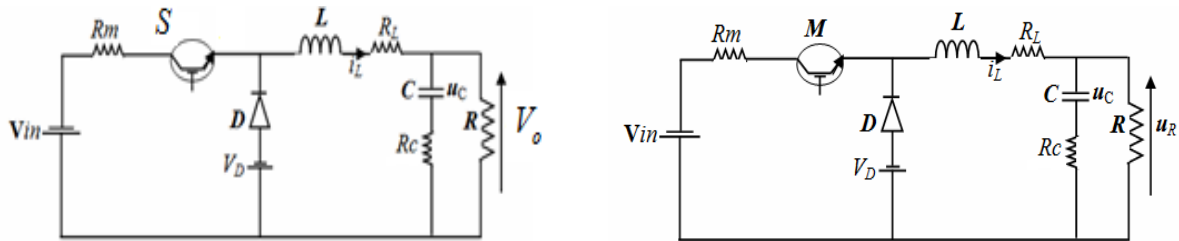
### ➤ Remarque

Le mécanisme peut facilement être étendue à la conception du problème de poursuite de sortie si  $y$  est remplacé par  $e = y_m - y$  où  $y_m$  est le signal de sortie désiré.

## II.6. Commende par mode glissant terminal (TSMC) d'un convertisseur DC-DC dévolteur ayant un modèle global

### II.6.1. Formulation du modèle

Les équations dynamiques d'un convertisseur DC-DC dévolteur (Fig. III.10) présentant des éléments parasites s'écrivent [39]:



**Figure. II.1.** Schéma du circuit équivalent d'un convertisseur abaisseur avec éléments parasites

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X) + g(X)u. \\ y(t) = BX. \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

où  $X = [i_L \ V_c]^T$ ;  $y(t) = V_o$ ;  $i_L(t)$  et  $V_c(t)$  désignent respectivement le courant de l'inductance et la tension du condensateur,  $V_o(t)$  la tension de sortie;  $u$  le rapport cyclique du signal PWM du convertisseur abaisseur; tandis que les autres fonctions sont définies comme:

$$\begin{aligned}
f(X) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \left[ R_L + \frac{RR_c}{R+R_c} \right] & -\frac{R}{L(R+R_c)} \\ \frac{R}{C(R+R_c)} & -\frac{1}{C(R+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \\
g(X) &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} R_m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} (V_D + V_{in}) \\ 0 \end{bmatrix} \\
B &= \begin{bmatrix} \frac{RR_c}{R+R_c} & \frac{R}{R+R_c} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{II.40}$$

Soit  $y_d$  la valeur de la tension désirée et si l'erreur de suivi est définie par:  $e(t) = y(t) - y_d$ , l'objectif de la commande par mode glissant terminal est de s'assurer que l'erreur de poursuite converge vers zéro en un temps fini. On définit en premier lieu, la fonction de glissement terminal par:

$$s(t) = e_1 + \lambda e. \tag{II.41}$$

Où  $\dot{e}_1 = e^{p/q}$  (c'est à dire  $e_1 = \int_0^t e^{p/q}(\tau) d\tau$ );  $\delta$  est une constante positive;  $p$  et  $q$  sont des entiers impairs positifs. Quand  $s = 0$ , l'équation (II.41) donne:

$$\begin{cases} \dot{e} = -\delta e^{p/q} \\ \dot{e}_1 = -\delta^{p/q} e_1^{p/q} \end{cases} \tag{II.42}$$

Les temps de convergence de  $e(t)$  et  $e_1(t)$  sont respectivement [39]:

$$\begin{aligned}
t_e &= \frac{|e(0)|^{1-\frac{p}{q}}}{\delta \left(1 - \frac{p}{q}\right)} \\
t_{e_1} &= \frac{|e_1(0)|^{1-\frac{p}{q}}}{\delta^{p/q} \left(1 - \frac{p}{q}\right)} \\
q &\succ p \succ 0.
\end{aligned} \tag{II.43}$$

### Théorème 1

Pour le convertisseur abaisseur(II.39), si la loi de commande  $u$  avec la fonction de glissement terminal (II.41) est donnée par:

$$u = \frac{1}{Bg(X)} \left[ -\delta e^{p/q} - \delta k \text{sign}(s) - Bf(X) \right]. \quad (\text{II.44})$$

Où  $k, \delta > 0, q > p > 0$ , alors la commande par mode glissant terminal garantit une stabilité convergente en temps fini.

### Démonstration

Pour prouver ce théorème, dérivons l'équation (II.41), selon les équations dynamiques du convertisseur (II.39), on obtient:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= e^{p/q} + \frac{1}{\delta} \dot{e} \\ &= (BX - y_d)^{p/q} + \frac{1}{\delta} (Bg(X)u + Bf(X)) = -k \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

Où la loi de commande (II.44) a été appliquée. La condition  $s\dot{s} < 0$  est évidemment satisfaite. La fonction de glissement va ainsi converger vers zéro en temps fini, c'est à dire que  $s \rightarrow 0$  pour  $t \in [0, T]$ . En plus, et vu que  $s = 0$ , l'erreur  $e(t)$  présente une convergence terminale, donc l'erreur converge vers zéro en temps fini.

### II.6.2. Résultats de simulation

Les caractéristiques du convertisseur abaisseur considéré dans la simulation sont:  $V_{in} = 20V, V_o = y_d = 5V$ . Les valeurs des paramètres du convertisseur sont:  $L = 98.58\mu H, R_l = 48.5m\Omega, C = 202.5\mu F, R_c = 162m\Omega, V_n = 0.82V, R_m = 0.27\Omega, \text{ et } R = 6\Omega$

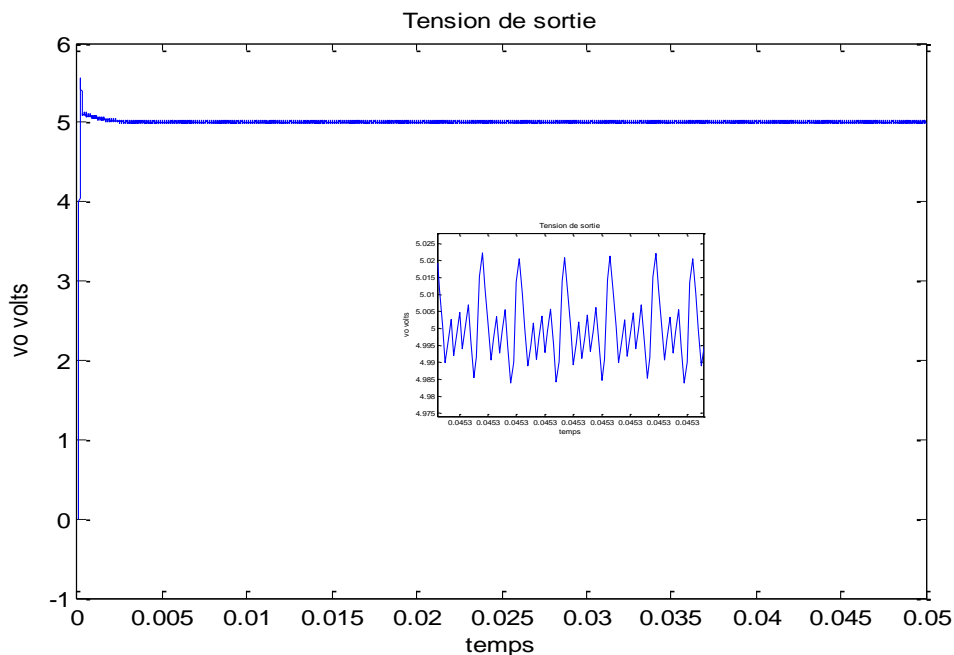
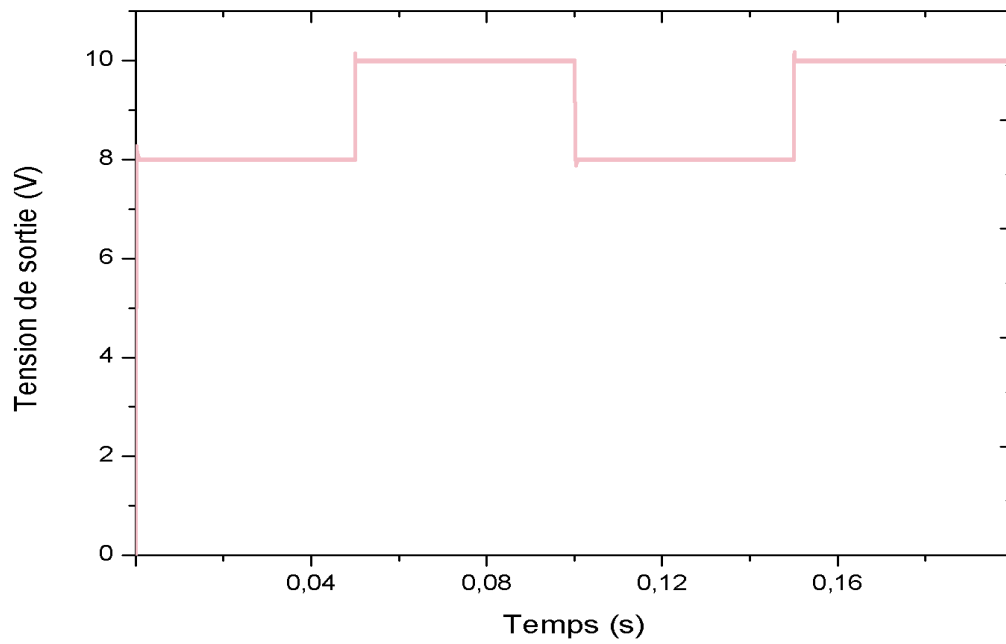
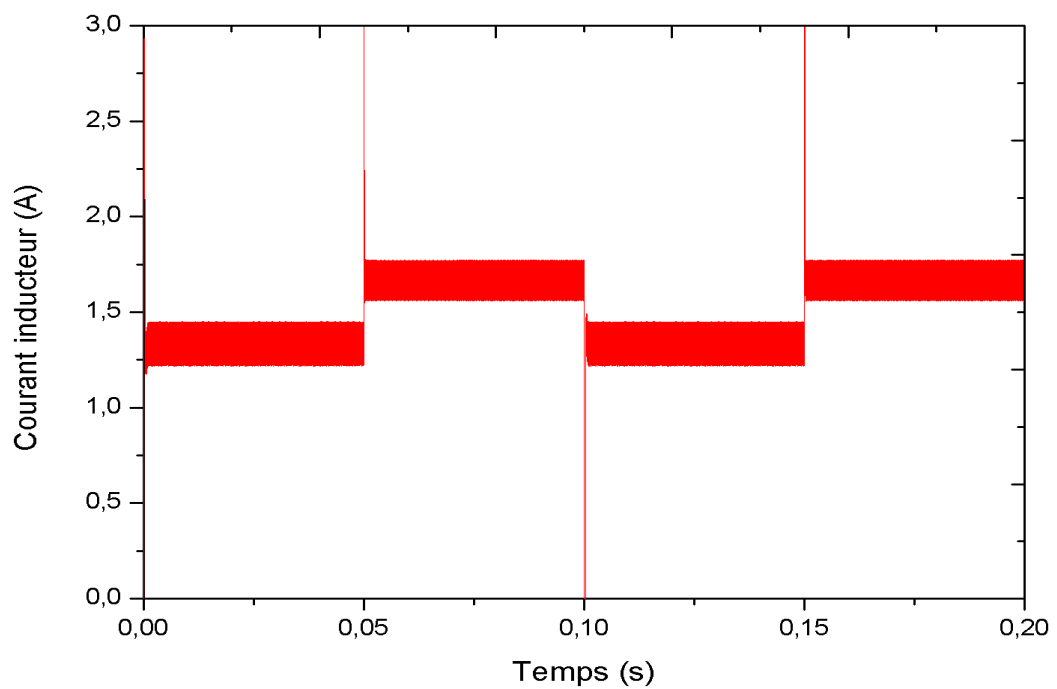


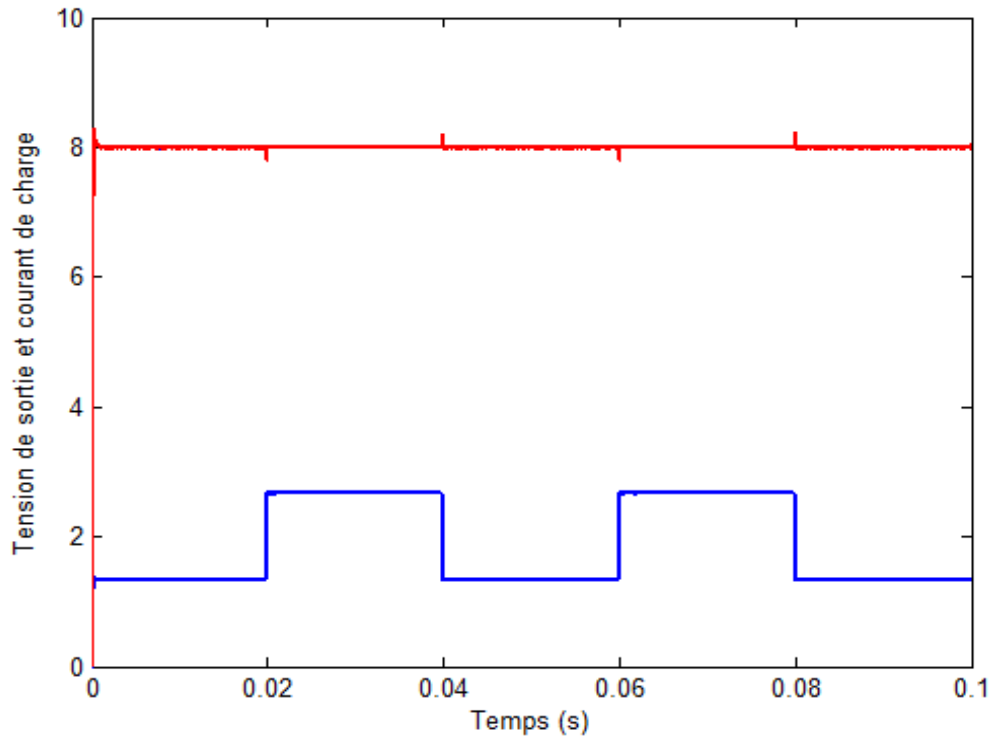
Figure. II.1 : Tension de sortie du convertisseur abaisseur pour  $V_{ref} = 5V$ .



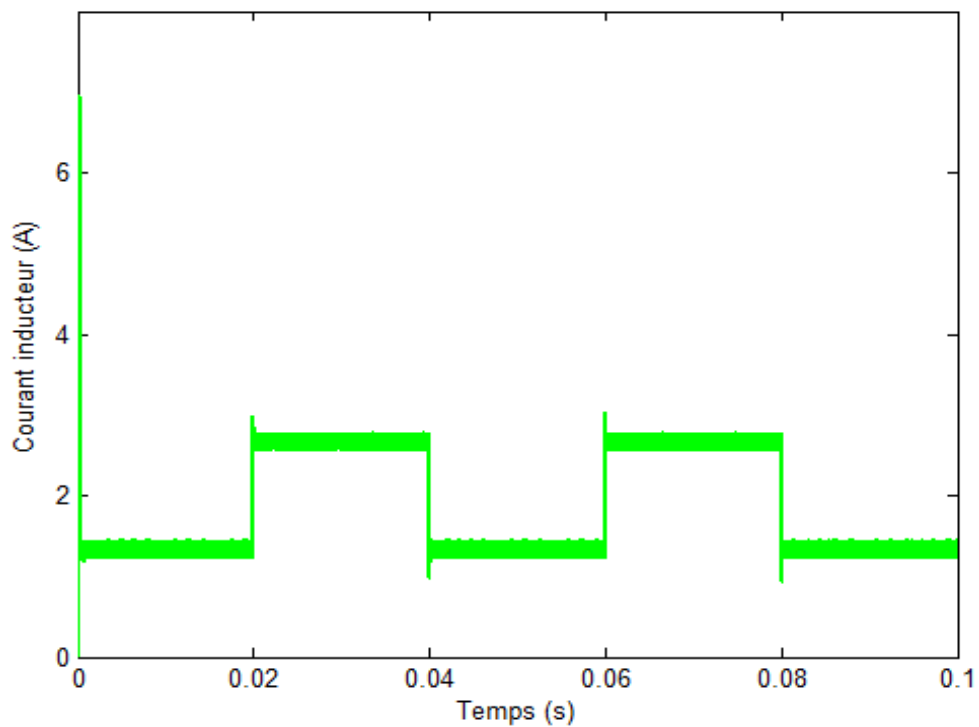
**Figure. II.2 :** Tension de sortie du convertisseur abaisseur pour une variation de la tension de référence de 8 à 10 à 8 à 10 volts.



**Figure. II.3 :** Courant inducteur du convertisseur abaisseur pour une variation de la tension de référence de 1.25 à 1.75 à 1.25 à 1.75 volts.



**Figure. II.4 :** Tension de sortie et courant charge du convertisseur abaisseur pour une variation de charge de 6 à 3 à 6 à 3 ohms.



**Figure. II.5 :** Evolution du courant inducteur du convertisseur abaisseur pour une variation de charge de 6 à 3 à 6 à 3 (A).

Différents scénarios ont été utilisés pour tester la robustesse de la commande par mode glissant terminale et les résultats de simulation sont illustrés dans les figures fig. II.2 et fig. II.4, On peut y observer une bonne poursuite du signal de référence qui varie de 8 à 10 à 8 à 10 *Ohms* en fig II.2 et 8 *Ohms* en fig. II.4, par la tension de sortie. Le courant de charge du convertisseur abaisseur par commande TSMC avec variation de la tension de référence de 1,25 à 1.75 à 1.25 à 1.75 (A) en fig. II.3 et 1,5 à 3 à 1,5 à 3 (A) est montré en fig. II.5.

Un autre test est réalisé dans le but d'évaluer les performances en robustesse en faisant varier de façon alternée de la charge entre 6 et 3 *Ohms*. Les figures fig. II.4 à fig. II.5 illustrent un bon suivi et ce malgré les conditions de test extrêmes utilisées, à savoir une variation de charge.

## **II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a revu en détail différentes techniques s'appuyant sur la commande par mode glissant, à savoir la commande par mode glissant terminal (**TSMC**). Cette dernière est une commande robuste qui réduit l'erreur du système en régime permanent et présente un temps de convergence fini. La commande **TSMC** sera utilisée dans le prochain chapitre pour la commande des systèmes photovoltaïques.

## **CHABITREIII:**

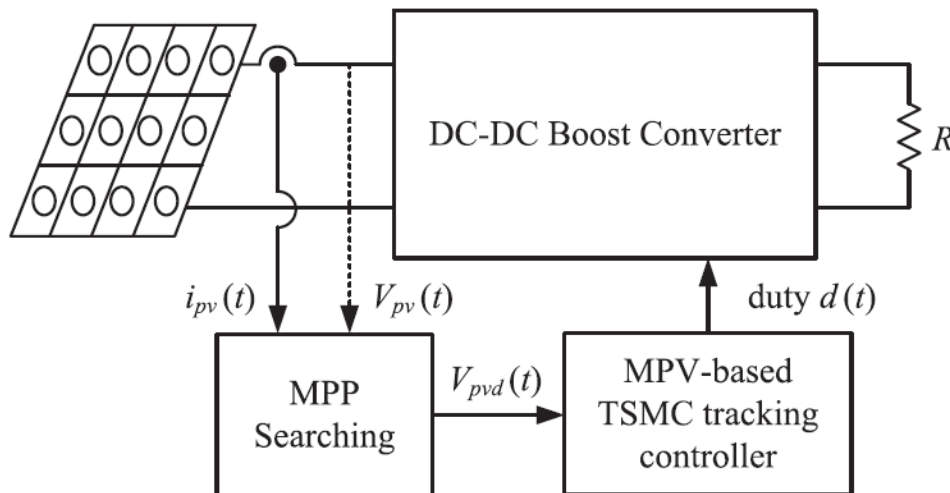
Commande par mode glissant  
terminal d'un système PV

### III.1. Introduction :

Le transfert d'énergie renouvelable est effectué toujours à l'aide d'un étage d'adaptation inséré entre la charge et le système d'énergie à savoir les systèmes PV. Cet étage d'adaptation doté par une commande MPPT modifiant la valeur du rapport cyclique pour maximiser la puissance produite par le générateur PV. C'est à dire, la commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum. Dans ce chapitre, nous exposons le principe de la recherche du PPM et présentons une classe de commande MPPT non linéaire basée sur l'approche par mode glissant terminale.

### III.2. Recherche du point de puissance maximale :

Le principe de la commande MPPT consiste à effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [40]. La figure.III.1 représente une chaîne de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.



**Figure.III.1:** Chaîne de conversion photovoltaïque.

Actuellement, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale [41], [42], Perturbation et Observation (Perturb and Observe : P&O) est l'algorithme le plus couramment utilisé.

### III.3. Commande MPPT basée sur le mode glissant terminale :

Pour développer un contrôleur MPPT basé sur la commande par mode glissant terminale, il est nécessaire de modéliser le système et de choisir une surface de glissement, de telle façon que si cette dernière est nulle le point de puissance maximale PPM est atteint, puis on calcule la loi de commande agissante au convertisseur. La modélisation de ce système est représentée dans le premier chapitre [42], la dynamique du système PV est écrite :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= \frac{-1}{C_1} i_L + \frac{i_{pv}}{C_1}. \\ i_L &= \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{R_C(1-d)}{L \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} i_L + \frac{1-d}{L} \left( \frac{R_C}{R+R_C} - 1 \right) V_{C2} - \frac{V_D(1-d)}{L}. \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{1-d}{C_2 \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} - \frac{1}{C_2(R+R_C)} V_{C2}. \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

Avant la conception de la loi de commande [42], on considère soit  $x_1(t) = V_{pv}(t)$ ,  $x_2(t) = i_L(t)$ ,  $x_3(t) = V_{C2}(t)$ ,  $x_{1d}(t) = V_{pvd}(t)$  et la dynamique du système se réécrit comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{1}{C_1} (-x_2 + i_{pv}). \\ \dot{x}_2 &= f_1(x) + g_1(x)d(t). \\ \dot{x}_3 &= f_2(x) + g_2(x)d(t). \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Où :  $x = [x_1, x_2, x_3]^T$  ;

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{x_1}{L} - \frac{R_C}{L \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} x_2 + \frac{1}{L} \left( \frac{R_C}{R+R_C} \right) x_3 - \frac{V_D}{L}. \\ g_1(x) &= -\frac{R_C}{L \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} x_2 + \frac{1}{L} \left( \frac{R_C}{R+R_C} \right) x_3 - \frac{V_D}{L}. \\ f_2(x) &= \frac{1}{C_2 \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} x_2 - \frac{1}{C_2(R+R_C)} x_3. \\ g_2(x) &= -\frac{1}{C_2 \left(1 + \frac{R_C}{R}\right)} x_2. \end{aligned}$$

En définissant l'erreur de suivi de la tension du générateur et sa dérivée temporelle :

$$\begin{aligned} e_1 &= x_1 - x_{1d} \\ \dot{e}_1 &= \frac{1}{C_1}(-x_2 + i_{pv}) - \dot{x}_{1d} \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

En prenant  $x_2$  comme une entrée de commande virtuelle, nous définissons une erreur de suivi auxiliaire  $e_2 = x_2 - x_{2d}$  avec  $x_{2d} = i_{pv} - C_1 \dot{x}_{1d}$  [43].

Ensuite, la nouvelle dynamique de l'erreur est obtenue comme suit :

$$\dot{e}_1 = \frac{-e_2}{C_1}. \quad (\text{III.4})$$

$$\dot{e}_2 = f_1(x) - \dot{x}_{2d} + g(x)d(t). \quad (\text{III.5})$$

Où  $\dot{x}_{2d} = i_{pv} - C_1 \ddot{x}_{1d}$ .

Maintenant, le concept d'attraction terminal est inclus ici et synthétisé avec la commande par mode glissant pour construire le schéma TSMC proposé. Tout d'abord, nous introduisons le concept de la TSMC. On choisit la surface de glissement terminale comme suite [43]:

$$s = e_2^r - \alpha e_1. \quad (\text{III.6})$$

Où  $\alpha > 0$ ,  $r = p/q$ , avec  $1 < r < 2$ ;  $p$  et  $q$  sont entiers impairs satisfaisant  $0 < q < p < 2q$ . Si  $s(t)$  est toujours maintenu à zéro tel que

$$e_2 = \alpha^{1/r} e_1^{1/r}. \quad (\text{III.7})$$

L'erreur Eq. (III.4) devient :

$$\dot{e}_1 = -\frac{\alpha^{1/r}}{C_1} e_1^{1/r}. \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant (III.7) dans (III.4).  $e_1$  converge vers zéro en un temps fini:

$$t_{e1} = C_1 \frac{|e_1(0)|^{1-\frac{q}{p}}}{\alpha^{q/p} \left(1 - \frac{q}{p}\right)}. \quad (\text{III.9})$$

Du fait que  $e_2 = \alpha^{1/r} e_1^{1/r}$  sur la surface  $s(t) = 0$ , la convergence de l'erreur de suivi  $e_2$  s'accomplit dans le même temps fini (III.9). Par conséquent, si le système est piloté à la surface de glissement  $s(t) = 0$ , les erreurs  $e_1$  et  $e_2$  convergentes de zéro en temps fini, c'est-à-dire que  $V_{pv}$  suit toujours le MPP désirée  $V_{pvd}$  [44].

Ensuite, sur la base de la définition de la fonction de mode glissant, la dérivée temporelle de la fonction glissante terminale  $s(t)$  le long de (III.4) et (III.5) donnée par [44].

$$\begin{aligned} \dot{s} &= r e_2^{r-1} \dot{e}_2 - \alpha \dot{e}_1 \\ &= r e_2^{r-1} \left[ f_1(x) - \dot{x}_{2d}(t) + g(x)d(t) \right] + \frac{\alpha e_2}{C_1}. \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

Pour amener  $s(t)$  à zéro, l'entrée de commande  $d(t)$  est conçue comme suit :

$$d(t) = \frac{1}{g(x)} \left[ \frac{-\alpha e_2^{2-r}}{r C_1} - f_1(x) + \dot{x}_{2d}(t) - K \text{sign}(s) \right]. \quad (\text{III.11})$$

où  $K > 0$  et  $g_1(x) \neq 0$  pour tout  $x(t)$ . En remplaçant le au-dessus de la loi de commande dans la dynamique (III.10), le système en boucle fermée est obtenu ci-dessous :

$$\dot{s} = -K * r e_2^{r-1} \text{sign}(s). \quad (\text{III.12})$$

Par la suite, la conception TSMC réalise le suivi MPV avec le théorème suivant où la condition de stabilité détaillée.

### ➤ Théorème 1.

Considérons le système photovoltaïque (fig : III.1) en utilisant la commande TMSC (18) avec  $K > 0$ . Le système en boucle fermée est assurée le suivi de la tension MPP avec une convergence à temps fini [42].

#### III.3.1. Analyse robustesse

Jusqu'à présent, seul un modèle d'un système nominal a été utilisé, ce qui n'est pas réaliste [45]. Ce problème est résolu par l'introduction d'incertitudes paramétriques sur la dynamique du système. Supposons que le système d'incertitudes sous la forme:

$$\begin{aligned} \hat{f}_1 &= f_1 + \Delta f_1. \\ \hat{g}_1 &= g_1 + \Delta g_1. \\ \hat{\dot{x}}_{2d} &= \dot{h}_c + \Delta h_c. \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

Où  $\hat{f}_1$ ,  $\hat{g}_1$  et  $\hat{h}_c$  sont connus et mesurables ;  $\Delta f_1$ , et  $\Delta h_c$  sont les parties incertaines résultant de l'incertitude du système. Ces incertitudes satisfont les conditions suivantes :

$$\varpi^{-1} \leq \hat{g}_1 / g_1 \leq \varpi. \quad (\text{III.14})$$

$$|\Delta f_1| < F. \quad (\text{III.15})$$

$$|\Delta h_c| < H.$$

Où  $\hat{g}_1$  ;  $g_1 \neq 0$  et  $0 < \varpi < 1$  ;  $F$  et  $H$  sont connus supérieures limites de la dynamique incertaine  $\Delta f_1$  et  $\Delta h_c$ , respective- activement. Il est intéressant de noter que  $\hat{h}_c$  est la partie nominale de  $\dot{x}_{2d}$ , qui est obtenu à partir de l'approximation de la différence de  $\dot{x}_{2d}$ . En d'autres termes, le terme  $\Delta h_c$  présente le dérivé de l'erreur d'approximation. Pour le modèle incertain du système la commande terminale en utilisant la surface de glissement (III.6) est donnée par :

$$\dot{s} = re_2^{r-1} \left[ \hat{f}_1 + \Delta f_1 - \hat{h}_c - \Delta h_c + (\hat{g}_1 + \Delta g_1) d(t) \right] + \frac{\alpha e_2}{C_1}. \quad (\text{III.16})$$

$$d(t) = \frac{1}{\hat{g}_1} \left[ \frac{-\alpha e_2^{2-r}}{rC_1} - \hat{f}_1 + \hat{h}_c - K^* \sin g(s) \right]. \quad (\text{III.17})$$

La substitution de (25) dans (24) donne l'équation suivante :

$$\dot{s} = re_2^{2-r} \left[ \Delta f_1 - \Delta h_c + \hat{h}_c - g_1 \hat{g}_1^{-1} K^* \sin g(s) \right] + re_2^{r-1} (g_1 - \hat{g}_1) \hat{g}_1^{-1} \left( \frac{-\alpha e_2^{2-r}}{rC_1} - \hat{f}_1 + \hat{h}_c \right). \quad (\text{III.18})$$

La stabilité et la robustesse du contrôleur sont revues ici en utilisant la théorie de la stabilité selon Lyapunov. Si le gain de commande  $K^*$  satisfait l'inégalité suivante

$$K^* > \varpi (|\Delta f_1| + |\Delta h_c| + \eta + |\varpi - 1| \left( \frac{\alpha}{rC_1} |e_2^{2-r}| + \left| \hat{f}_1 \right| + \left| \hat{h}_c \right| \right)). \quad (\text{III.19})$$

### III.4. Résultats de simulation

Le système photovoltaïque PV est modélisé et mis en œuvre dans le logiciel Matlab/Simulink afin d'évaluer les performances de l'algorithme proposé TSMC. Le système PV est constitué d'un générateur PV de type *BP585*, d'un convertisseur élévateur DC-DC, d'une charge et du bloc de contrôle MPPT. Les paramètres du module PV *BP585* sont présentés dans le tableau : III.1. La tension d'entrée du convertisseur DC-DC est réglée à 18V, la valeur de l'inductance est égale à 22.5mH, le condensateur d'entrée à 132 $\mu$ F, le condensateur de sortie à 66 $\mu$ F et la charge résistive de sortie à 12 $\Omega$ .

Paramètres	Valeurs numériques
Puissance maximale $P_{\max}$ (W)	84.96
Tension à la puissance maximale $V_{MPP}$ (V)	18
Courant à la puissance maximale $I_{MPP}$ (A)	4.72
Tension du circuit ouvert $V_{CO}$ (V)	22.1
Courant de court-circuit $I_{SC}$ (A)	5
Coefficient de température de $V_{CO}$ (% / deg.C)	-0.8
Coefficient de température de $I_{CC}$ (% / deg.C)	0.00065

**Tableau .III.1 :** Spécifications du système.

Plusieurs simulations ont été réalisées en tenant compte des variations des conditions climatiques à savoir l'éclairement et la température. Les résultats obtenus sont présentés pour une durée de 1 seconde.

#### Cas 1 : Conditions climatiques standards.

Dans ce cas, les paramètres de simulation (la température  $T$  et l'éclairement  $S$ ) sont maintenus constants  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et  $S = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Les figures : III.1-III.4 montrent les résultats de simulation de la puissance  $P_{PV}$ , du courant  $I_{PV}$ , de la tension  $V_{PV}$ , de la tension de sortie  $V_0$  du convertisseur.

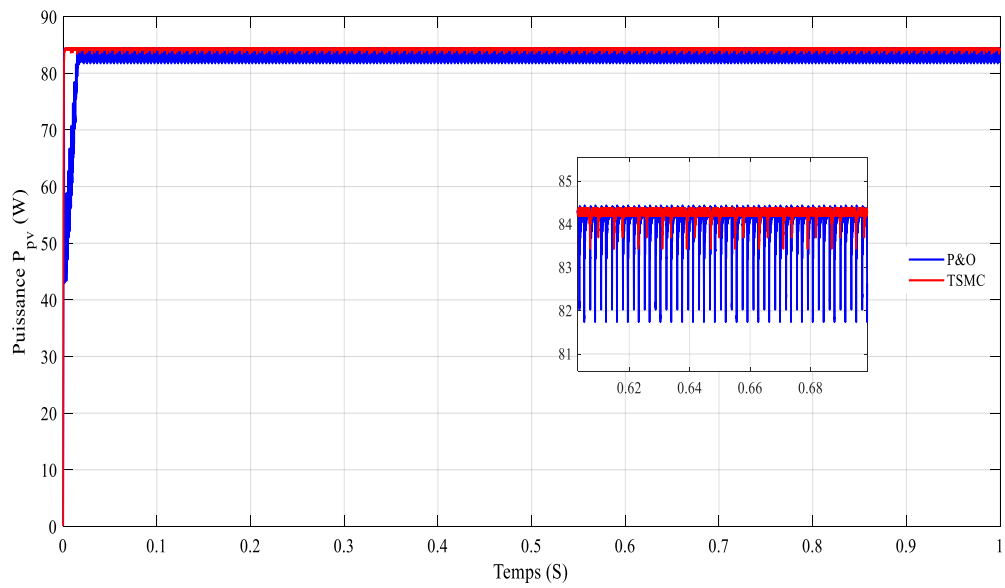


Figure : III.1. Evolution de la puissance  $P_{PV}$  du panneau.

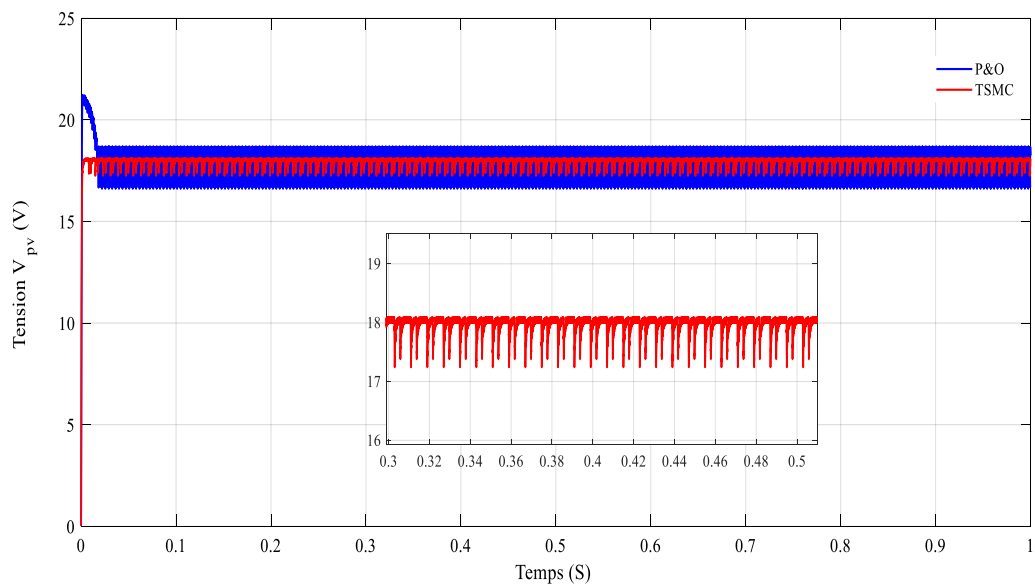
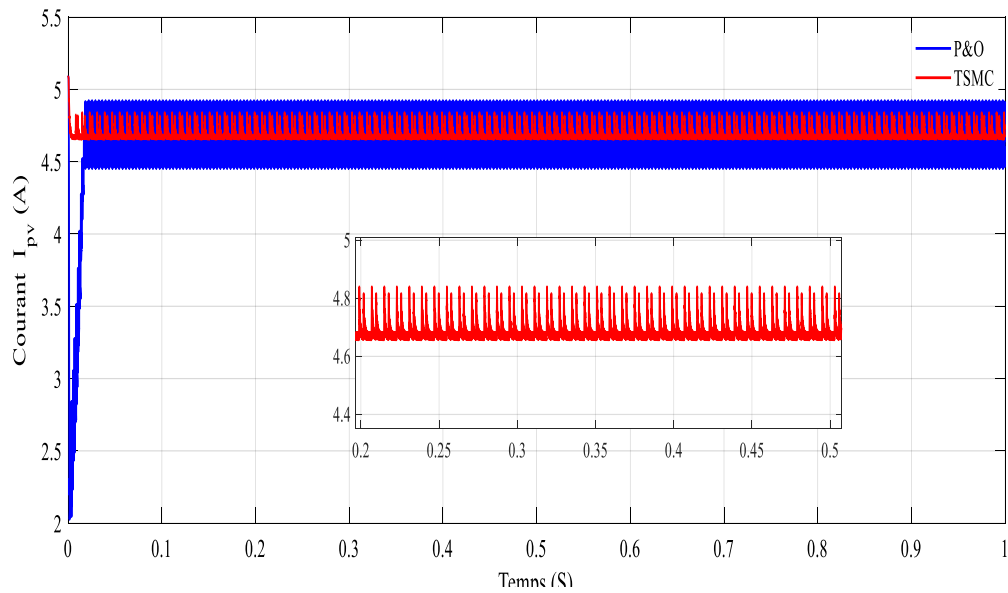
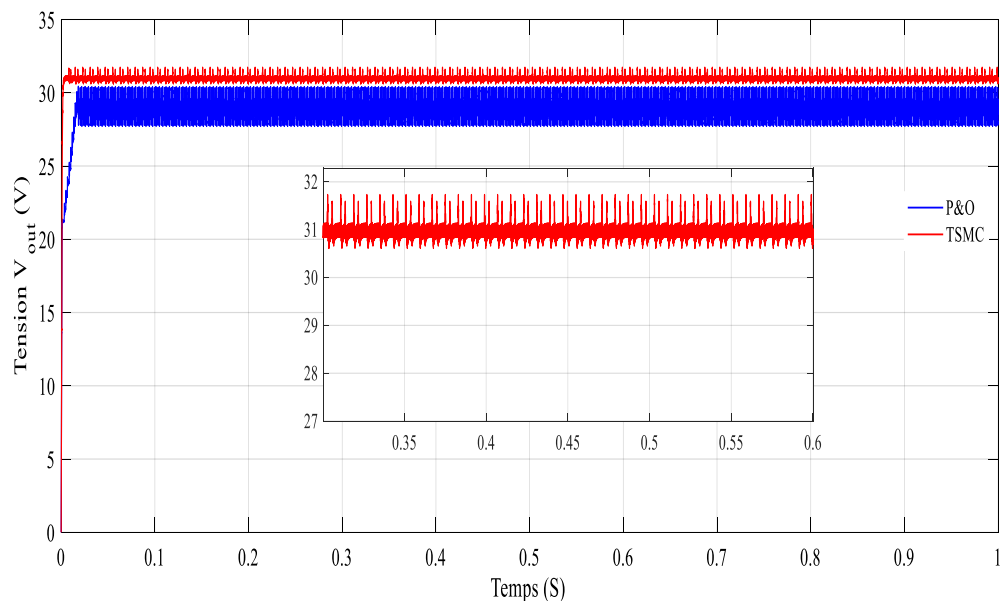


Figure : III.2. Evolution de la tension  $V_{PV}$  du panneau.



**Figure : III.3.** Evolution du courant  $I_{PV}$  du panneau.



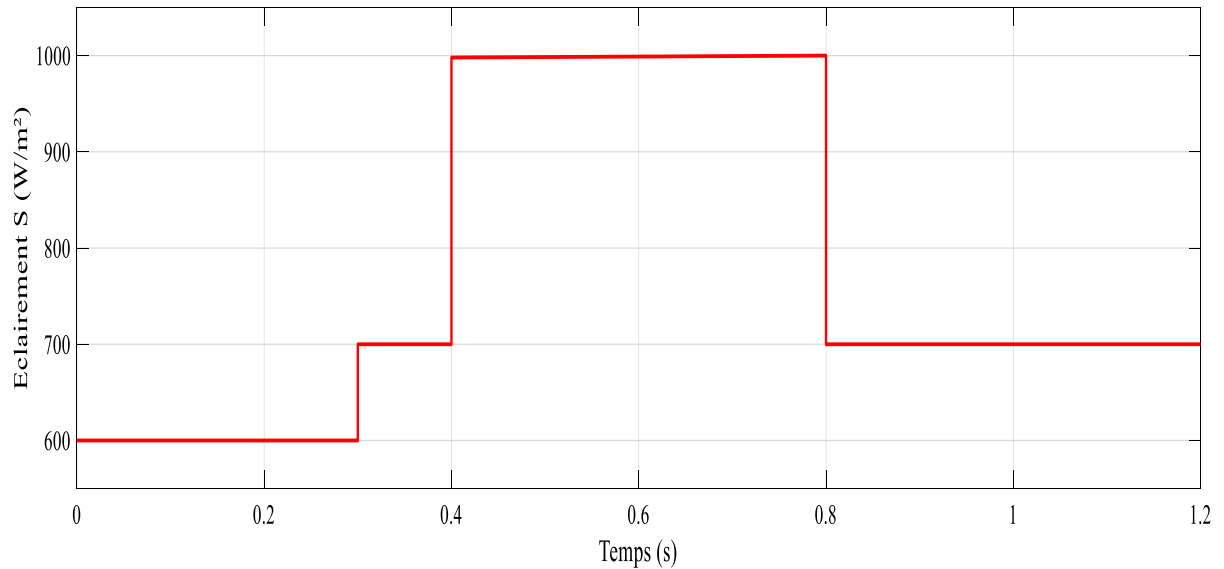
**Figure : III.4.** Evolution de la tension de sortie  $V_0$ .

D'après ces résultats, on constate l'approche utilisée (TSMC) est en mesure de suivre correctement le MPP et fournit un temps de réponse très court (2 ms).

L'objectif de la section suivante est de faire varier les deux paramètres influant sur les chaînes de conversion PV, à savoir les conditions climatiques  $S$  et  $T$ . Pour chaque test, on garde constant un paramètre et on varie le deuxième par un changement brusque.

**Cas 2 : Eclairement variable.**

Afin de voir l'effet d'une variation de l'éclairement, un profil de référence est appliqué tout en fixant la température à 25°C. Ce profil est illustré sur la figure suivante :



**Figure : III.5.** Variation de l'éclairement en fonction du temps.

Dans ces conditions, les caractéristiques du système PV sont montrées sur la figure suivante :

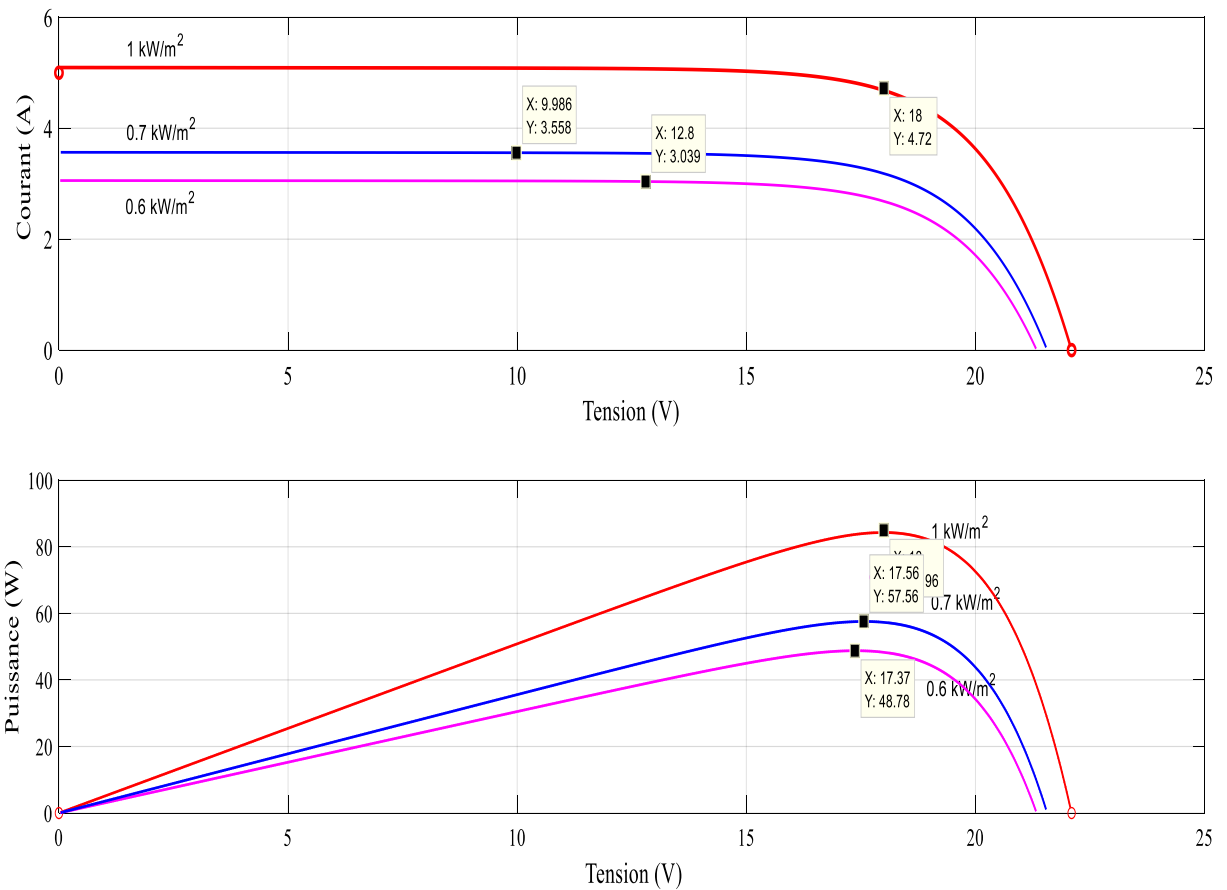


Figure : III.6. Caractéristiques du panneau PV.

Les résultats de simulation correspondants sont illustrés sur les figures : III.7-III.10. On constate qu'au démarrage du profil, le TSMCA traque le PPM d'une durée d'environ 12 ms.

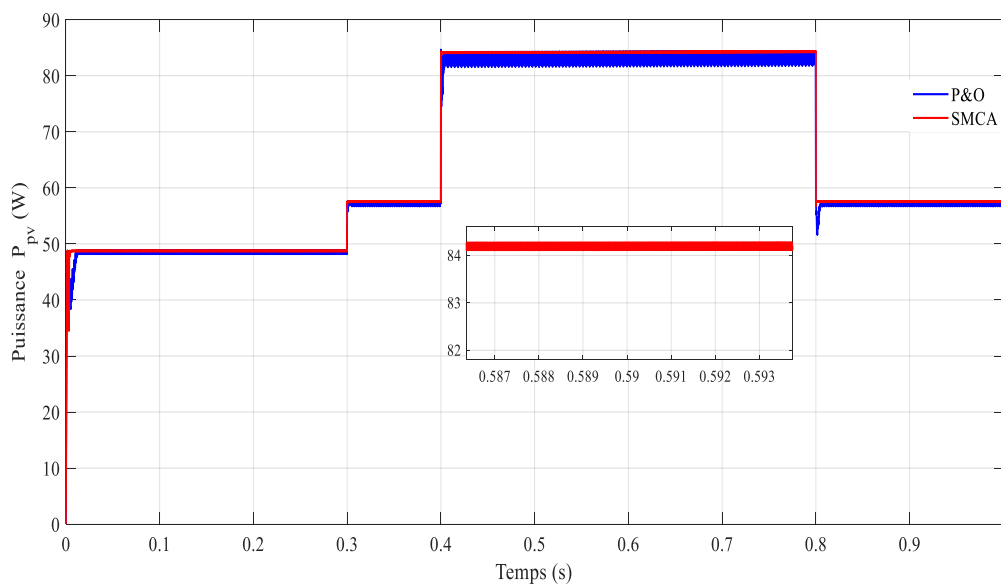


Figure : III.7. Evolution de la puissance  $P_{PV}$  du panneau.

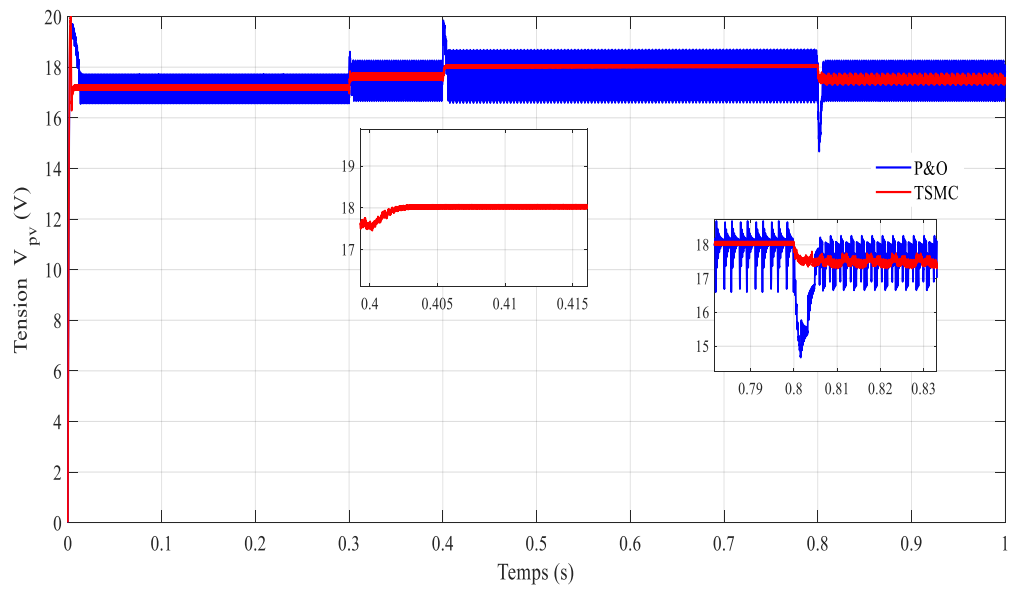


Figure : III.8. Evolution de la tension  $V_{pv}$  du panneau.

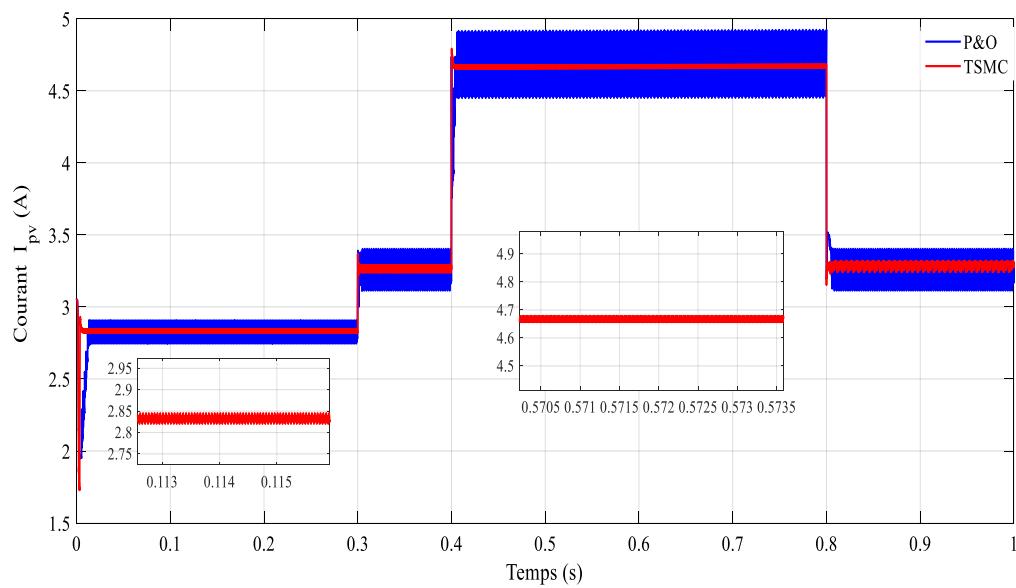
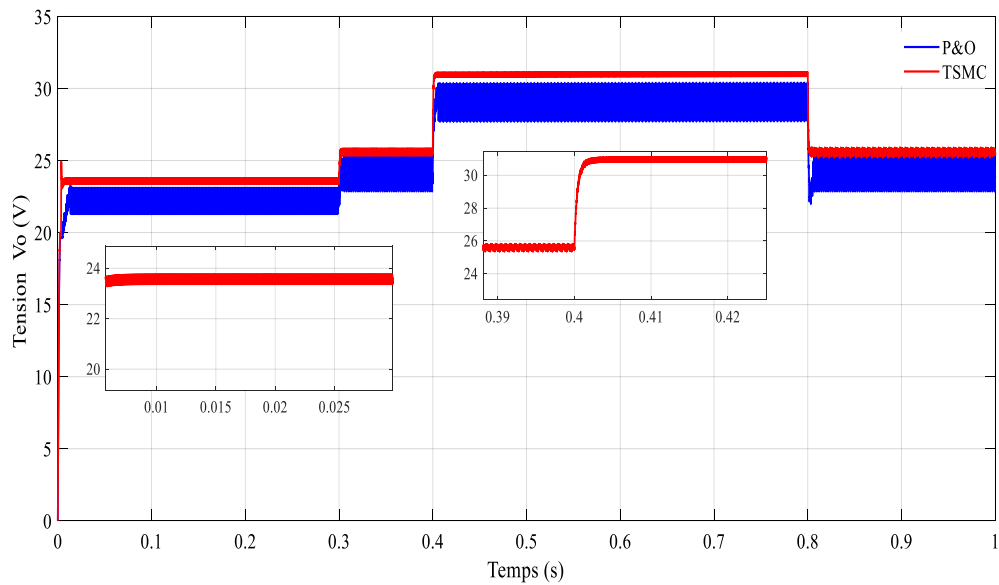


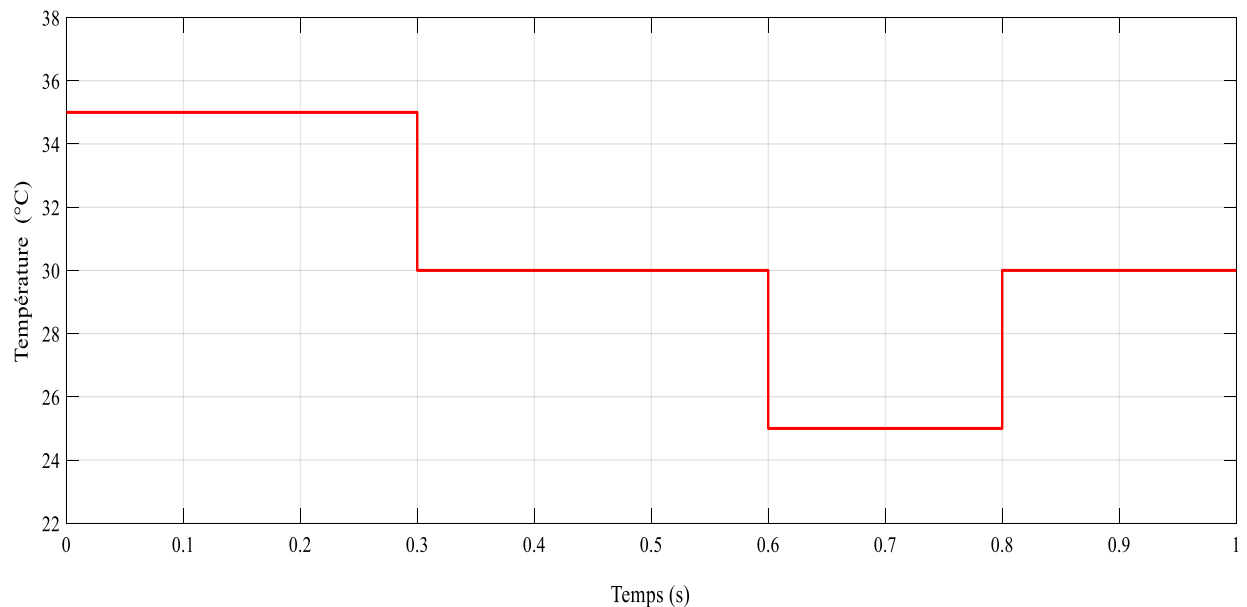
Figure : III.9. Evolution du courant  $I_{pv}$  du panneau.



**Figure : III.10.** Evolution de la tension de sortie  $V_o$ .

### Cas 3 : Température variable.

Un autre facteur qui influence la caractéristique du générateur PV est la température  $T$ . On maintient le niveau de l'éclairement à une valeur constante ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et on fait varier la température selon la figure suivante :



**Figure : III.11.** Variation de la température en fonction du temps.

Les caractéristiques du système PV dans ces conditions sont montrées sur la figure suivante :

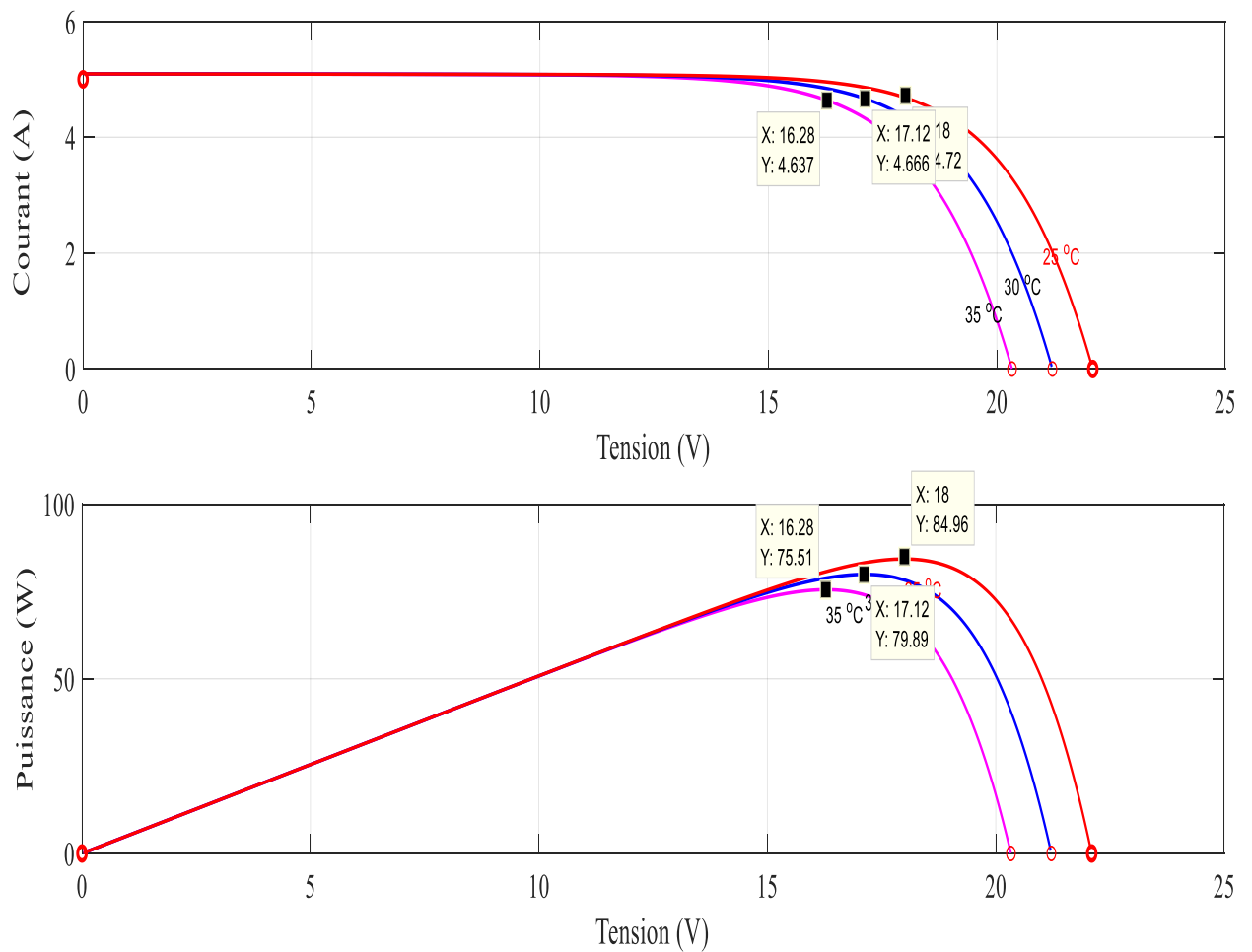


Figure : III.12. Caractéristiques du panneau PV.

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures : III.13- III.16.

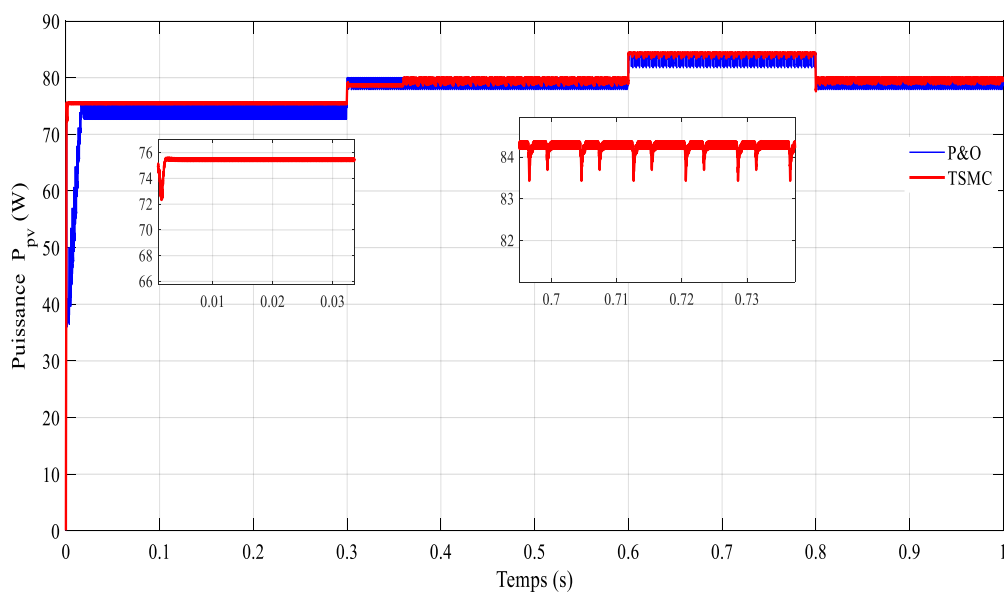
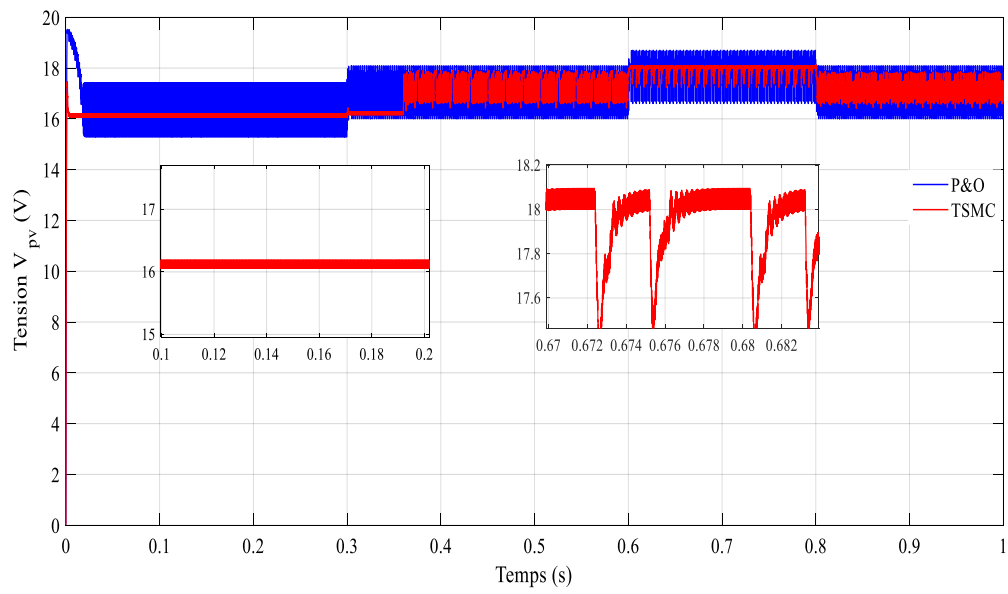
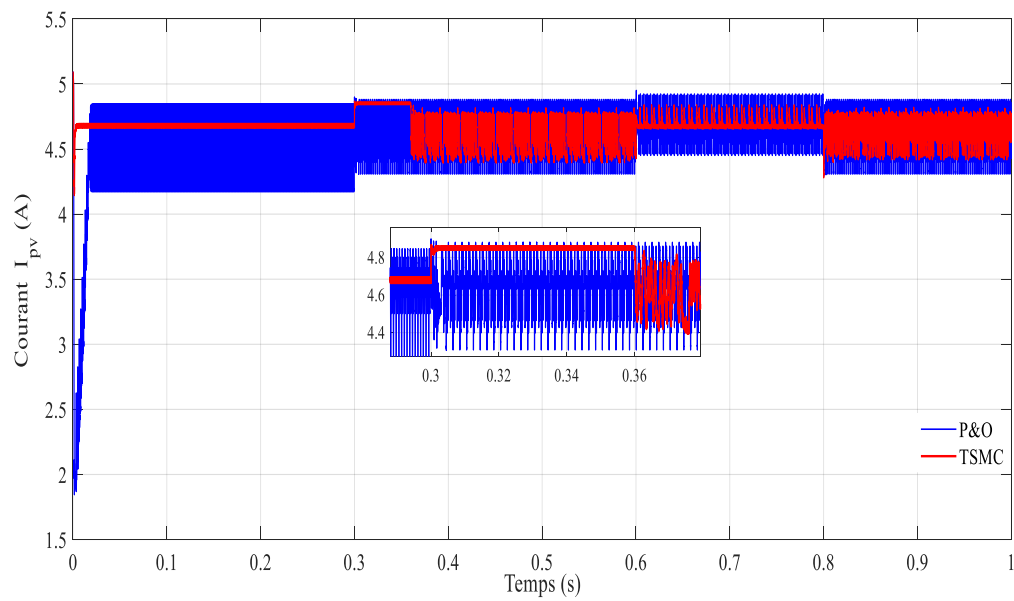


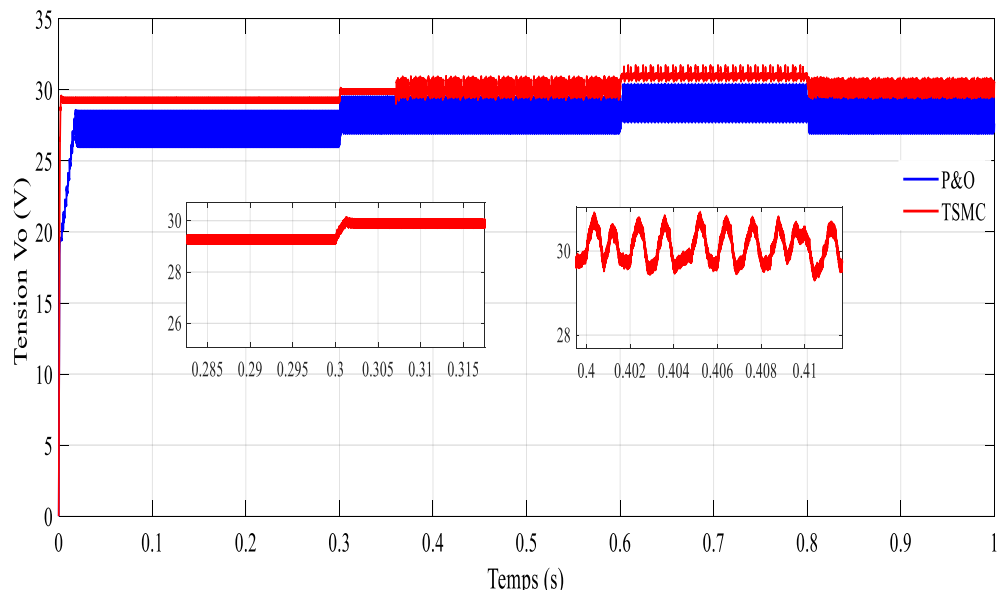
Figure : III.13. Evolution de la puissance  $P_{PV}$  du panneau



**Figure : III.14.** Evolution de la tension  $V_{PV}$  du panneau.



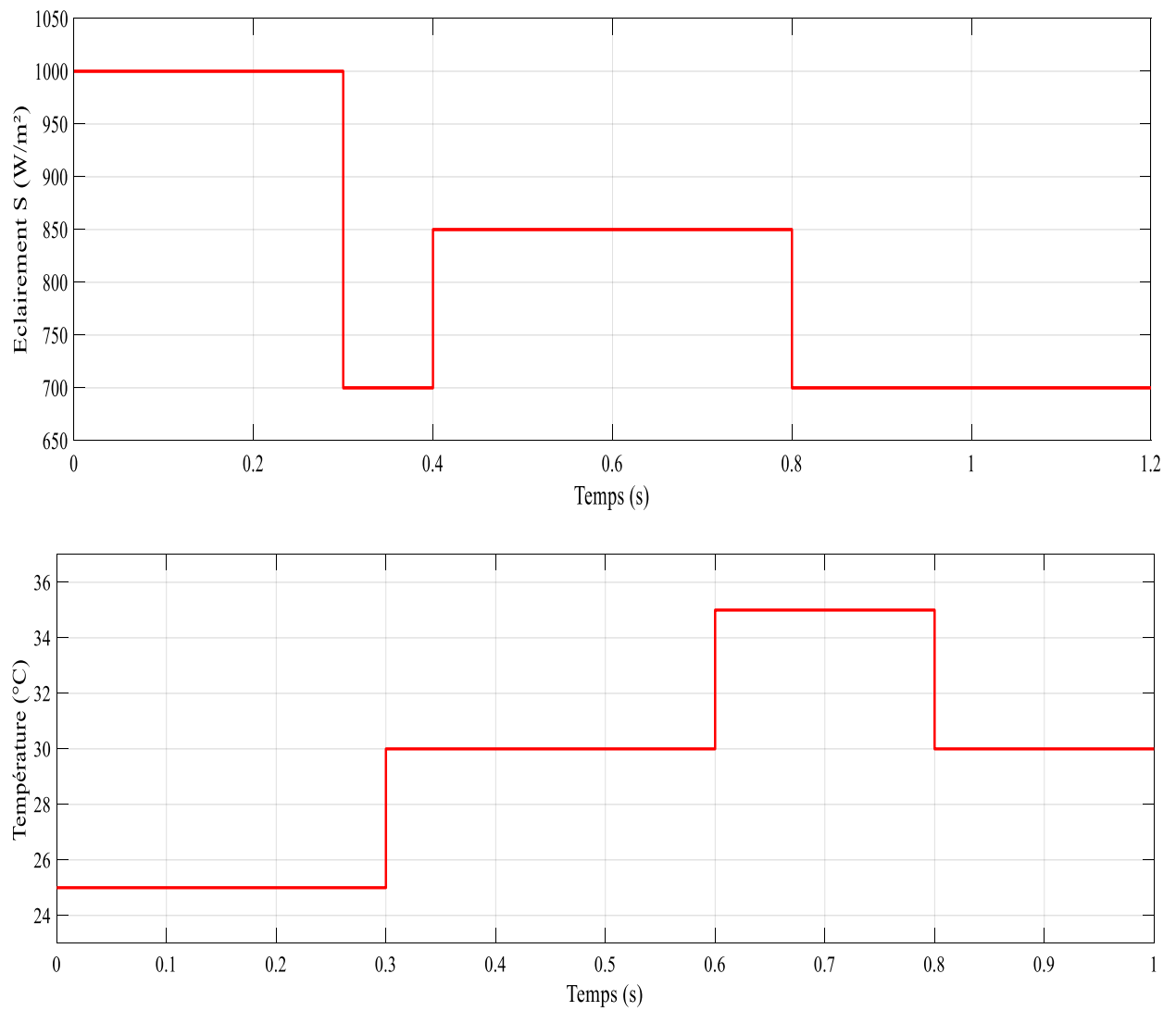
**Figure : III.15.** Evolution du courant  $I_{PV}$  du panneau.



**Figure : III.16.** Evolution de la tension de sortie  $V_o$ .

#### Cas 4 : Eclairage et température variable.

Une autre étude portant sous une température et un éclairage variables (figure : III.17.) a été effectuée.



**Figure : III.17.** Variation de la température et de l'éclairement en fonction du temps.

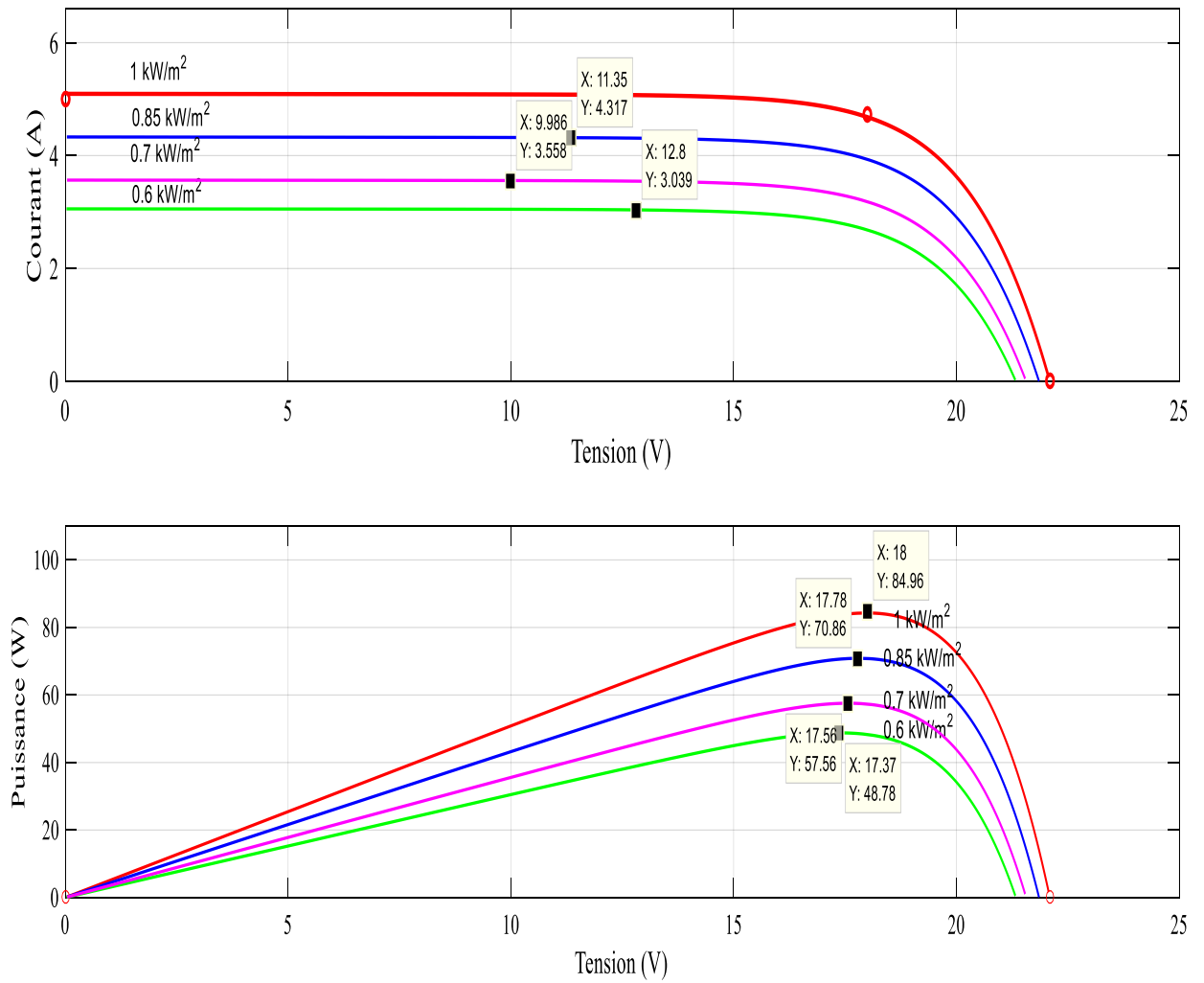


Figure : III.18. Caractéristiques du panneau PV.

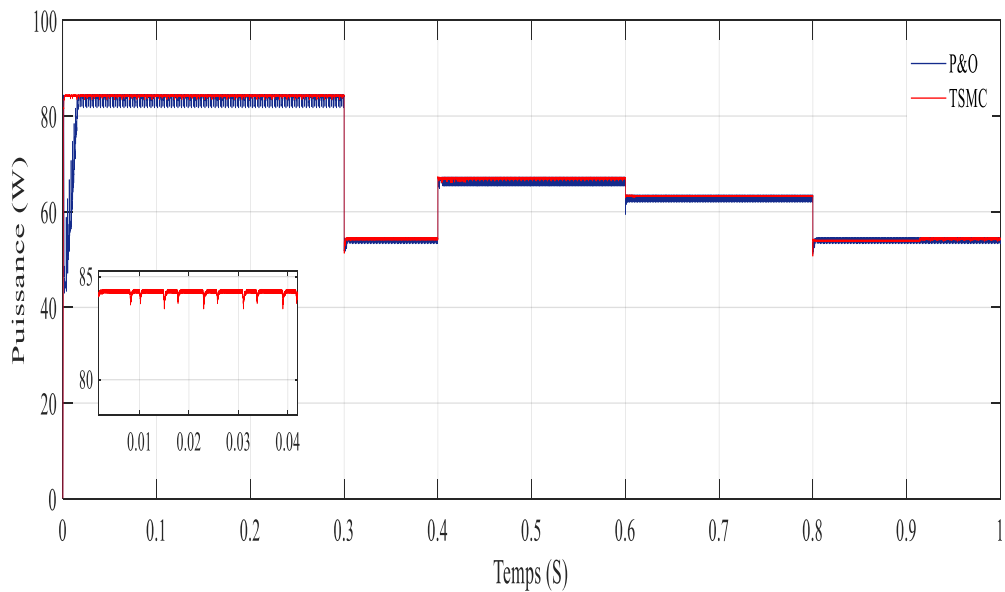
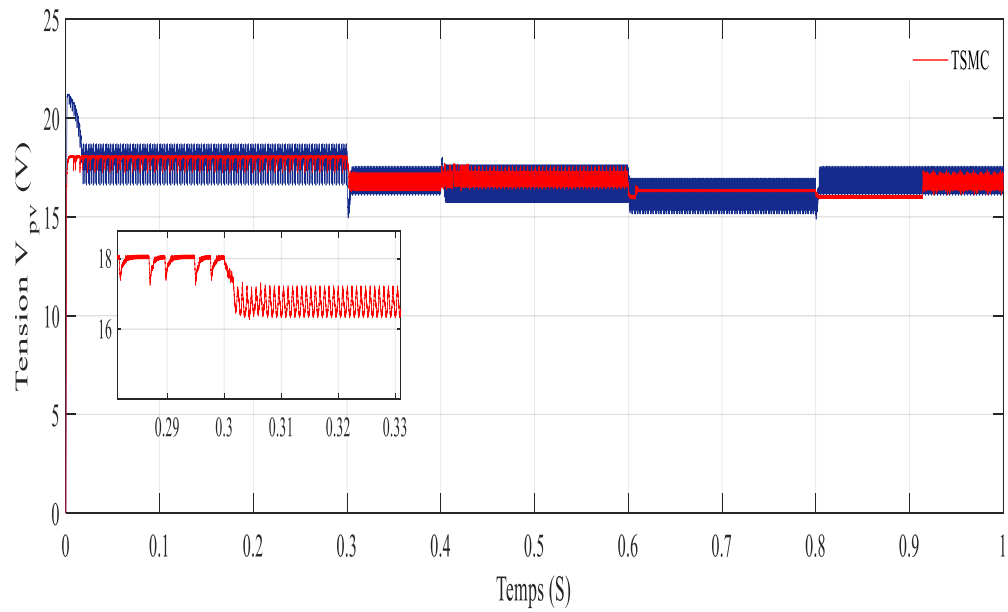
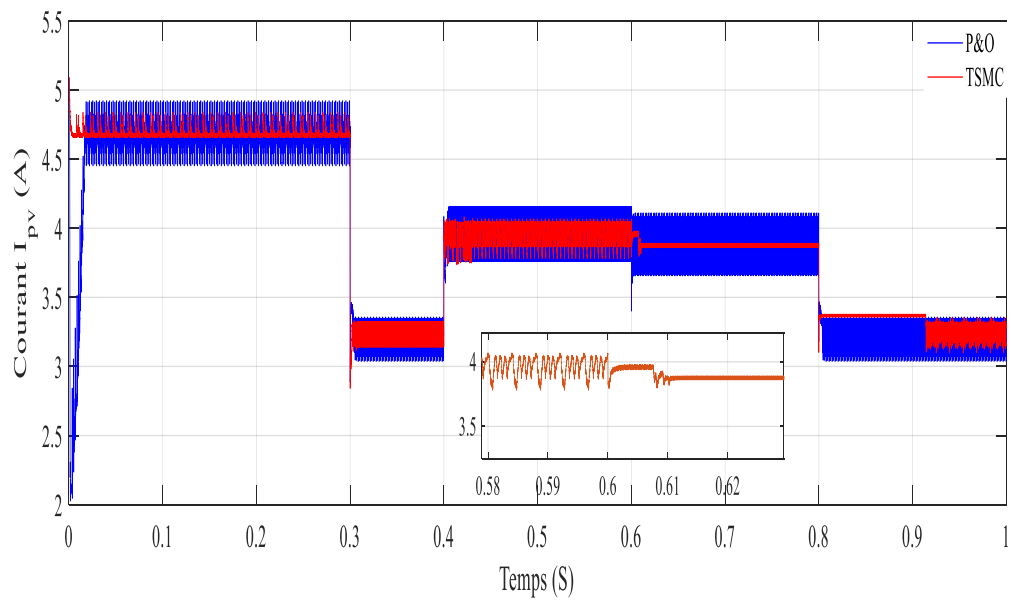


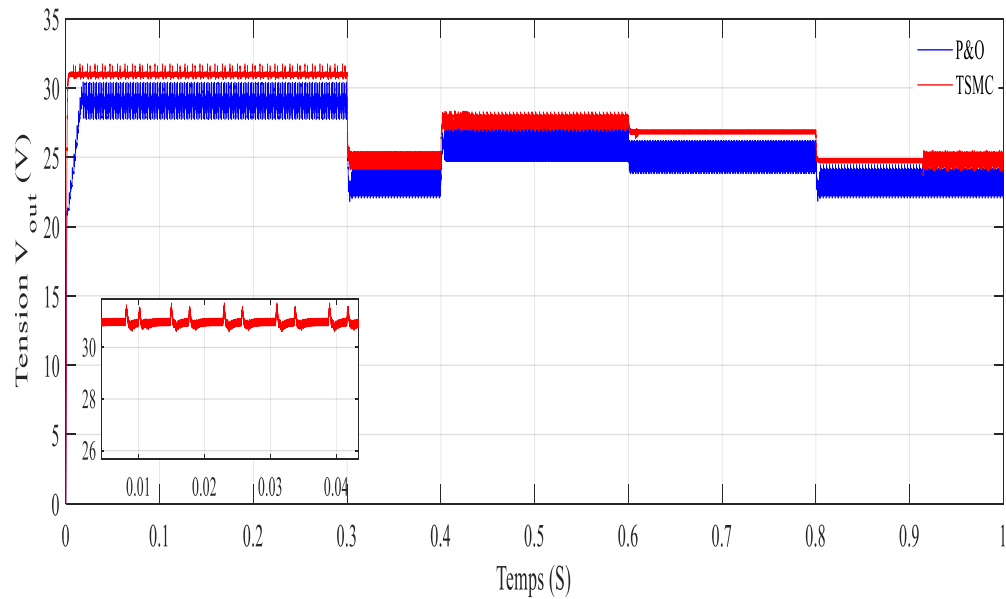
Figure : III.19. Evolution de la puissance  $P_{PV}$  du panneau.



**Figure : III.20.** Evolution de la tension  $V_{pv}$  du panneau.



**Figure : III.21.** Evolution du courant  $I_{pv}$  du panneau.

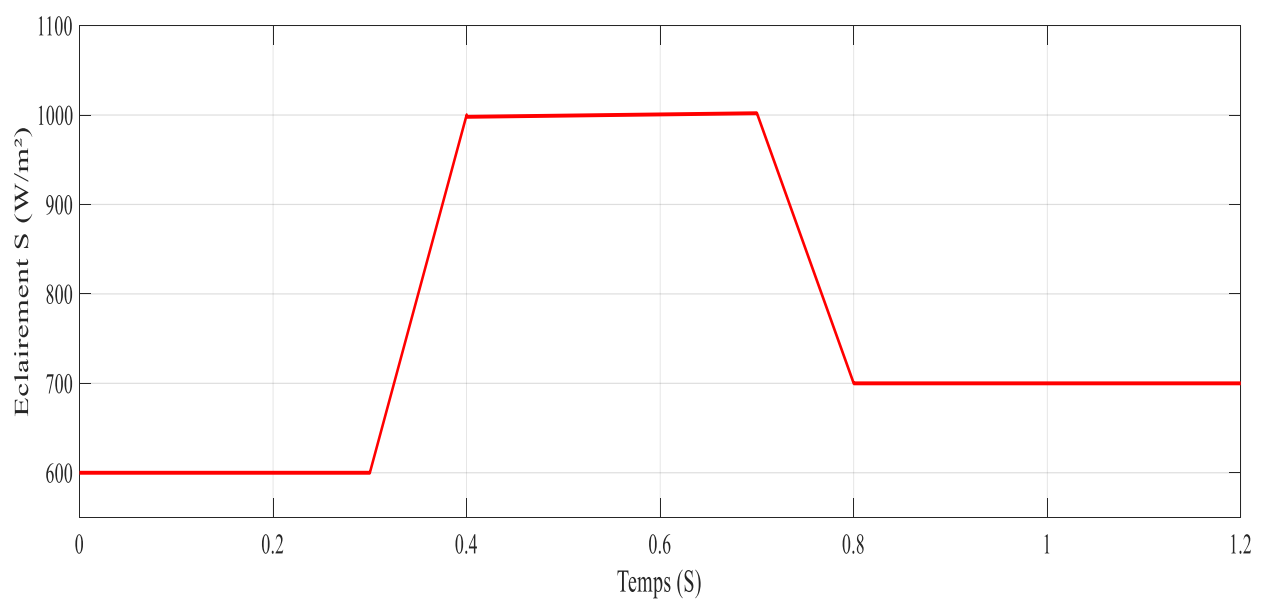


**Figure : III.22.** Evolution de la tension de sortie  $V_0$ .

Les résultats de simulation prouvent que la technique utilisée est capable de suivre la variation de l'éclairement et de la température afin d'atteindre le MPP.

#### Cas 5 : Eclairement trapézoïdal.

Pour valider l'efficacité de l'approche proposée, un autre test de robustesse a été réalisé où un profil trapézoïdal de l'éclairement a été choisi (la température est fixée à 25 °C) (Figure : III.23.).



**Figure : III.23.** Variation trapézoïdale de l'éclairement en fonction du temps.

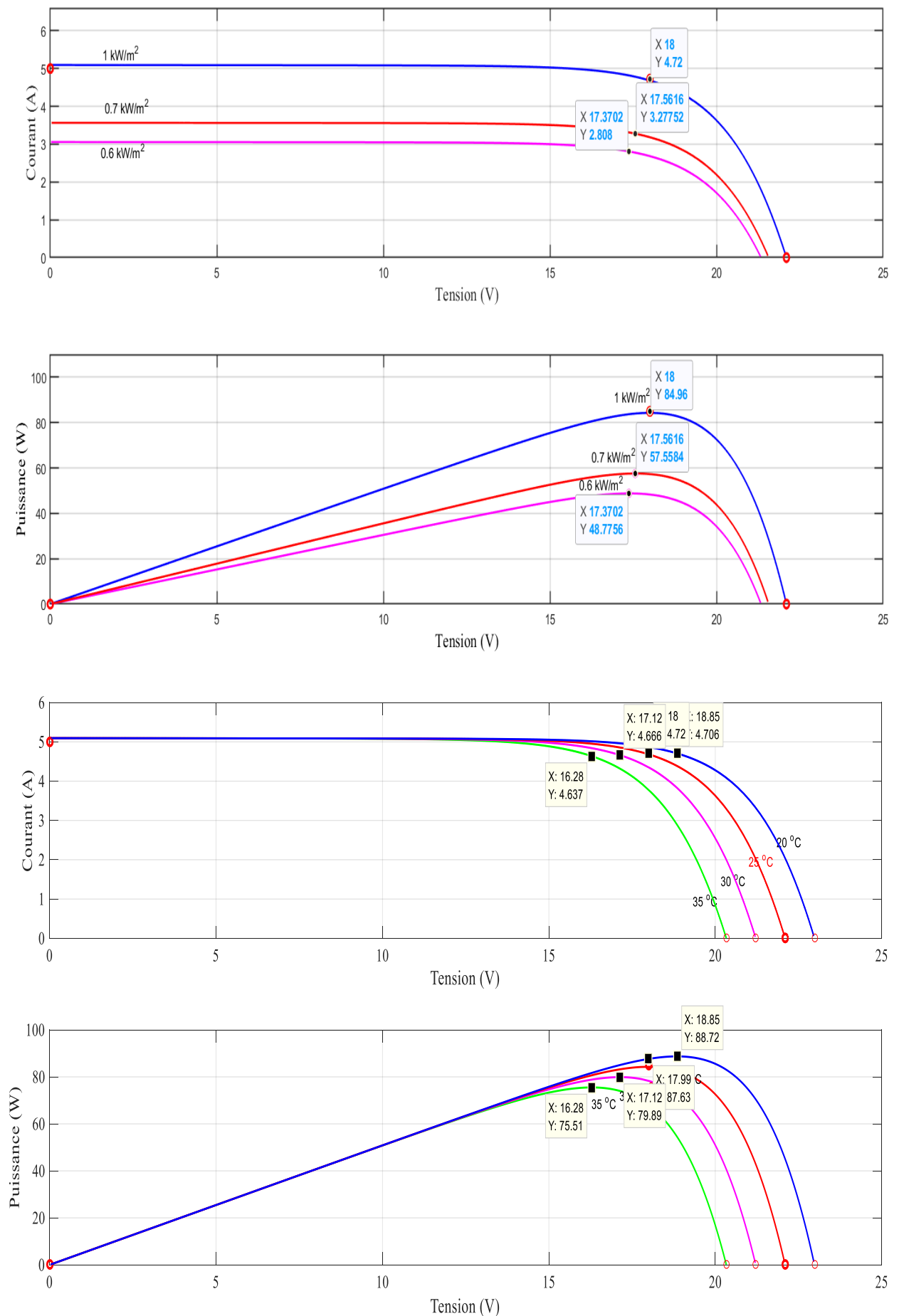
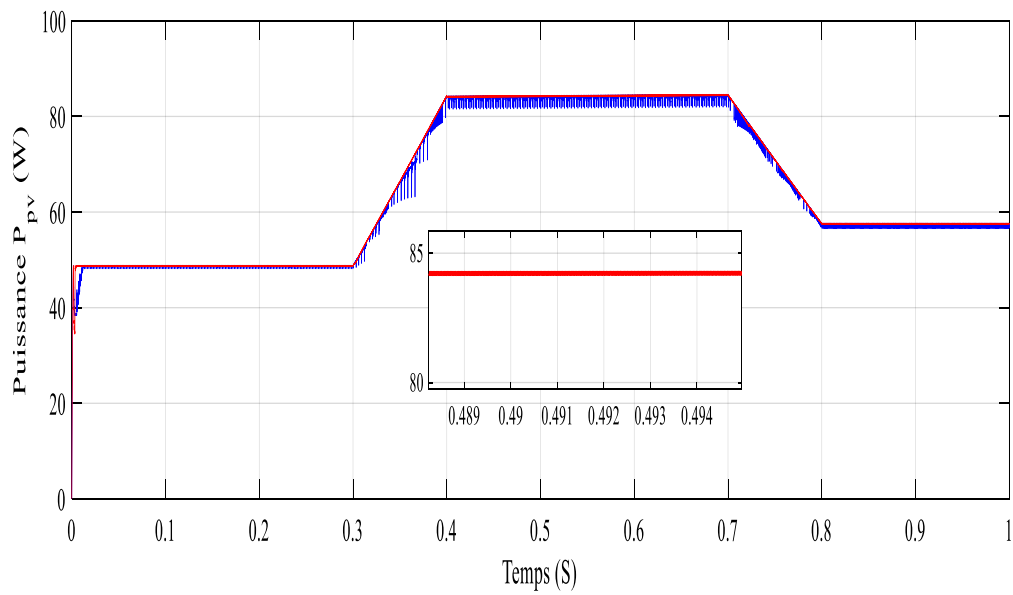
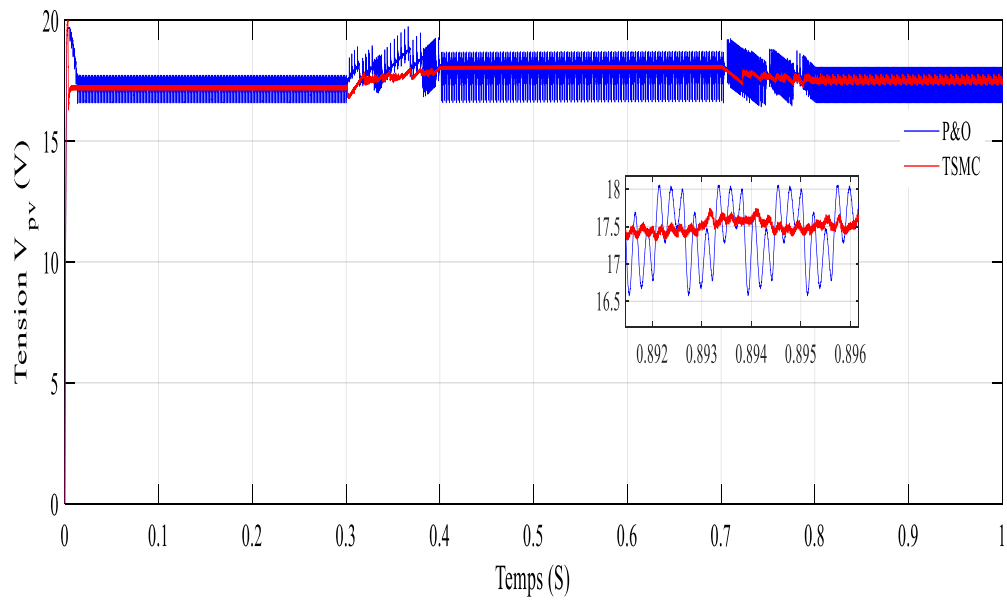


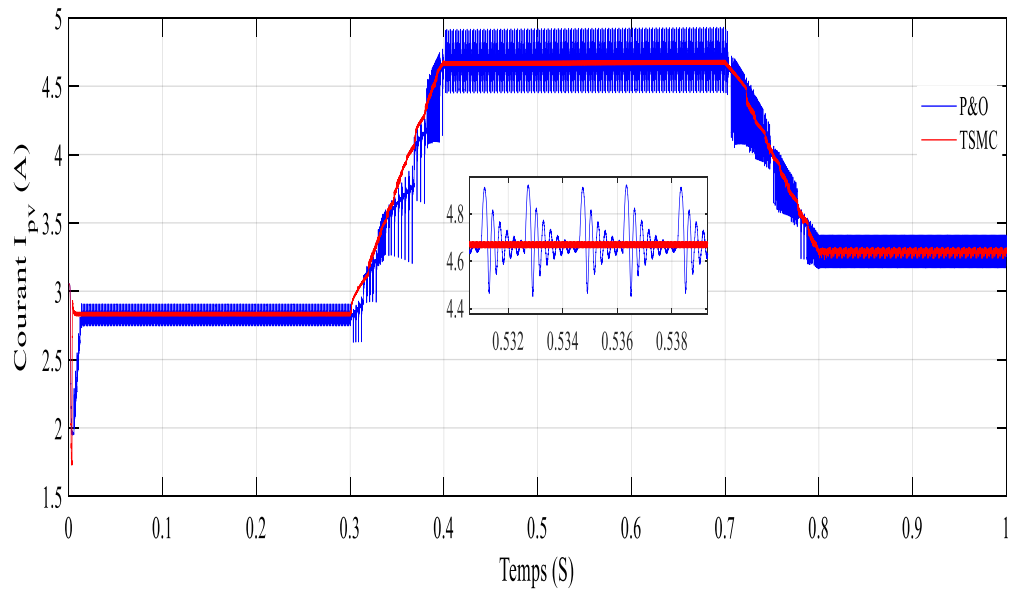
Figure : III.24. Caractéristiques du panneau PV.



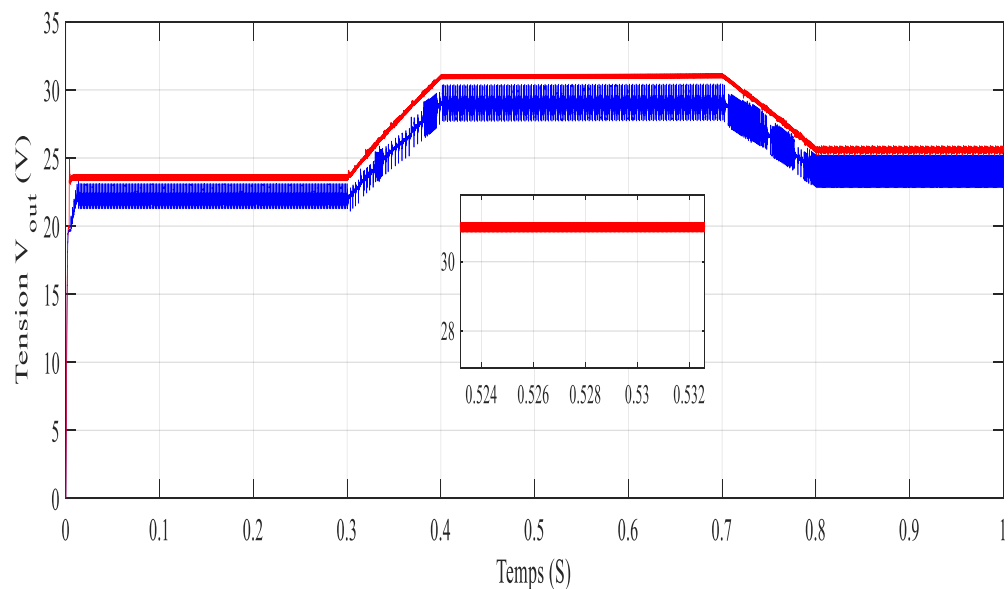
**Figure : III.25.** Evolution de la puissance  $P_{pv}$  du panneau.



**Figure : III.26.** Evolution de la tension  $V_{pv}$  du panneau.



**Figure : III.27.** Evolution du courant  $I_{PV}$  du panneau.



**Figure : III.28.** Evolution de la tension de sortie  $V_0$

La commande TSMC proposée révèle des performances remarquables dans toutes les conditions d'éclairément. La méthode proposée suit parfaitement la trajectoire du MPP comme représenté dans les figures où le suivi du MPP est parfait et la minimisation de l'oscillation de puissance en régime statique est effective.

**III.5. Conclusions :**

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

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'amélioration des performances du fonctionnement d'un système photovoltaïque (**PV**) commandé par la technique **MPPT** tout en assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Le travail mené dans ce mémoire a été porté sur l'optimisation de fonctionnement d'un générateur *PV* dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Un générateur **PV** possède une caractéristique  $I-V$  non-linéaire et un seul point de fonctionnement optimal (puissance maximale) varié en fonction de l'éclairement et de la température. Pour maintenir le fonctionnement du générateur à ce point, et obtenir un bon rendement, un contrôle en permanence du système **PV** a été abordé.

Nous avons synthétisé une commande par mode glissant terminal permettant de réaliser une convergence de temps fini, d'assurer un fonctionnement au PPM et une robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement et de la température.

**Références**

**Bibliographies**

# Références Bibliographiques

- [Int.gén] M. F. Shraif, "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique." Toulouse 3, 2002.
- [1] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Thèse de doctorat, Université de BECHAR, 2009.
- [2] MT. Dang, « élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2009.
- [3] B. L. Sofia, "Cours Energie Solaire Photovoltaïque. «Université de Béjaia, 2015.
- [4] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2015.
- [5] Ressources naturelles du canada, Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), division de l'énergie renouvelable et électrique, n°M92-28/2001F, Ottawa, Canada 2002.
- [6] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies," Paris II , 2014.
- [7] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables," Thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010 ".
- [8] Ressources naturelles du canada: Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), division de l'énergie renouvelable et électrique, nOM92-28/2001F, Ottawa, Canada 2018.
- [9] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [10]. R. Faranda and S. Leva, « Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems». WSEAS Transactions on Power Systems, 3, 446-455, 2008.
- [11] M.L. Louazane "Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.

- [12] O. Boukli-Hacene, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » ; Mémoire de magistère en Automatique productique informatique, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen 2011.
- [13] Bouilouta A, Mellit A, Kalogirou SA. New MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions. *Energy* 2013;55:1172–85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.038>.
- [14] Bun L. Détection et localisation de défauts pour un système PV. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2011.
- [15] Alonso C. Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie. Habilitation à diriger des travaux de recherches. Université PAUL SABATIER – TOULOUSE III, 2003.
- [16] Aouchiche N, Becherif M, HadjArab A, Aitcheikh MS, Ramadan HS, Cheknane A. Dynamic Performance Comparison for MPPT-PV Systems using Hybrid Pspice/Matlab Simulation. *Int J Emerg Electr Power Syst* 2016;17:529–39. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2016-0074>.
- [17] Boukenoui R, Salhi H, Bradai R, Mellit A. A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns. *Sol Energy* 2016;124:124–42. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.11.023>.
- [18] Murtaza A, Chiaberge M, Spertino F, Boero D, De Giuseppe M. A maximum power point tracking technique based on bypass diode mechanism for PV arrays under partial shading. *Energy Build* 2014;73:13–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.018>.
- [19] Chebana A, "Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau," Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [20] A. Luque and S. Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [21] Yun Tiam Tan, D. S. Kirschen, and N. Jenkins. A model of pv generation suitable for stability analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(4) :748–755, 2004.

- [22] Vun Jack Chin, Zainal Salam, and Kashif Ishaque. Cell modeling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review. *Applied Energy*, 154 :500 – 519, 2015.
- [23] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en electrotechnique option ,2014
- [24] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [25] S. Motahhir, A. El Ghzizal, et A Derouich « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM » , CIGIMS 2015, EST de Fès, 2015.
- [26] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université de Jijel 2010.
- [27] **Z. Man, A. P. Paplinski, H. Wu.** A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39: 2464 – 2469, 1994.
- [28] **K. Y. Zhuang, H. Y. Su, K. Q. Zhuang, J. Chu.** Adaptive terminal sliding mode control for high order nonlinear dynamic systems [J]. *Journal of Zhejiang University*, 4: 58 – 63, 2003.
- [29] S.P Bhat, and D.S. Bernstein, “Finite-time stability of continuous autonomous system”, *SIAM J. Control Optim.*, vol. 38, no. 3, pp. 751-766, 2000.
- [30] X. Yu, and Z. Man, “Variable structure system with terminal sliding modes, Variable Structure System: Towards the 21<sup>st</sup> Century Lecture Note in Control and Information Science”, vol. 274, pp. 109-127, 2002.
- [31] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man, “Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators”, *Automatica*, vol. 38, no. 12, pp. 2159-2167, 2002.
- [32] S. Yu, X. Yu, B. Shirinzadeh, and Z. Man, “Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode”, *Automatica*, vol. 41, no. 11, pp. 1957-1964, 2005.

- [33] **H. Sira-Ramirez.** Second Order Sliding Mode Control for Robot Arms with Time Base Generators for Finite-Time Tracking. *Dynamics and Control*, 11, 175–186, 2001.
- [34] **Jinkun LIU, Fuchun SUN.** A novel dynamic terminal sliding mode control of uncertain nonlinear systems, *Journal of Control Theory and Applications* , 5 (2) 189–193, 2007.
- [35] **Neila Mezghani Ben Romdhane and Tarak Damak.** Terminal sliding mode feedback linearization control, *International Journal of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, IJ-STA, Volume4, N°1*, pp.1174-1187, July 2010.
- [36] **X. Yu and J.-X. Xu (Eds.)** Variable Structure Systems: Towards the 21st Century, LNCIS 274, pp. 109–127, 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002.
- [37] **Shuanghe Yu, Jialu Du, Xinghuo Yu, He Xu.** A Novel Recursive Terminal Sliding Mode with Finite-Time Convergence, the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [38] **Song Chen, Zhong Su.** Global Fast Terminal Sliding Mode Control of a Brushless DC Motor Actuator Using Time-delay Estimation. *IEEE International Conference on Computer Application and System Modeling*, 978-1-4244-7237-6, 2010.
- [39] C.S Chiu, Y.T Lee, and C.W Yang, “ Terminal sliding Mode Control of DC-DC Buck Converter”, *CCIS 65*, pp. 79-86, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [40] Altasa, I.H., Sharaf, A.M., 2008. A novel maximum power fuzzylogic controller for photovoltaicsolarenergysystems. *RenewableEnergy*33, 388–399.
- [41] Barambones, O., Etxebarria, V., 2002. Energy-basedapproach to slidingcomposite adaptive control for rigid robots withfiniteerror convergence time. *International Journal of Control* 75 (5), 352–359.
- [42] Feng, Y., Yu, X.H., Man, Z., 2002. Non-singular terminal sliding mode control of rigidmanipulators. *Automatica* 38, 2159–2167.
- [43] Hua, C.C., Lin, J.R., Shen, C.H., 1998. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic systemwithpeak power tracking. *IEEE Transactions on IndustrialElectronics* 45 (1), 99–107

[44] Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T., Osakada, M., 1995. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric condition. IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution 142 (1), 59–64.

[45] Kottas, T.L., Boutalis, Y.S., Karlisa, A.D., 2006. New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive networks. IEEE Transactions on Energy Conversion 21 (3), 793–803.