

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Thème

Modélisation et simulation d'une commande
MPPT d'un système photovoltaïque

Réalisé par :

- DJENNADI Rafik
- BOUKHENTACHE Nacer

Encadré par :

- Mme HAMOUCHE Née SERIR Chafia

Année Universitaire

2020/2021

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Madame Hamouche née Serir chafia, docteur à l'université de Bejaia, qui nous a honoré de son encadrement et qui a accepté la lourde tâche de promotrice. Je lui exprime également notre profonde reconnaissance pour son dévouement d'avoir bien voulu nous faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et encore de ses idées par les quelles elle nous a orienté pour l'accomplissement de ce travail.

Notre remerciement au département d'électrotechnique et à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant les années du cursus. Notre remerciement est également adressé aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Enfin nous remercions aussi toutes nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicaces

Merci mon DIEU de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout de mes rêves. Je dédie ce modeste travail à :

- Ma chère mère et mon cher père Que dieu les gardes et les protèges.*
- Mes frères, Tarik et Salim et leurs petites familles.*
- Ma sœur Yasmina et sa petite famille.*
- Ma chère Kenza qui m'a soutenu tout le long de mes études.*
- Toute ma famille.*
- tous mes amis surtout BELLAGHE Jugurtha , Amine, et l'équipe de CSGEER,*
- la promo énergies renouvelables 2020/2021*

DJENNADI Rafik,

Dédicaces

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve. Je dédie ce modeste travail:

- *A la mémoire de mon très cher Père, que dieu l'accueille dans son vaste paradis*
- *A ma chère Mère,*
- *A mes frères et sœurs et leurs petites familles,*
- *A toute ma famille,*
- *A tous mes amis(es)*
- *A la promo énergies renouvelables 2020/2021*

BOUKHENTACHE Nacer

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Liste des symboles et abréviations

V_{co}	Tension à vide
I_{cc}	Courant court-circuit
PPM	Point de puissance maximal
V_{opt}	Tension optimale
I_{opt}	Courant optimal
V_{mpp}	Tension de point de puissance maximale
I_{mpp}	Courant du point de puissance maximale
P_c	Puissance crête
DC/DC	Convertisseur continu continu
DC/AC	Convertisseur continu alternatif
GPV	Générateur photovoltaïque
FF	Facteur de forme
V_m	Tension de point de puissance maximale
I_m	Courant de point de puissance maximale
E	L'ensoleillement
S	Surface effective des cellules
T_c	Température de jonction
T_a	Température ambiante.
η	Le rendement de convection d'énergie
I_{ph}	Courant produit par la photodiode
I_s	Courant de saturation
I_{pv}	Courant délivré par le module.
I_d	Courant de la diode.
I_{sh}	Courant shunt.
$T_{c\ ref}$	Température de référence.
E_g	L'énergie du gap

R_s	Résistance série
R_{sh} :	Résistance shunt
α	Rapport cyclique
T	Température
V_L	Tension aux bornes de l'inductance
C	Condensateur
P&O	Méthode de perturbation et d'observation
P&O A	Méthode de perturbation et d'observation améliorée
CI	Méthode de la conductance incrémentale
CIA	Méthode de la conductance incrémentale améliorée
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque

Liste des figures et tableaux

Liste des Figures

Figure I-1: Irradiation ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre.

Figure I-2: composants du rayonnement solaire: extraterrestre, globale=direct+diffus +albedo.

Figure I-3: Potentiel solaire en Algérie.

Figure I-4: Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

Figure I-5: Caractéristiques courant, tension et puissance d'une cellule solaire.

Figure I-6: générateur photovoltaïque.

Figure I-7. La caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

Figure II-1 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Figure II-2 : schéma électrique équivalent d'une cellule à une diode.

Figure II-3: schéma électrique équivalent d'une cellule à deux diodes.

Figure II-4 : Caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) ($E=1000W/m^2$, $T_c = 25^\circ C$).

Figure II-5 : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque.

Figure II-6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

Figure II-7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Figure II-8 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

Figure II-9 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Figure II-10 Schéma de convertisseur DC/DC.

Figure II-11 : Circuit électrique d'un hacheur série.

Figure II-12 : Circuit électrique du convertisseur boost (hacheur parallèle).

Figure III-1 : Chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT.

Figure III-2 : Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire.

Figure III-3: Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O).

Figure III-4 : Schéma de simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Figure III-5 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec optimisation par la P&O.

Figure III-6 : Allure de la puissance du PV sous les conditions STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

Figure III.7 : Allure de la tension du PV sous les conditions ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $T_a=25^\circ\text{C}$).

Figure III-8 : La technique P&O modifiée à pas variable.

Figure III-9 : Organigramme de la méthode perturbation et observation améliorée.

Figure III-10 : L'allure de la puissance photovoltaïque de la P&O améliorée.

Figure III-11 : L'allure de la tension photovoltaïque de la P&O améliorée.

Figure III-12 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O) et (P&OA).

Figure III-13 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque au régime permanent avec (Zoom)

Figure III-14 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur la caractéristique de la puissance.

Figure III.15: Organigramme de la méthode conductance incrémentielle (CI).

Figure III-16 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque avec l'application de la CI.

Figure III-17 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application du la CI.

Figure III.18 : Organigramme de la méthode conductance incrémentale améliorée (CIA).

Figure III-19 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque avec l'application du la CIA.

Figure III-20 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque avec la méthode de la CIA.

Figure III-21 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque avec la CI et la CIA.

Figure III-22 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml).

Figure III-22 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la CI et la CIA avec Zoom

Figure III-23 : profil d'ensoleillement variable ($T_c=25^\circ\text{C}$).

Figure III-24: Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml).

Figure III-25 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml) pour de faible et moyen ensoleillement. Zoom entre [6.8s et 8.6s].

Figure III-26 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml). pour un fort ensoleillement. Zoom entre [14.88s et 14.96s]

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Taux d'ensoleillement pour quelque région de l'Algérie.

Tableau II-1 : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS SM 110-24.

Le tableau III.1 Les modes de perturbation de la méthode P&O.

Sommaire

Sommaire

Introduction général.....	1
<i>Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie solaire photovoltaïque</i>	
I .1.Introduction.....	3
I.2.L'énergie solaire.....	3
I.3. Rayonnement solaire.....	4
I.3.1. Le spectre de rayonnement solaire.....	4
I .3.2.Différents types de rayonnement.....	5
I.3.3. Orientation et inclinaison.....	6
I.4. gisement solaire en Algérie.....	6
I.5. la cellule photovoltaïque.....	8
I.5.1. Définition de la cellule photovoltaïque.....	8
I.5.2. Principe de fonctionnement	8
I.5.3. caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	9
I.6. Générateur photovoltaïque.....	9
I.6.1. caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	10
I.6.2. Protection des modules photovoltaïques.....	11
I.7. Convertisseurs d'énergie.....	12
I.8. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque.....	12
I.9. Conclusion.....	13
<i>Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque</i>	
II.1. Introduction.....	14
II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	14
II.2.1 Les Principes de Conversion dans les Systèmes photovoltaïque.....	14
II.2.2. Modèle de la cellule solaire.....	14
II.2.3. Les modèles mathématiques.....	16
II.3. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV.....	20

II.3.1. Influence de l'ensoleillement.....	21
II.3.2. Influence de la température	22
II.3.3. Discussion des résultats.....	23
II.4. Les convertisseurs d'énergie	23
II.4.1 Convertisseurs DC/DC (hacheurs).....	23
II.4.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série).....	24
II.4.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle).....	24
II.5. Conclusion	26

Chapitre III : MPPT-simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction	27
III.2. Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	27
III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale.....	27
III.4. Techniques de poursuite du point de puissance maximale.....	28
III.4.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	28
III.5. Interprétation des résultats.....	32
III.6. Méthode de perturbation et d'observation améliorée (P&O améliorée).....	32
III.7. Interprétation des résultats.....	34
III.8. Comparaison entre la P&O et la P&O améliorée	34
III.9. la méthode de conductance incrémentielle (CI).....	35
III.9.1. Applications et simulations de la méthode CI.....	37
III.9.2. Interprétation des résultats.....	38
III.10. Méthode de Conductance Incrémentale améliorée (CI Améliorée).....	39
III.10.1. Applications et simulations de la méthode CI Améliorée	41
III.10.2. Interprétation des résultats	41
III.11. Comparaison entre la CI et la CI améliorée	42
III.12. Comparaison entre la P&O améliorée et la CI améliorée par un teste de robustesse ...	43
III.13. Conclusion	45
Conclusion générale	46

Introduction générale

Introduction générale:

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire.

Cependant ces formes de production engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs.

La nécessité de la diversification énergétique, de la sécurisation des approvisionnements et de la protection de l'environnement est devenue une urgence mondiale. Cette situation a conduit à la recherche d'autres ressources d'énergies de remplacement.

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables, il y a l'énergie solaire photovoltaïque qui représente une solution de remplacement par excellence. Pour cela Le rôle de ce système est de la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des sites isolés.

Il existe plusieurs méthodes qui ont été largement mises en œuvre pour suivre la technique MPPT. Les méthodes les plus courantes sont : « Perturber et observer » (P&O), « l'incrémentation de la conductance » (CI). Le but de ce travail est l'étude d'un système d'énergie photovoltaïque autonome. Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective. [1]

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une synthèse de l'état de l'art actuel sur l'énergie photovoltaïque. Ainsi que les différentes technologies des cellules solaires.

- ◆ A la fin de ce chapitre, on mettra en valeur les avantages et les inconvénients de ce système.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation du système

Introduction générale

photovoltaïque, qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation et l'optimisation de système photovoltaïque par la méthode de MPPT

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I

**Etat de l'art sur l'énergie solaire
photovoltaïque**

I.1.Introduction

Les considérations environnementales prennent une part de plus en plus importante dans la réflexion sur l'avenir énergétique de la planète. Même si les sources fossiles et nucléaires sont toujours les fournisseurs d'énergie par excellence, vu l'augmentation du prix du pétrole et le réchauffement climatique, les sources alternatives bénéficient d'un regain d'attention.

Depuis longtemps, le stockage et l'utilisation de l'énergie solaire font l'objet de nombreuses études et différents dispositifs commerciaux ont vu le jour.

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toutes les gammes d'applications.

I.2.L'énergie solaire

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles. Disponible en grande quantité à notre échelle et répartie sur toute la surface de la terre, elle permet de récupérer jusqu'à 1000W/m^2 dans les zones tempérées. Que l'on soit en milieu urbain ou au contraire, en site isolé, cette énergie peut être récupérée et utilisée sous forme thermique ou électrique, il existe différents types d'énergies solaires. [2]

a. L'énergie passive

La plus ancienne et certainement la plus importante, Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

b. l'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur). Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit.

c. l'énergie thermodynamique

Cette énergie est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de la vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.

d. L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

Dans notre travail, en est intéressés particulièrement par l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 GW. Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la Terre. [3]

Le rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 5% dans la bande des ultraviolets ($<$ à $0.04 \mu\text{m}$)
- 40% dans la bande visible (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$)
- 55% dans la bande des infrarouges ($>$ à $0.8 \mu\text{m}$)

I.3.1. Le spectre de rayonnement solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons; grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de $6000 \text{ }^\circ\text{C}$. L'intensité du rayonnement au dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m^2 , avec un spectre centré au voisinage de $\lambda=0.48 \mu\text{m}$. A la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m^2 en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption. Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par $AM=1/\cos \alpha$ ou α représente l'angle

que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur). De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct et diffus). [4]

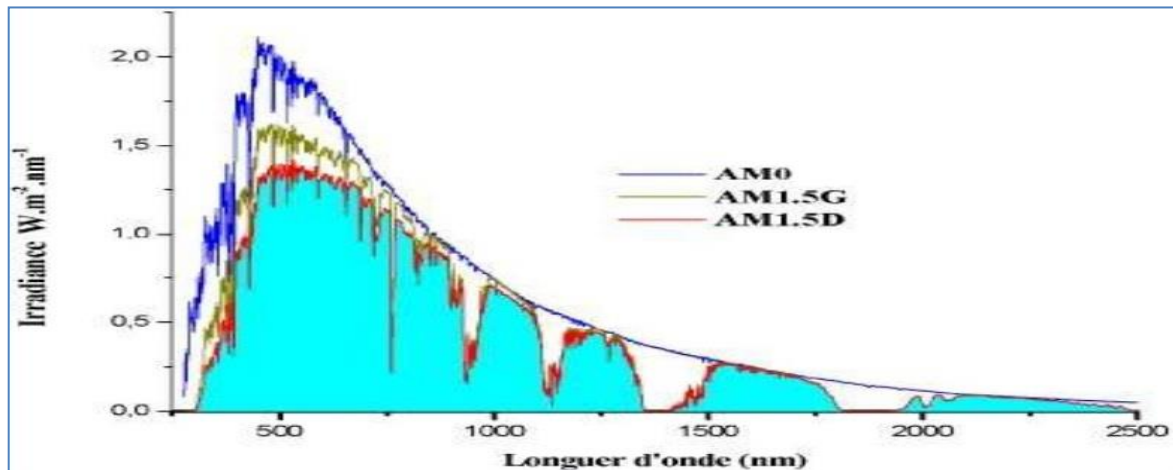


Figure I-1: Irradiation ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre. [5]

I.3.2. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

- **Le rayonnement diffus** : est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

- **L'albédo** : est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. [6]

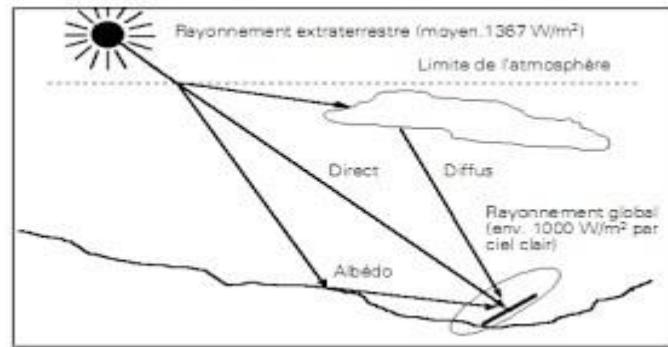


Figure I-2: composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo [7]

I.3.3. Orientation et inclinaison

L'orientation du système photovoltaïque détermine le rayonnement absorbé par cette surface et donc la production d'énergie. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Quand on a le choix, l'orientation idéale d'un capteur solaire obéit à une règle très simple à retenir : vers l'Equateur, ce qui donne : [8]

- Orientation vers le Sud dans l'hémisphère nord,
- Orientation vers le Nord dans l'hémisphère sud.

En ce qui concerne l'inclinaison, c'est un peu plus compliqué. Prenons d'abord le cas d'une application autonome qui consomme une énergie quasi constante tout au long l'année. L'hiver étant la période la moins ensoleillée, c'est à cette période qu'il faut optimiser la production.

I.4. gisement solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. La connaissance de ce gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires. Ainsi, un bon dimensionnement n'est possible que si les mesures sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps. La meilleure manière pour cela est de disposer d'une série de mesures continues du rayonnement solaire arrivant au sol issues des différentes stations météorologiques. Compte tenu de l'étendue du

Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie solaire photovoltaïque

territoire Algérien qui est d'environ 2 millions et demi de km² et de sa position géographique, la densité de son réseau est très insuffisante pour une bonne prise en charge de la mesure du rayonnement solaire. Pour pallier aux insuffisances de ce réseau, nous avons recours à des méthodes d'estimation en exploitant les images satellitaires collectées par les satellites géostationnaires. [9]

Régions	Littoral	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	68
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I-1 : Taux d'ensoleillement pour quelques régions de l'Algérie. [10]

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

La figure suivante (figure I-3) représente le potentiel solaire en Algérie

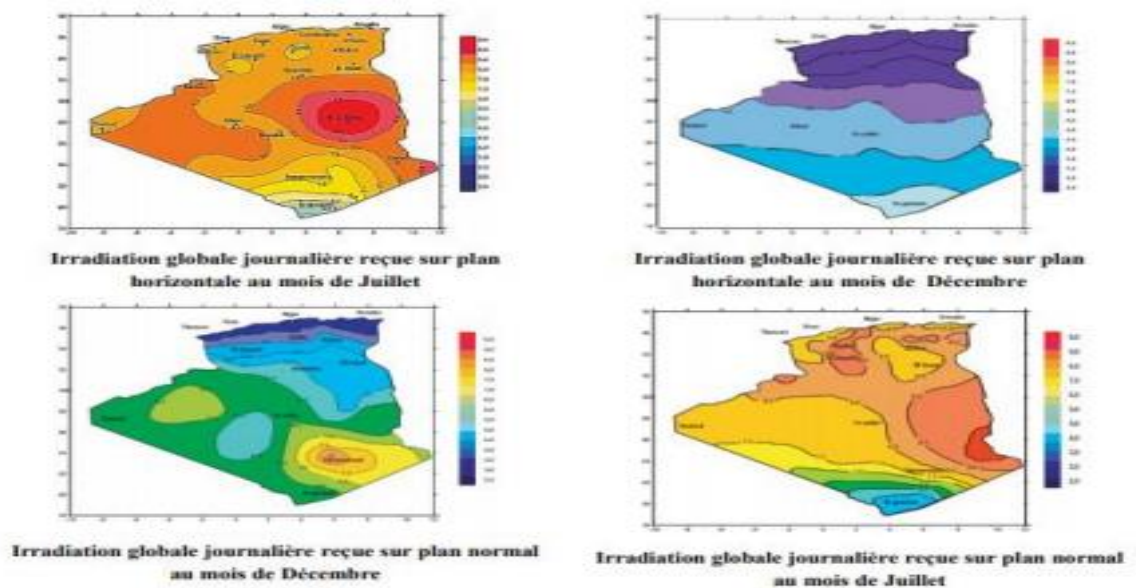


Figure I-3: Potentiel solaire en Algérie.

I.5. la cellule photovoltaïque

I.5.1. Définition de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le composant électronique semi-conducteur qui, lorsqu'il est assemblé en batterie, compose un panneau solaire photovoltaïque.

Dans la cellule photovoltaïque l'absorption des photons libère des électrons chargés négativement et des "trous" chargés positivement.

Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière, produisant un courant électrique.

La cellule photovoltaïque est un générateur électrique élémentaire qui transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique. [11]

I.5.2. Principe de fonctionnement

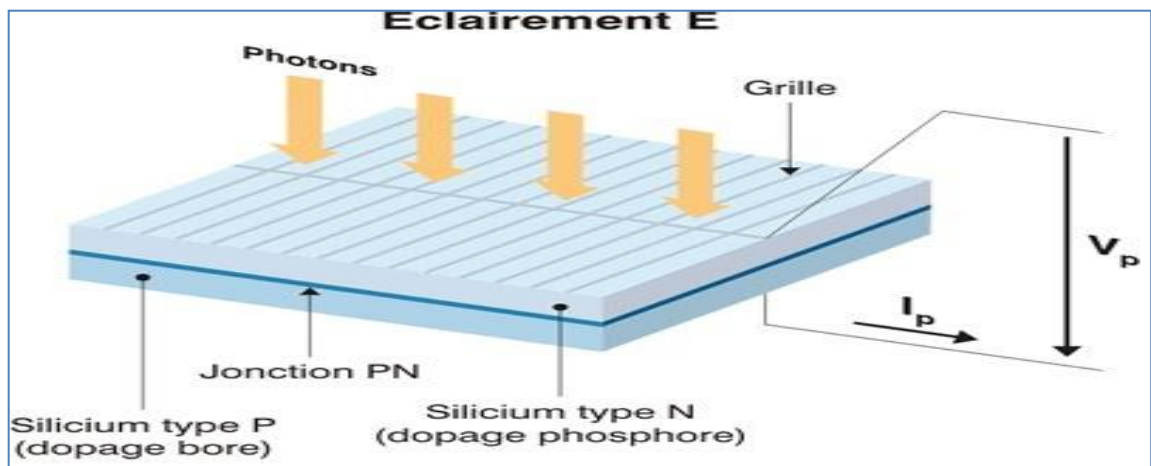


Figure I-4: Principe de fonctionnement d'une cellule PV. [12]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée. [13]

I.5.3. caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- **Sa tension à vide : V_{co} .** Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

- **Son courant court-circuit: I_{cc} .** Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

- **Son point de puissance maximal: MPP** (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}). [12]

On obtient les caractéristiques semblables à celles représentées en figure (I-5).

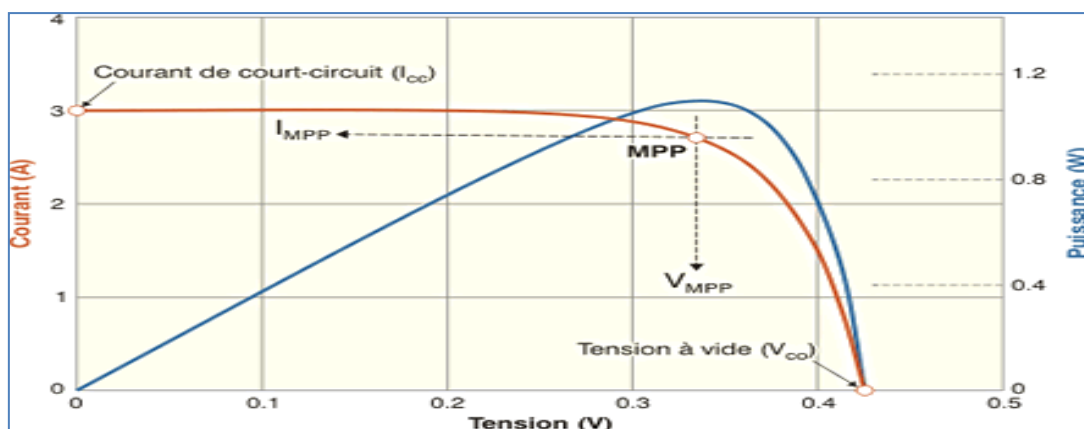


Figure I-5: Caractéristiques courant, tension et puissance d'une cellule solaire. [12]

I.6. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un ensemble de panneaux associés en série ou en parallèle ou bien en série et en parallèle pour assurer la production et la gestion de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer des modules photovoltaïques (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent

utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. [14]



Figure I-6: générateur photovoltaïque

I.6.1. caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les données essentielles permettent de déterminer la caractéristique d'un module photovoltaïque:

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil "
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$. [15]

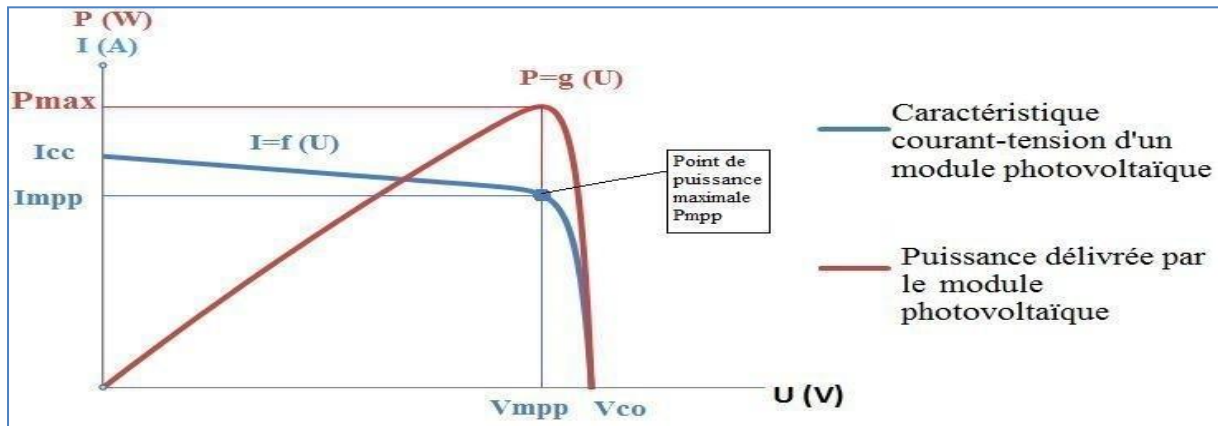


Figure I-7. La caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

I.6.2. Protection des modules photovoltaïques

Toutes les installations électriques ont besoin d'une protection et compris les générateurs photovoltaïques dans en distingue deux types de protection. [16]

- **Protection externe**

La protection externe a pour but d'intercepter les coups de foudre (via un dispositif de capture, ...) et d'écouler les courants de foudre jusqu'à la terre. Si une telle protection est nécessaire, le respect d'une distance minimale de séparation entre le système de protection (dispositif de capture et conducteurs du courant de foudre) et les panneaux photovoltaïque est à recommander chaque fois que cela est possible (la protection est alors dite isolée) et ce, afin qu'aucune décharge ne se produise entre ces deux éléments. Si cette distance ne peut être respectée (en cas de protection non isolée), il y a lieu de connecter les panneaux photovoltaïques à l'installation de protection contre la foudre et de prévoir une protection interne renforcée.

- **Protection interne**

Les surtensions et les effets des champs électromagnétiques sont les principales causes d'endommagement des équipements électriques et électroniques. Leurs origines sont multiples : coup de foudre direct sur une structure, coup de foudre indirect à quelques kilomètres, sur un bâtiment voisin ou sur des conducteurs d'alimentation électrique aériens, manœuvres de commutation sur le réseau électrique, ... Ces surtensions peuvent endommager l'installation photovoltaïque (onduleur, panneaux, ...) ainsi que l'installation électrique.

I.7. Convertisseurs d'énergie

Les convertisseurs sont les appareils qui servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. [17]

- a. **Convertisseurs DC/DC (hacheurs)** : Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé. [18]
- b. **Convertisseurs DC/AC (onduleur)** : Les fonctions de l'onduleur sont de convertir l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité en convertissant le courant continu de l'énergie photovoltaïque issue d'un panneau solaire en courant alternatif.

I.8. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

a. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [19]

b. Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Qui dépend des conditions météorologiques. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur. [19]

I.9. Conclusion

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. On a mis en évidence le principe de fonctionnement de cette technologie, présenter ces composants et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système. Dans le chapitre suivant nous sommes intéressé de détaillé le système de conversion photovoltaïque autonome car cette méthode permet d'exploiter l'énergie du soleil à divers fins, et aussi de détailler et d'identifier la majorité des parties constituantes de ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production. Nous allons entamer à présent, la modélisation des éléments principaux figurants dans une installation photovoltaïque.

Chapitre II

**Modélisation d'un système
photovoltaïque**

II.1. Introduction

Dans le but de la modélisation et la simulation d'une commande MPPT, la première étape passera par la modélisation d'un générateur photovoltaïque. Les outils disponibles aujourd'hui sur le marché sont nombreux. Depuis la simulation d'électronique de puissance, pour la modélisation du convertisseur DC/DC et du GPV, à la simulation de la commande pour décrire la MPPT, le logiciel doit permettre de simuler l'ensemble de la chaîne de conversion photovoltaïque. En utilisant Matlab/Simulink pour modéliser la commande, qui permet de décrire un système complet.

II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le cadre de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire (courant-tension) du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque. [20]

II.2.1 Les Principes de Conversion dans les Systèmes photovoltaïques

Le générateur photovoltaïque est l'élément principal d'un système photovoltaïque. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système. [6]

II.2.2. Modèle de la cellule solaire

Le modèle à une diode est le plus utilisé dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances une en série et une autre en parallèle. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la cellule ou du module photovoltaïque. [21]

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ou du module, elle est principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance du contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance parallèle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

- **Courant de court-circuit I_{cc} . [22]**

Il définit la quantité des paires électrons-trous créé et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement.

$$I_{cc} = qG (L_n + L_p) \quad (\text{II.1})$$

I_{cc} : courant de court-circuit de la cellule.

- **La tension en circuit ouvert V_{co}**

C'est la tension pour la quelle la diode à l'obscurité, fournit un courant nul .Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{oc} = V_{th} \ln (I_{ph}/I_s) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{th} = AKT_c/q \quad (\text{II.3})$$

I_s : Courant de saturation de la diode

V_{th} : Tension thermique.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

q : Charge d'un électron $1.6 \cdot 10^{-19}$

T_c : Température de la jonction

K : Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ (j/k)

- **Le facteur de forme FF**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{co}} \quad (\text{II.4})$$

V_m : Tension de point de puissance maximale (V).

I_m : Courent de point de puissance maximale (A).

- **Point de puissance maximale**

C'est le point (V_m, I_m) ou la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_m = V_m \times I_m \quad (\text{II.5})$$

- **La puissance du flux lumineux incident**

$$P_{in} = S.E \quad (\text{II.6})$$

E : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

S : la surface effective des cellules.

- **Température de jonction**

La température de jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{800} E \quad (\text{II.7})$$

Avec :

NOCT : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : la température ambiante.

- **Le rendement de convection d'énergie η**

C'est le rapport de la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_m}{P_{in}} \quad (\text{II.8})$$

Ou bien :

$$\eta = \frac{I_m V_m}{S.E} \quad (\text{II.9})$$

II.2.3. Les modèles mathématiques

Ils existent dans la littérature plusieurs modèles des générateurs photovoltaïques qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

a. Cellule idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme : $I_d = I_s \left(e^{\frac{V_{pv}}{A k T_c}} - 1 \right)$ on peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photo-courant supplémentaire, I_{ph} dont le sens opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule claire, on recueille ce courant. Le courant sous lumière vaut:[23]

$$I = I_{ph} + I_d \quad (\text{II.10})$$

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{V_{pv}}{A k T_c} - 1 \right)} \quad (\text{II.11})$$

I : le courant disponible

I_{ph} : le courant produit par la photodiode

V : la tension aux bornes de la cellule

$$\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV à } T_c = 300^\circ\text{K pour le silicium poly-cristallin}$$

I_s : courant de polarisation de la diode ou courant de saturation

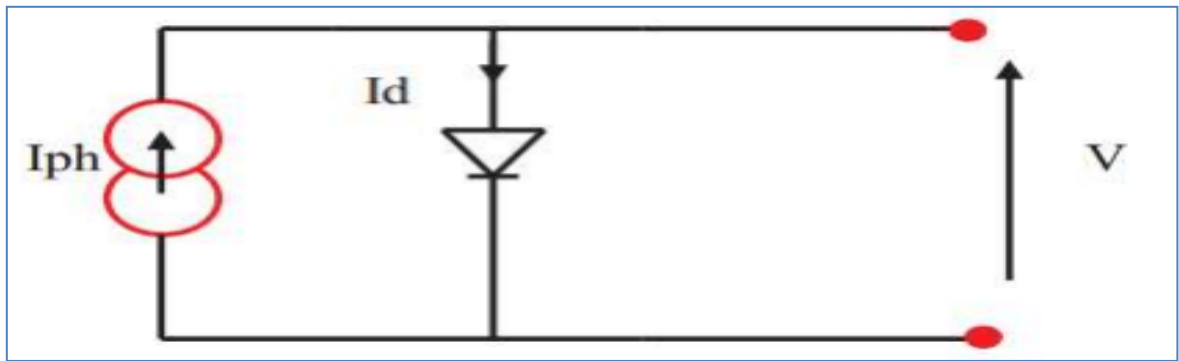


Figure II-1 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

b. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus utilisé et il donne de très bonne précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant. [24]

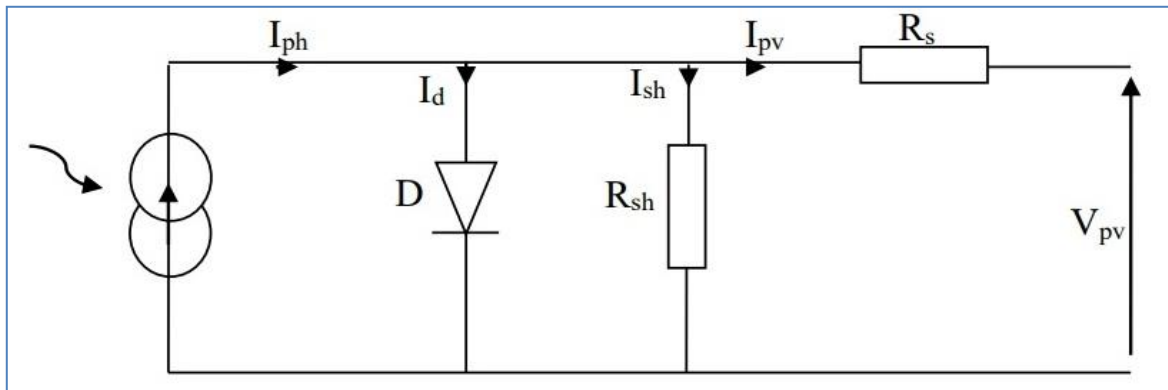


Figure II-2 : schéma électrique équivalent d'une cellule à une diode

- ◆ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.12})$$

Tel que :

I_{pv} : le courant délivré par le module.

I_{ph} : le photo courant.

I_d : le courant de la diode.

I_{sh} : le courant shunt.

- ◆ Le courant produit par la photo pile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{c,ref})] \quad (\text{II.13})$$

Tel que :

E_{ref} : Ensoleillement de référence.

T_c : Température absolue de la cellule.

$T_{c\text{ref}}$: Température de référence.

♦ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot e^{\frac{q(V+R_s I_{pv})}{A n_s K T_c}} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{-E_g}{K T_c}\right)} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$E_g = 1.1 eV$$

E_g : L'énergie du gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

♦ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(V+R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (\text{II.16})$$

Tel que :

R_s : résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

R_{sh} : Résistance shunt qui prend les fuites inévitable du courant qui intervient entre les bornes opposées positives et négatives d'une cellule.

- L'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) est donnée comme suit :

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{c\text{ref}}) \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K T_c}\right)} e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{A K T_c} - 1\right)} \quad (\text{II.17})$$

c. Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent d'un modèle à deux diodes est représenté sur la figure II.3. Ce circuit inclut deux diodes parallèlement et une résistance série et une autre résistance shunt. Il peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module comportant plusieurs cellules, ou pour un panneau photovoltaïque composé de plusieurs cellules.

L'avenage de ce model c'est qu'il établi en appliquant seulement des données standard. [25]

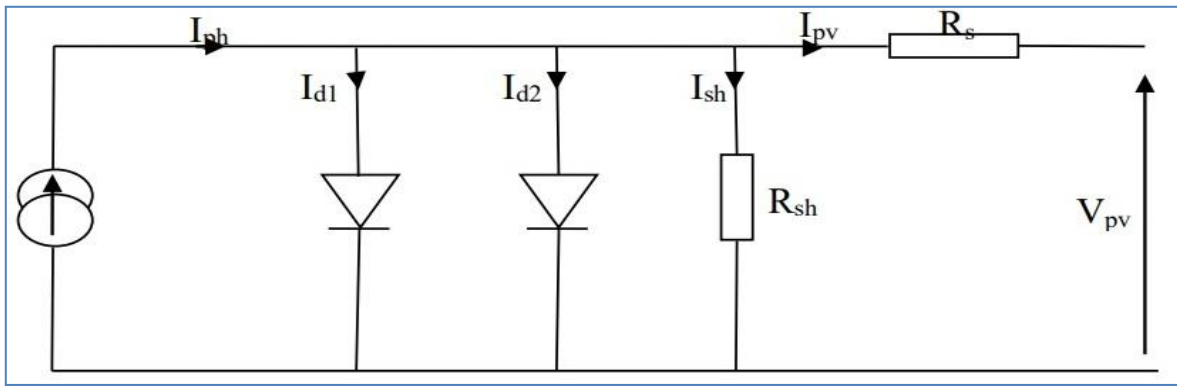


Figure II-3: schéma électrique équivalent d'une cellule à deux diodes

Le courant généré le module est donnée par la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] - P_4 T_c^3 e^{(-\frac{E_g}{KT_c})} e^{(\frac{V + R_s I_{pv}}{A n_s K T_c}) - 1} - P_5 T_c^3 e^{(-\frac{E_g}{2KT_c})} e^{(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{2 A n_s K T_c}) - 1} \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.18)$$

Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode qui donne de très bonnes précisions, et nous avons utilisé le panneau SIEMENS SM 110-24 de 110 W. Le tableau (II-1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisé dans les conditions standards ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$):

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110W
Courant au point de puissance max I_m	3.15A
Tension au point de puissance max V_m	35V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{co}	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$	1.4mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{co} \beta(V_{co})$	-152mV/°C
Puissance maximale (W)	110W

Tableau II-1 : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS SM 110-24.

La figure (II.4) représente les caractéristiques courant-tension I_{pv} (V_{pv}) et puissance-tension P_{pv} (V_{pv}) du module SIEMENS SM 110-24 pour un éclairement et une tension donnée ($E = 1000W/m^2$, $T_c=25^\circ C$).

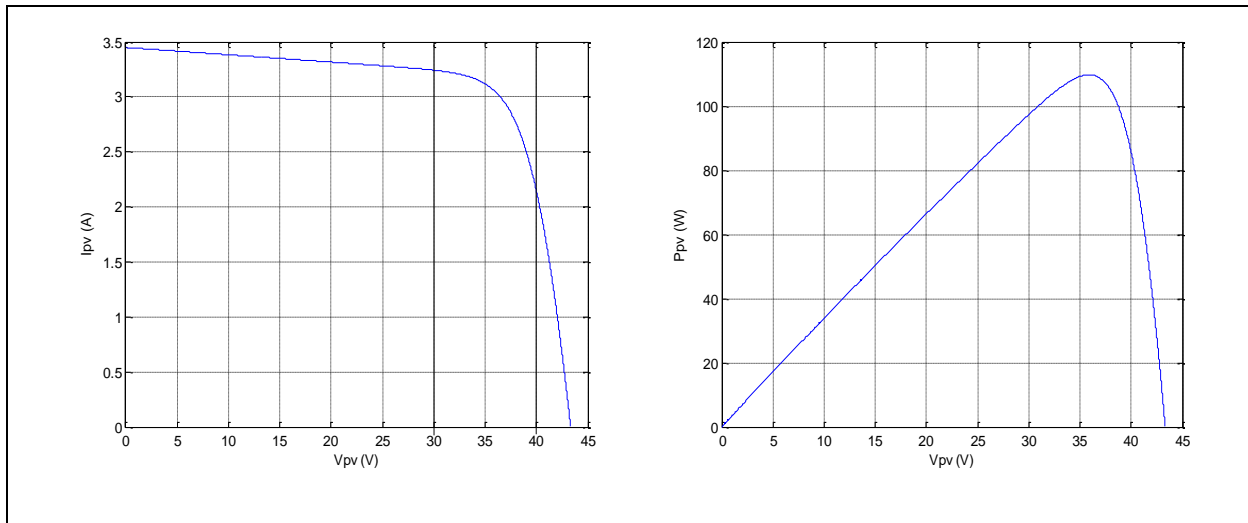


Figure II-4 : Caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) ($E=1000W/m^2$, $T_c = 25^\circ C$)

On remarque dans la caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (1) : le courant reste presque constant quelque soit la tension, pour cet intervalle, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (2) : qui se distingue dans par une variation de courant correspondant a une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable a un générateur de tension.

La zone (3) : correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire en les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

II.3. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Pour valider ce module nous l'avons simulé en effectuant un couplage direct du panneau photovoltaïque à une charge capacitive et nous avons déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux d'irradiation à température constante et à différentes températures a irradiation constant.

Le schéma de simulation est représenté dans la figure (II.5)

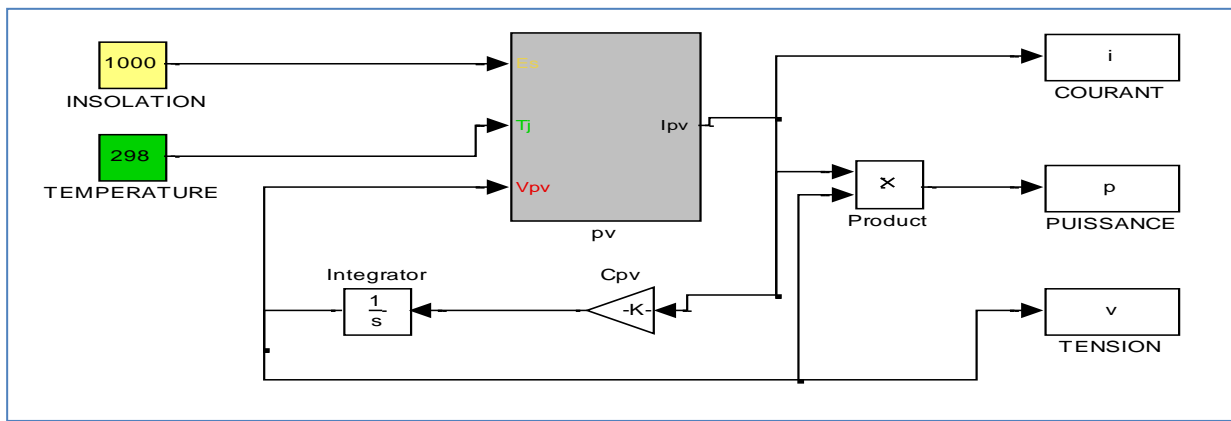


Figure II.5 : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque

II.3.1. Influence de l'ensoleillement

Pour voir l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module, on fait varier la valeur de l'ensoleillement tout en gardant la température constante ($T_c = 25^\circ\text{C}$) et on trace les caractéristiques $P_{pv}-V_{pv}$ et $I_{pv}-V_{pv}$

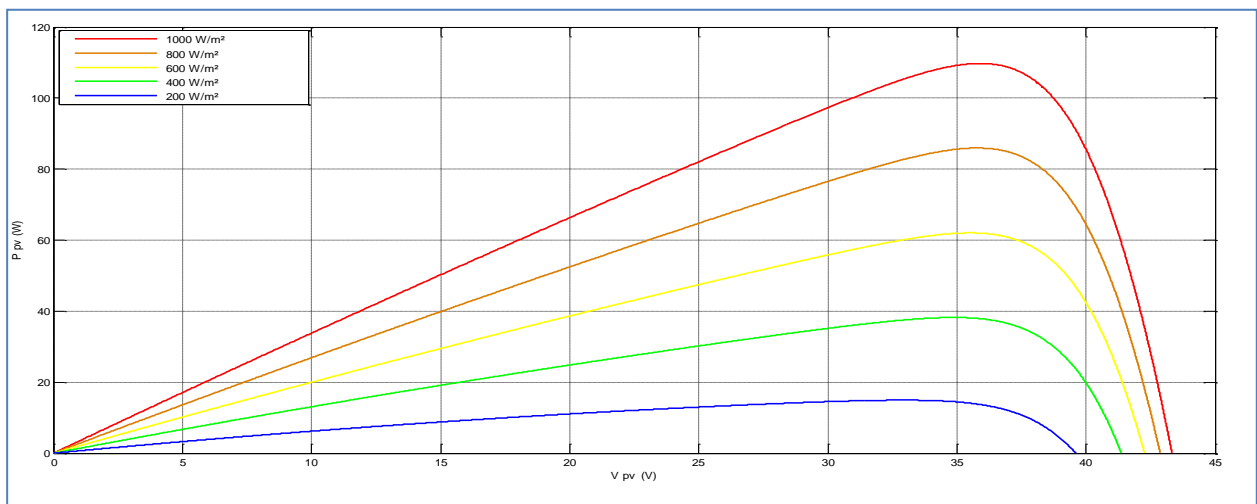


Figure II.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

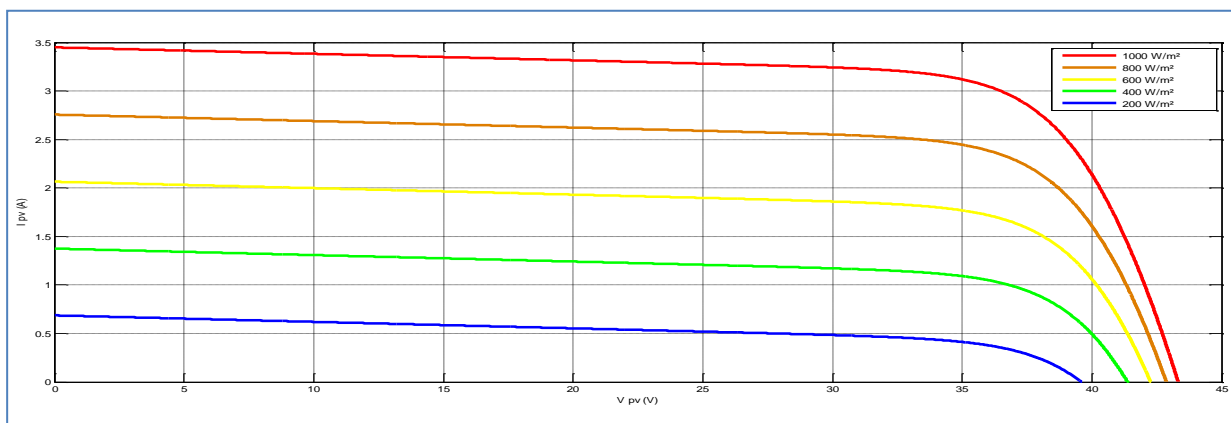


Figure II-7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

II.3.2. Influence de la température

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - V_{pv} et I_{pv} - V_{pv} , pour des différentes températures, et avec un ensoleillement constant $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

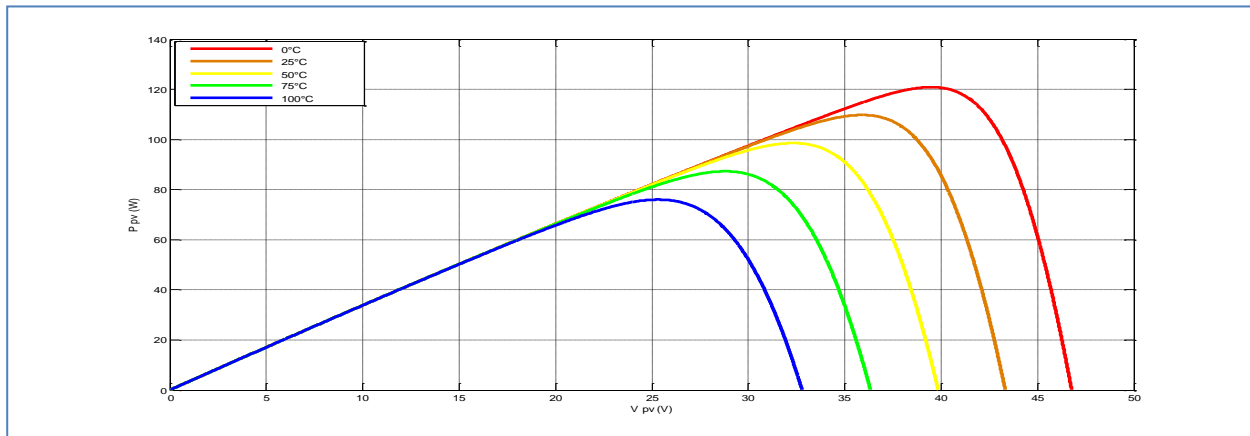


Figure II-8 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

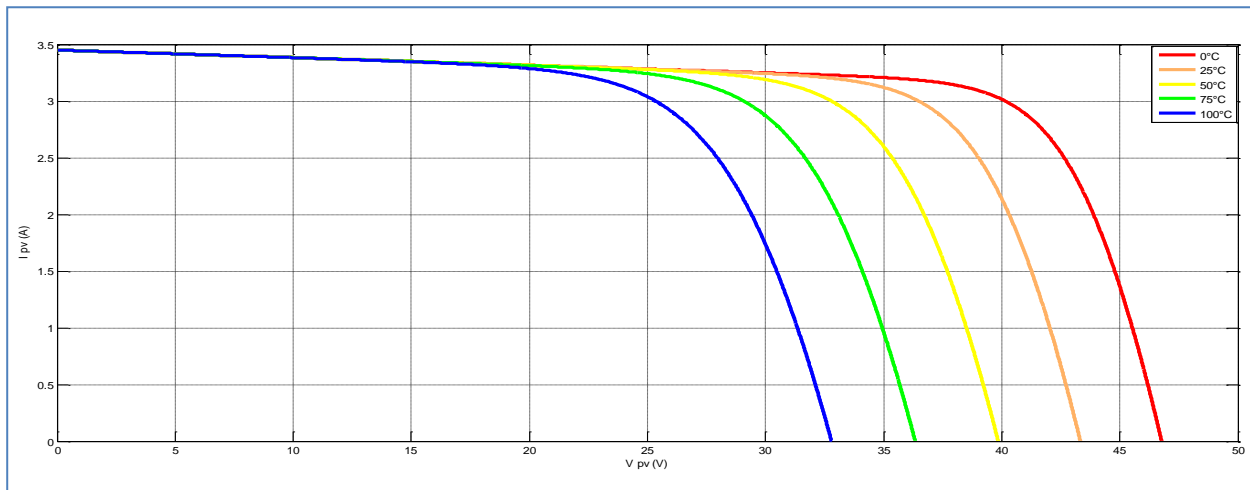


Figure II-9 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$.

II.3.3. Discussion des résultats

◆ Influence de l'ensoleillement

La température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (II.6 et II.7).

On remarque que :

- L'influence due à la diminution de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit I_{cc} . Par contre la tension de circuit ouvert V_{co} diminue faiblement.
- Le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue.
- Le courant produit par le module I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'ensoleillement E . par contre la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est en fonction de la différence du potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même.

◆ L'influence de la température

Pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 maintenu constant, nous varions la température. Les figures (II.8-II.9) représentent les résultats obtenus de notre simulation.

On remarque que :

- Le courant de court circuit I_{cc} est légèrement dépendant de la température, alors que la tension du circuit ouvert V_{co} est très sensible à la variation de la température.
- L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de température.

II.4. Les convertisseurs d'énergie

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. [26]

II.4.1 Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Les convertisseurs DC/DC dont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé. [27]

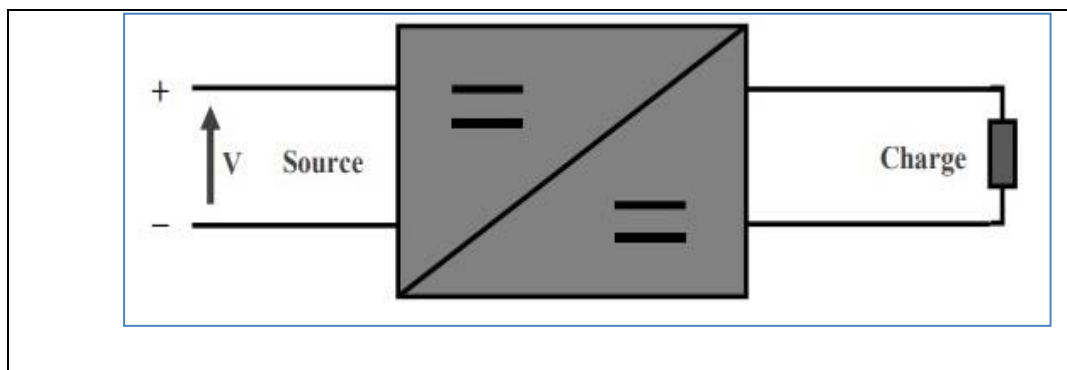


Figure II.10 Schéma de convertisseur DC/DC

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (BUCK). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (BOOST).

II.4.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. [28]

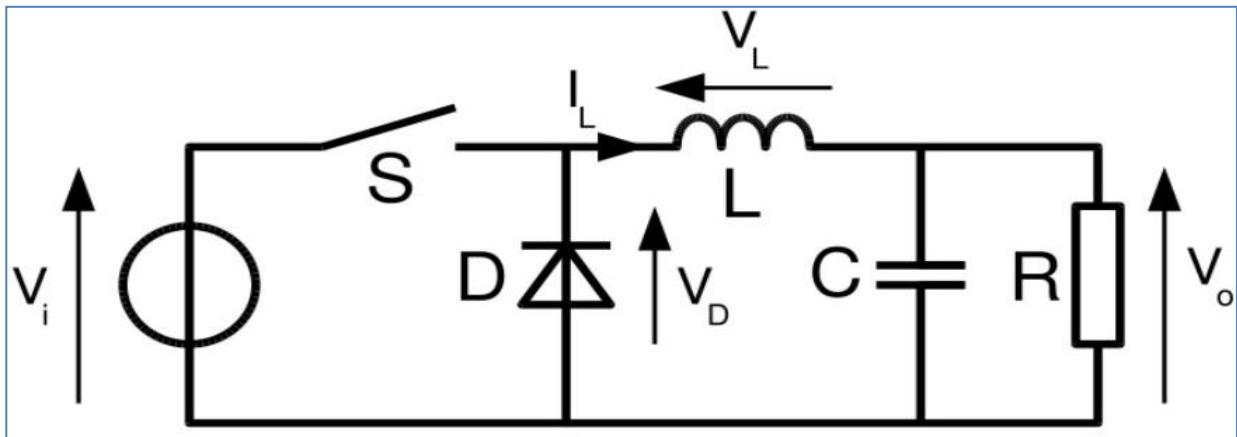


Figure II.11 : Circuit électrique d'un hacheur série

Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

Fonctionnement :

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction αt de la période de découpage T . La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L . Lors du blocage de S , la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L .

II.4.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (II.12) représente le circuit électrique du Boost. Dans un premier temps, le transistor S est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor S s'ouvre et l'inductance L s'opposant à la diminution du courant, génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode D . [29]

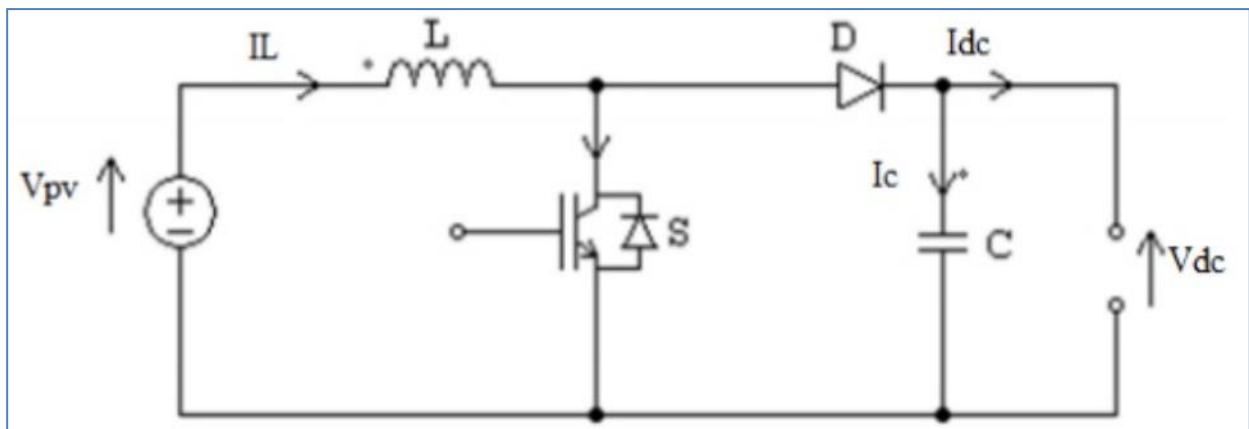


Figure II.12 : Circuit électrique du convertisseur boost (hacheur parallèle)

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode polarisée en inverse, est

bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$, le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de αT à T .

La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{dc}$, dans cette phase le condensateur C se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha) V_{dc} \quad (\text{II.19})$$

$$(1 - \alpha)I_L = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.20})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.21).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.21})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{II.22})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes constitutions d'un système photovoltaïque ainsi que la modalisation du générateur PV.

De plus, nous avons présenté les comportements de notre système et ses performances sous l'influence de différents paramètres météorologiques à savoir l'influence de l'ensoleillement et la température et visualiser les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module photovoltaïque.

Par ailleurs, en a fait une modalisation du convertisseur DC/DC (hacheur survolteur), et cela pour pouvoir établir la condition de fonctionnement adéquate nécessaire à son couplage avec le générateur photovoltaïque. Dans le chapitre suivant nous allons procéder à la simulation de la commande MPPT avec différentes méthodes d'optimisation et de la recherche du point de puissance maximale.

Chapitre III

**MPPT-simulation et
interprétation des résultats**

III.1. Introduction

Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et du système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration du rendement du générateur photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur PV dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la variation du point de puissance maximale. [13]

III.2. Adaptation de l'énergie photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance fini pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximale). Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale, entre la source photovoltaïque et la charge [30].

III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale

Les modules photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire Des lois de commandes spécifiques existent pour amener ses dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles sont les raisons de ce changement. Pour le cas des sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature «RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMUM» ou bien «MAXIMUM POWER POINT TRACKING» (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [31].

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement

quelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charge qui peuvent survenir à tout moment.

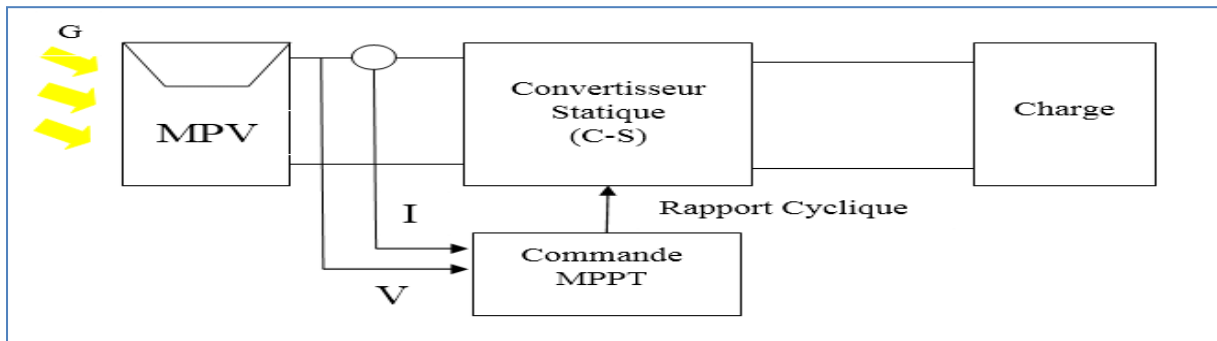


Figure III-1 : Chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT.

III.4. Techniques de poursuite du point de puissance maximale

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement en MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes d'optimisation sont plus ou moins performantes basées sur les propriétés du générateur photovoltaïque [32].

III.4.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) avec une constante (C) de la tension des panneaux V_{pv} , puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [32], [34].

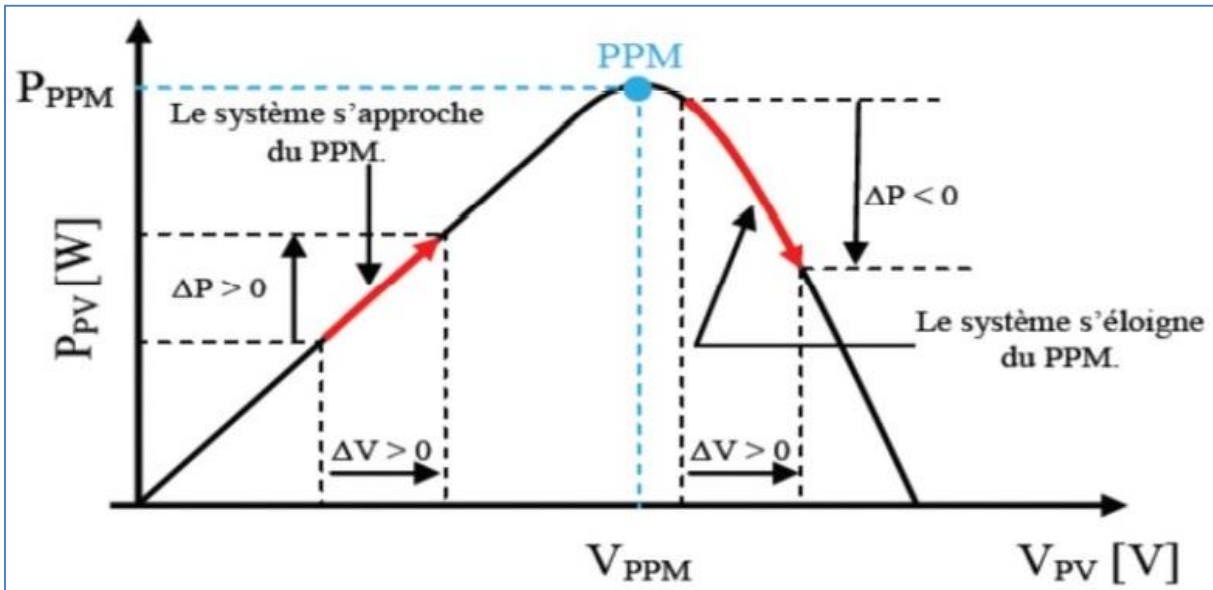


Figure III-2 : Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire.

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante :

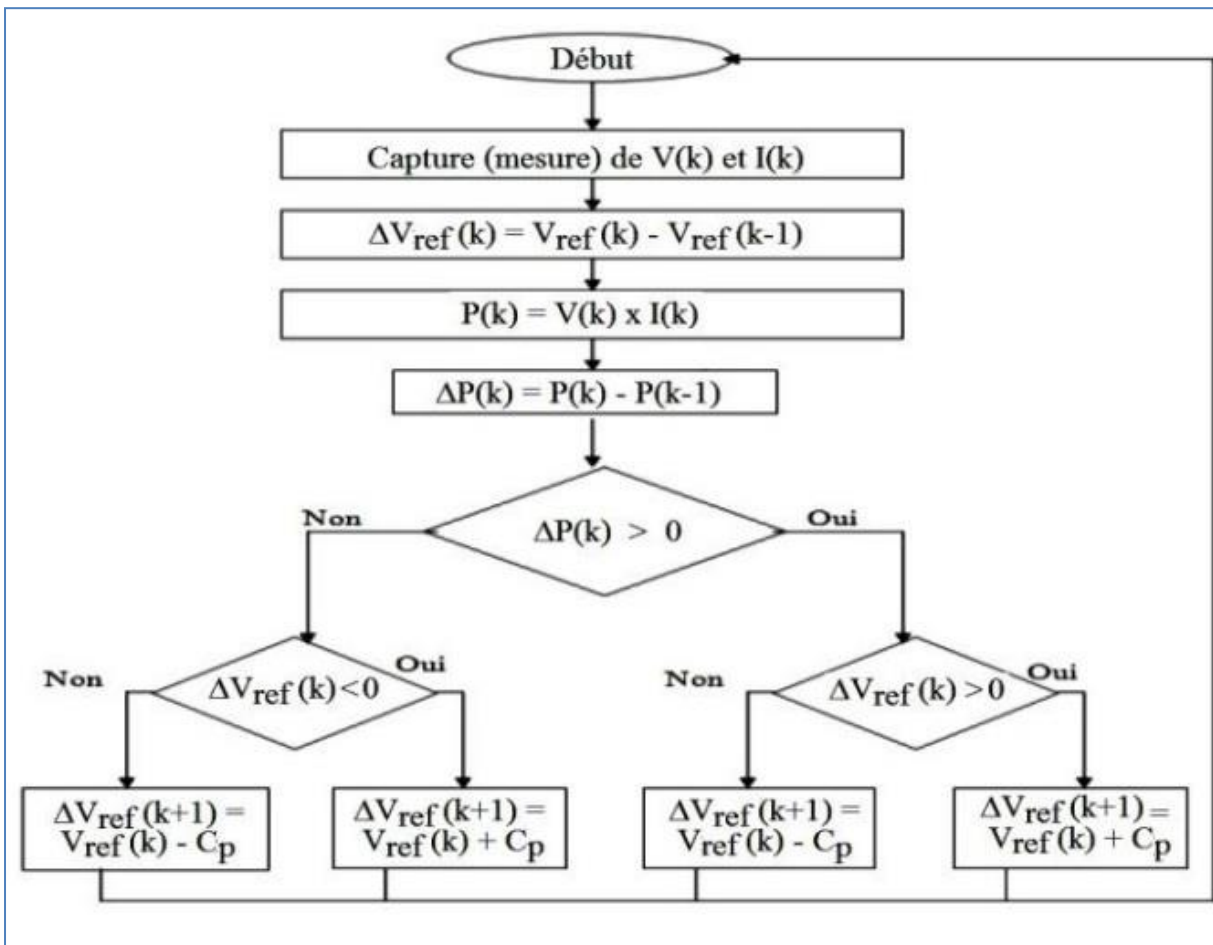


Figure III-3: Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O).

Le tableau III.1 résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation

Perturbation	Variation de la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Le tableau III.1 Les modes de perturbation de la méthode P&O.

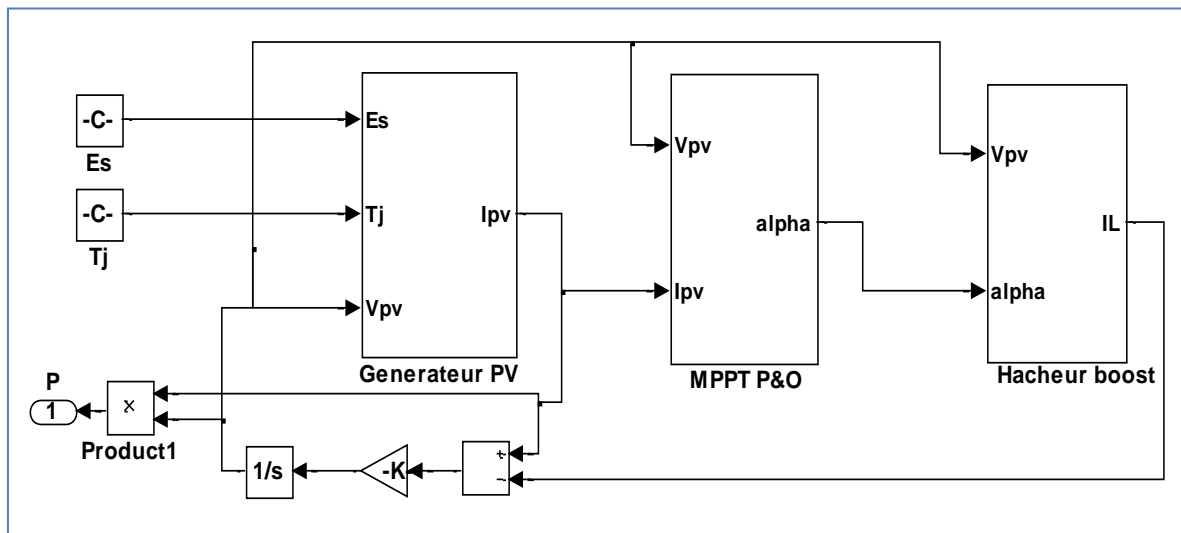


Figure III-4 : Schéma de simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Après avoir réalisé le système photovoltaïque avec la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O) on aura les résultats suivant dans la figure III.7 de l'influence de l'ensoleillement sur la puissance P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} .

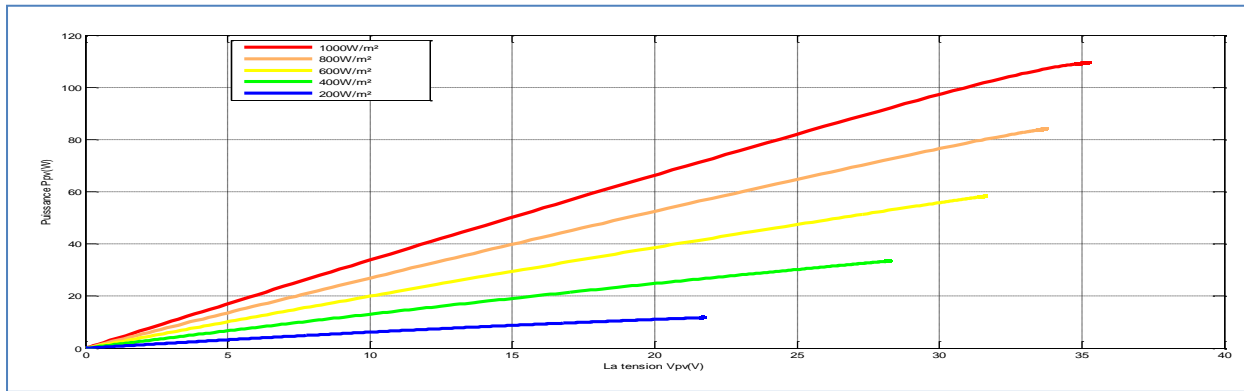


Figure III-5 : Influence de l’irradiation sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec optimisation par la P&O

Dans les figures suivantes on observe la puissance et la tension de notre générateur qui seront constantes au fil du temps grâce à l’algorithme de la P&O qu’on a introduit dans notre bloc de simulation

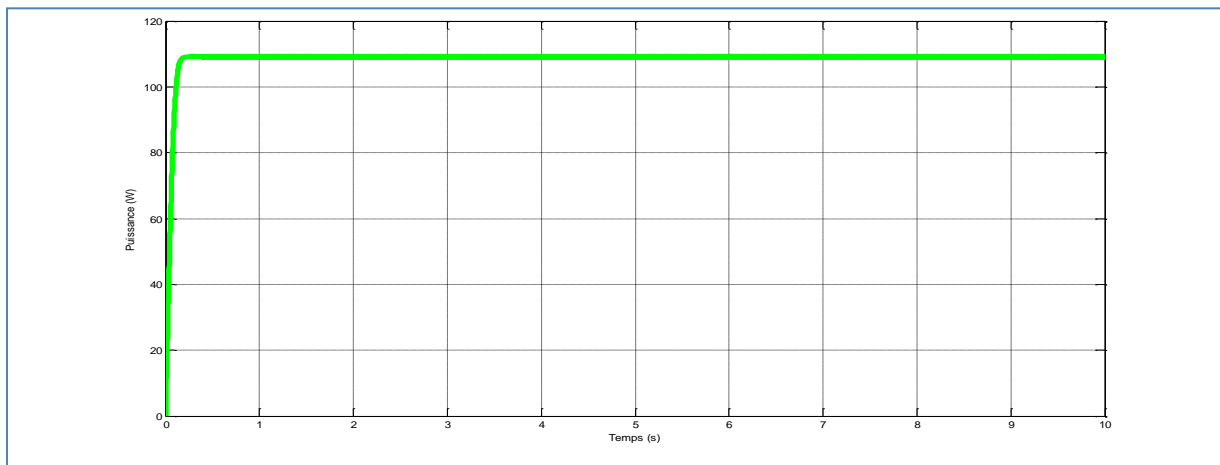


Figure III-6 : Allure de la puissance du PV sous les conditions STC ($1000W/m^2$, $T=25^\circ C$)

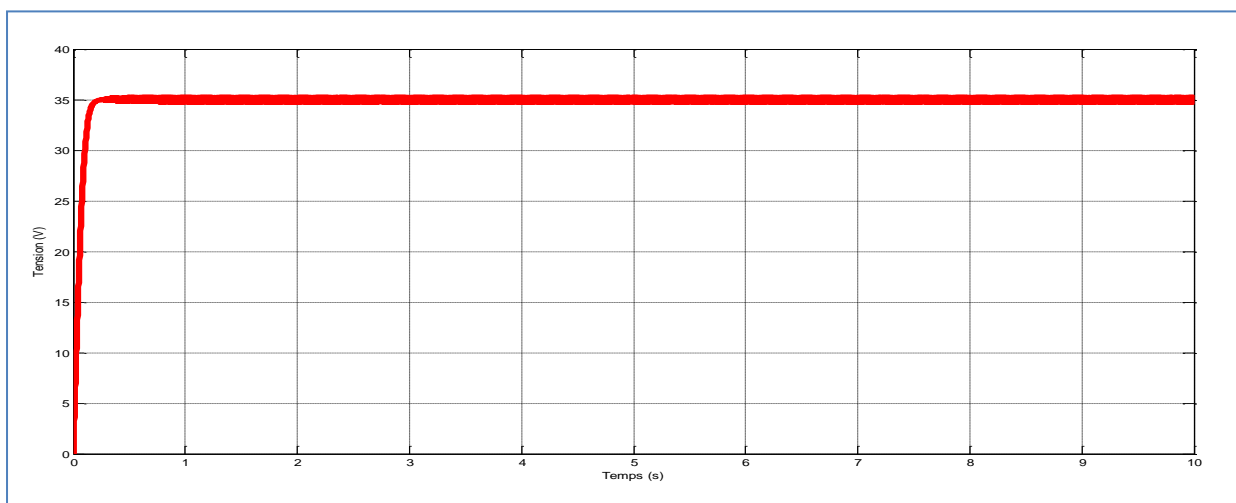


Figure III.7 : Allure de la tension du PV sous les conditions ($1000W/m^2$, $T_a=25^\circ C$)

III.5. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations qu'on a obtenu ;

- Quand le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintien le point de fonctionnement a ce dernier (Figure III.7).
- On remarque dans la figure (III.8) et la figure (III.9) que la tension et la puissance convergent vers le point de fonctionnement maximal, et elle les maintient pondant tout le temps de fonctionnement.
- On remarque aussi que les allures obtenues par la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présentent des oscillations, qui sont dû à la perturbation continue de la tension de fonctionnement.

III.6. Méthode de perturbation et d'observation améliorée (P&O améliorée)

Les principaux problèmes de la méthode de perturbation et observation (P&O) sont le mauvais suivi du point de puissance maximale en cas de changement rapide de l'éclairement et les oscillations très importantes de la puissance en régime permanent.

L'algorithme de cette méthode dépend de la définition du point sur la courbe PV similaire à la méthode conventionnelle. D'où, compare la courbe de puissance avec une courbe engendrée appropriée ($E_s \cdot dP/dV$) Comparer les deux courbes, divise la région de fonctionnement PV en quatre secteurs, comme indiqué dans la Figure 10. Par conséquent, un pas de tension variable peut être utilisé une fois que l'emplacement sectoriel du point de fonctionnement est défini. Par conséquent, un grand pas de tension peut être utilisé lorsque le point de fonctionnement est éloigné du MPP (secteur 1 et 4) afin de réduire le temps passé pour atteindre le MPP. Et lorsque le point d'exploitation est proche du MPP (secteur 2 et 3) une taille de pas moins importante peut être utilisée pour lui réduire les oscillations en régime permanent.

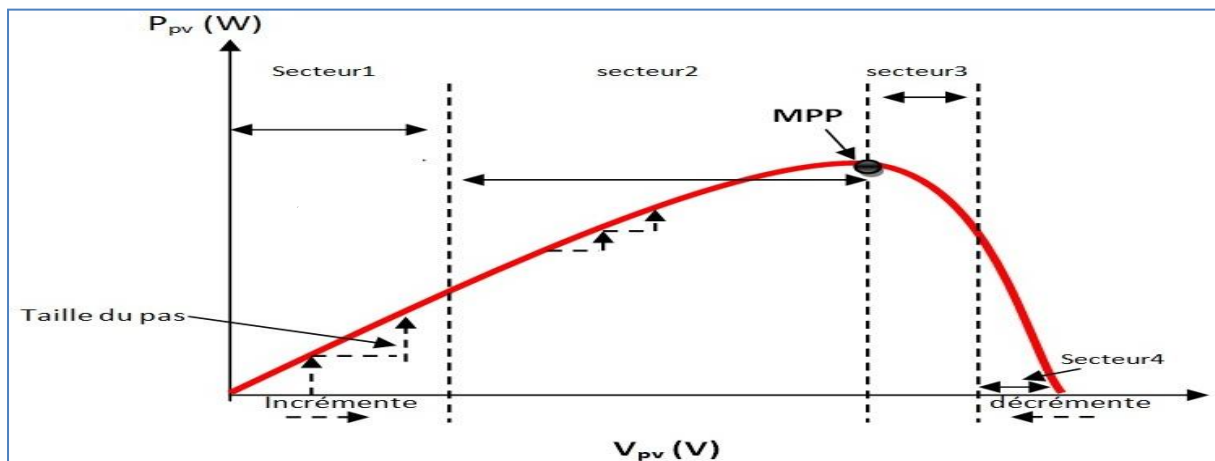


Figure III-8 : La technique P&O modifiée à pas variable

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante

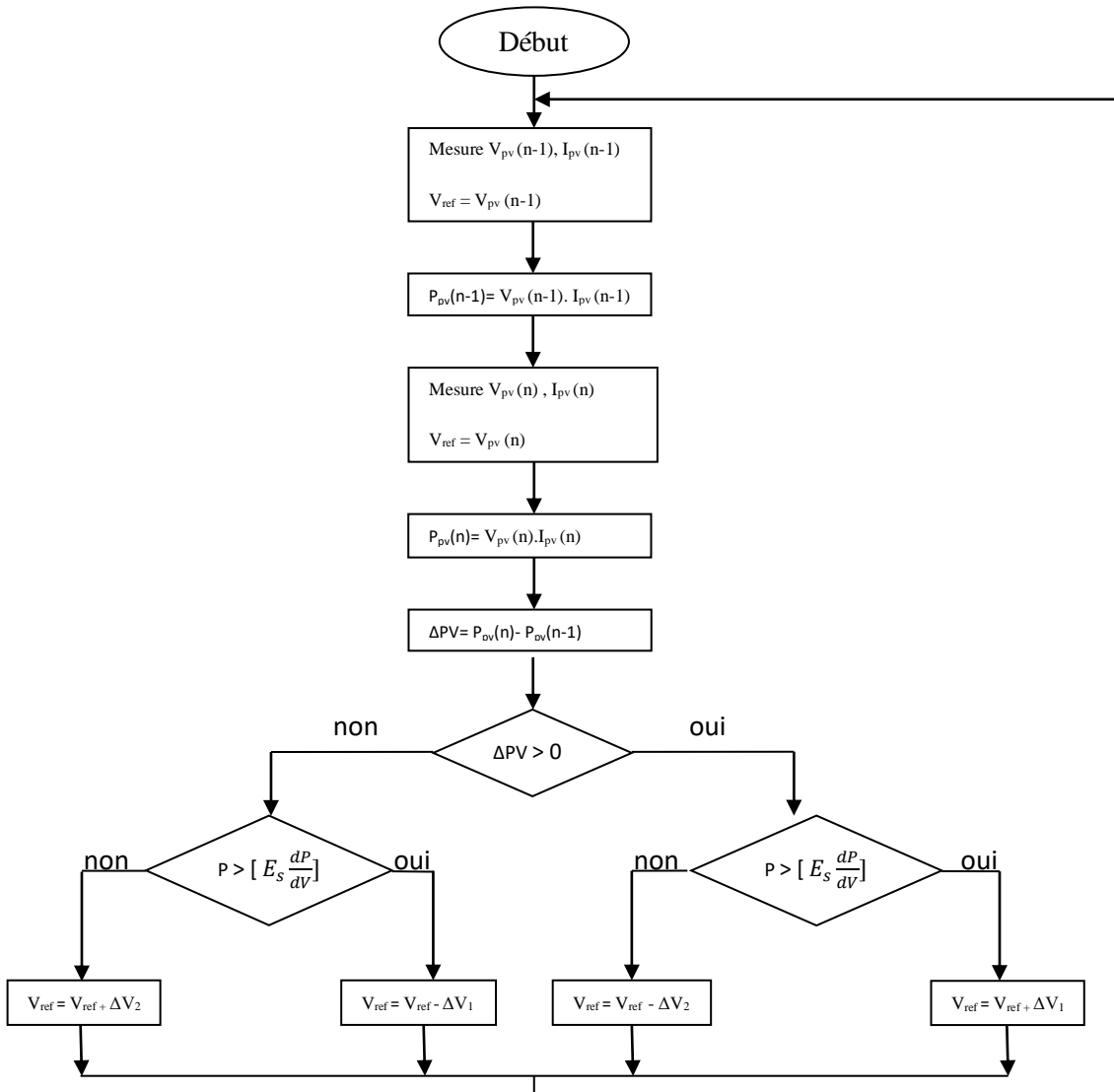


Figure III-9 : Organigramme de la méthode perturbation et observation améliorée.

Après avoir modifié l’algorithme de la méthode de perturbation et observation on aura les allures des figures (III.12 et III.13) des caractéristiques de la puissance et la tension photovoltaïque en fonction du temps et on va les comparer par rapport aux résultats de la P&O.

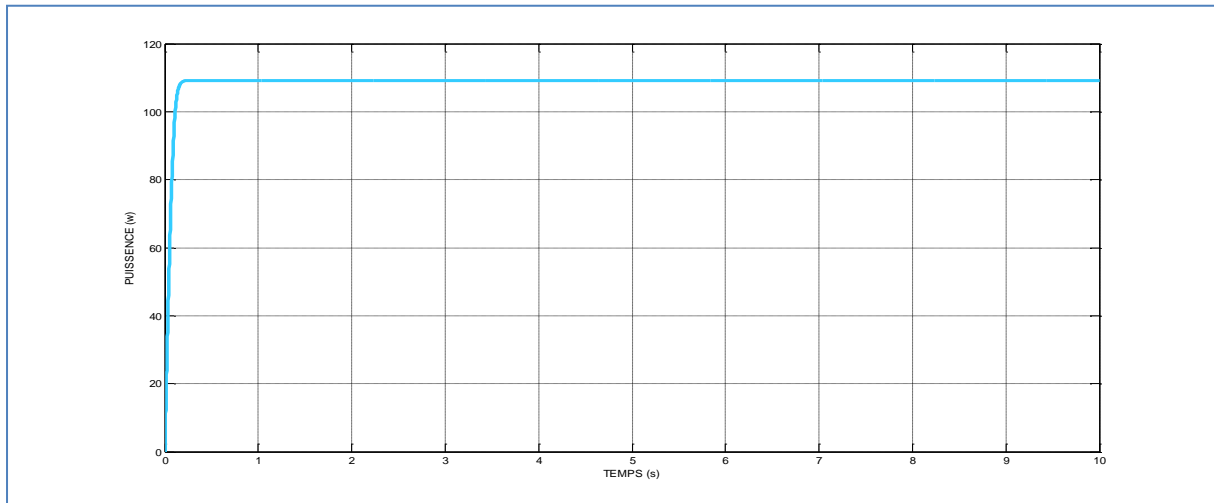


Figure III-10 : L'allure de la puissance photovoltaïque de la P&O améliorée.

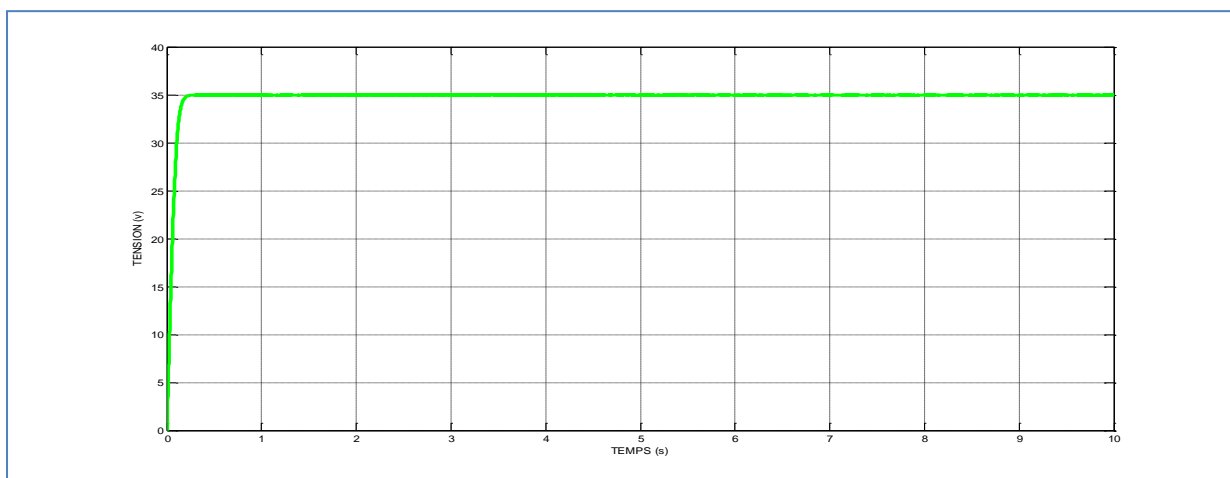


Figure III-11 : L'allure de la tension photovoltaïque de la P&O améliorée.

III.7. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations, on constate que les oscillations de la puissance en régime permanent des allures obtenues par l'application de la méthode de perturbation et observation améliorée (P&O améliorée) sont réduites.

III.8. Comparaison entre la P&O et la P&O améliorée

Sur la figure (III.12), nous présentons l'allure de la puissance photovoltaïque pour les conditions standards.

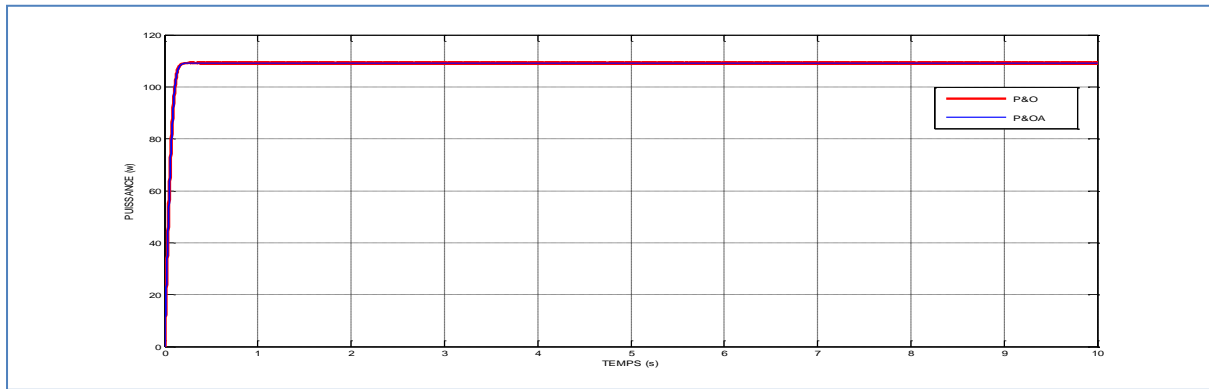


Figure III-12 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O) et (P&OA).

On fait un zoom sur l'allure de puissance au régime permanent pour mieux visualiser l'allure obtenue par les deux méthodes.

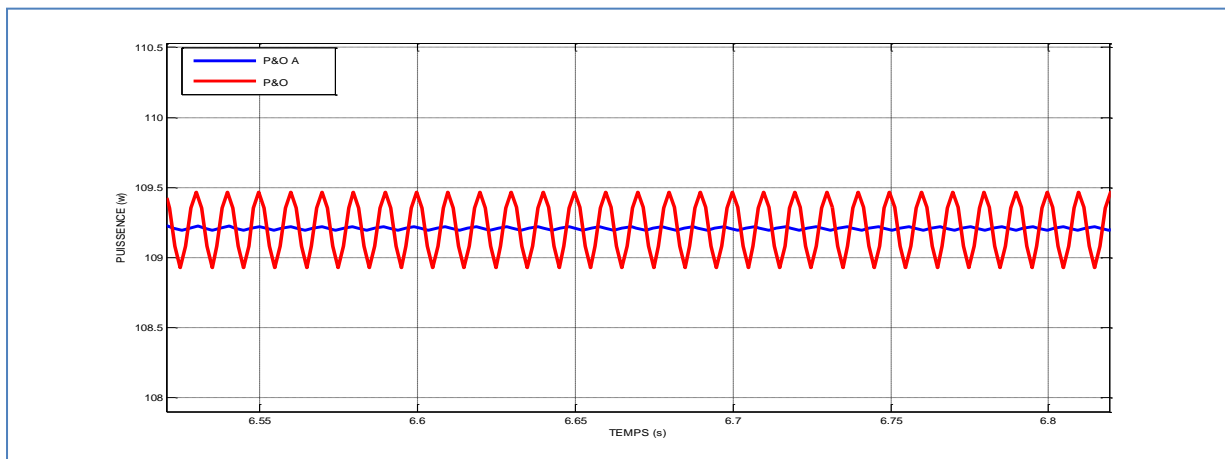


Figure III-13 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque au régime permanent avec (Zoom)

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats de la simulation, on remarque que la présence des oscillations au régime permanent de la commande MPPT par la méthode de perturbation et observation sont importantes par rapport à la méthode de perturbation et observation améliorée. Au final la méthode (P&OA) est meilleure, elle est efficace, stable et plus précise.

III.9. la méthode de conductance incrémentielle (CI)

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension.

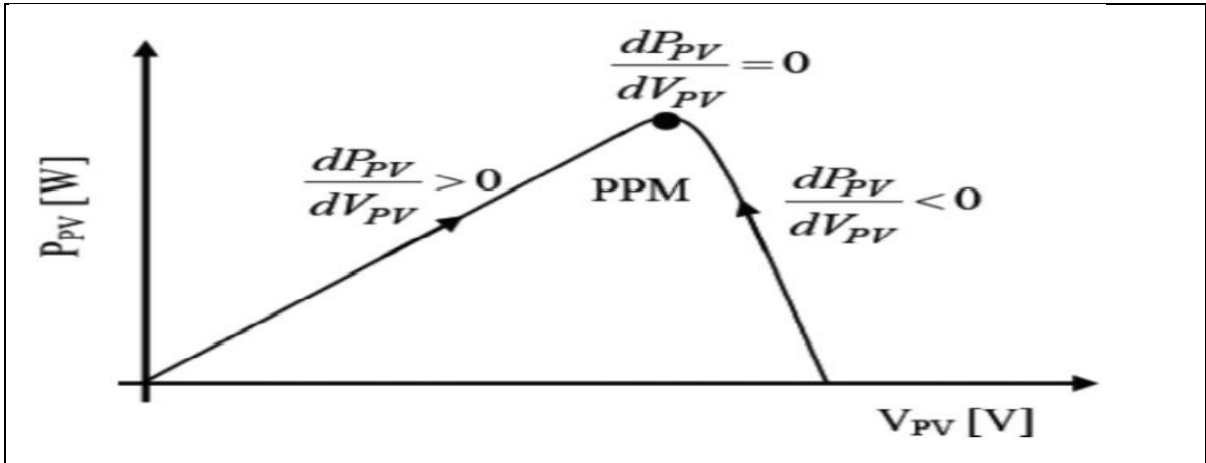


Figure III-14 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur la caractéristique de la puissance.

L'organigramme de l'algorithme est montré sur la figure (III.16) :

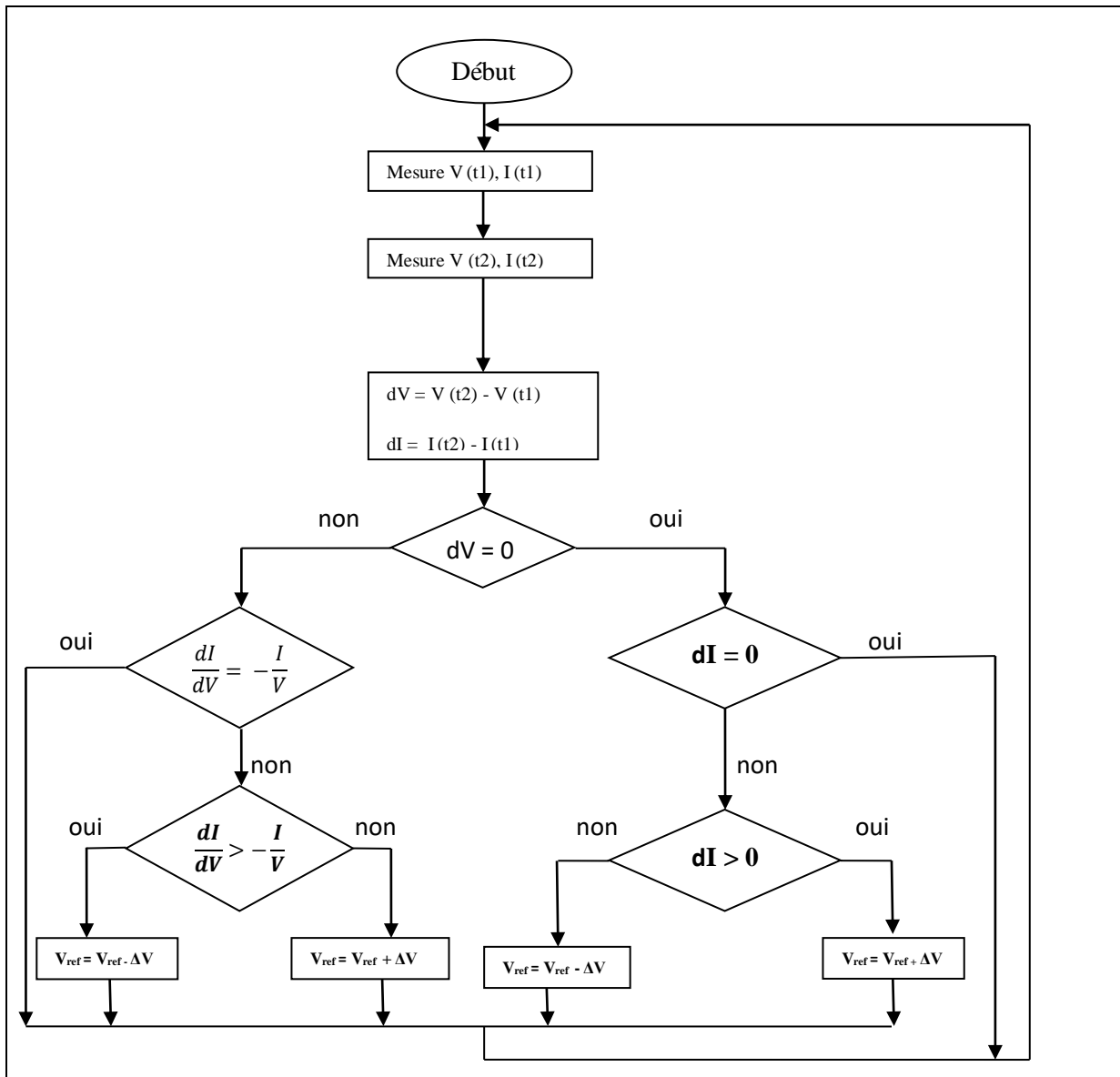


Figure III.15: Organigramme de la méthode conductance incrémentielle (CI).

Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance ($G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) et de sa dérivée ($\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ($\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$). La méthode conductance incrémentielle est souvent jugé efficace de point de vue efficacité de recherche du point de puissance maximale. Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une capacité de calcul grande, ce qui réduit la période de contrôle du système [33].

Le terme (I_{pv}/V_{pv}) est la conductance instantanée alors que ($\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$), désigne la variation de cette conductance. Pour éviter que la différentielle de la tension du panneau ΔV ne devienne pas nulle, lorsque le PPM est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui va conduire à une division par zéro, l'algorithme fait un teste de ΔV .

Si ΔV est nul il va tester ΔI s'il est aussi nul. Si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de ΔI pour déterminer la position du PPM et ajuste le rapport cyclique α . Si $\Delta I > 0$ donc on décrémente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

Si ΔV est différent de zéro, il teste l'égalité de ($\Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} = - I_{pv} / V_{pv}$). Si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de ($\Delta I_{pv} / \Delta V_{pv}$) pour déterminer la position du PPM et ajuster le rapport cyclique α .

Si ($\Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} > - I_{pv} / V_{pv}$) donc on décrémente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

III.9.1. Applications et simulations de la méthode CI

Nous allons présenter les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme CI.

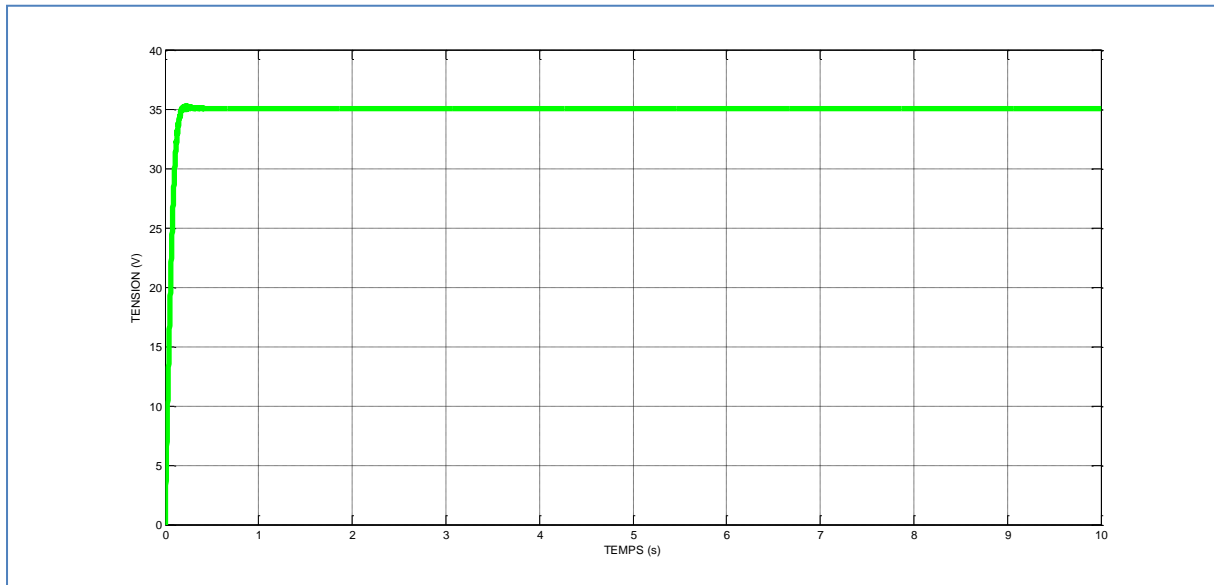


Figure III-16 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque avec l'application de la CI.

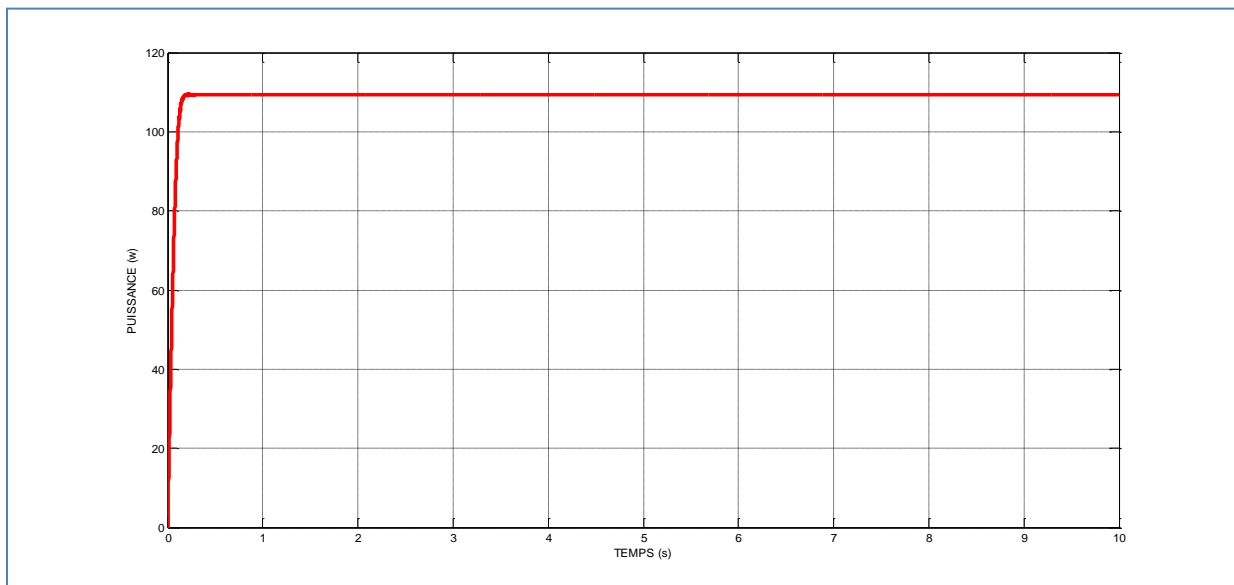


Figure III-17 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application du la CI.

III.9.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations, on remarque que les fluctuations de puissance en régime permanent des allures obtenues par l'application de la méthode de conductance incrémentielle (CI) sont réduites.

III.10. Méthode de Conductance Incrémentale améliorée (CI Améliorée).

L'algorithme proposé comportant l'élimination complète des calculs de division ainsi, simplifier la structure de l'algorithme. De plus, une taille de pas qui ne dépend que du changement de puissance PV, éliminant ainsi sa division par le changement de tension PV.

Cela se traduira par une technique à pas variable sans division totale qui a non seulement les mérites de performances améliorées en régime permanent et transitoire, mais a également une implémentation d'algorithme simple. [35]

Pour maintenir une vitesse de réponse rapide et une précision élevée en régime permanent du système PV dans des conditions environnementales changeantes, le système de contrôle MPPT est différent de la méthode de construction de module adopté actuellement, et combiné a un algorithme de contrôle optimisé, il peut obtenir un effet de suivi plus précis, plus rapide et plus stable. [36]

Une modification est apportée à l'algorithme de la conductance incrémentale afin d'éliminer tous les calculs de division, les règles d'algorithme peuvent être réécrites comme suit :

- $(V \times \Delta I) + (I \times \Delta V) = 0$. le PPM est atteint
- $(V \times \Delta I) + (I \times \Delta V) > 0$, $\Delta V > 0$. le point de fonctionnement est a gauche du PPM
- $(V \times \Delta I) + (I \times \Delta V) > 0$, $\Delta V < 0$. le point de fonctionnement est a droite du PPM
- $(V \times \Delta I) + (I \times \Delta V) < 0$, $\Delta V > 0$. le point de fonctionnement est a droite du PPM
- $(V \times \Delta I) + (I \times \Delta V) < 0$, $\Delta V < 0$. le point de fonctionnement est a gauche du PPM

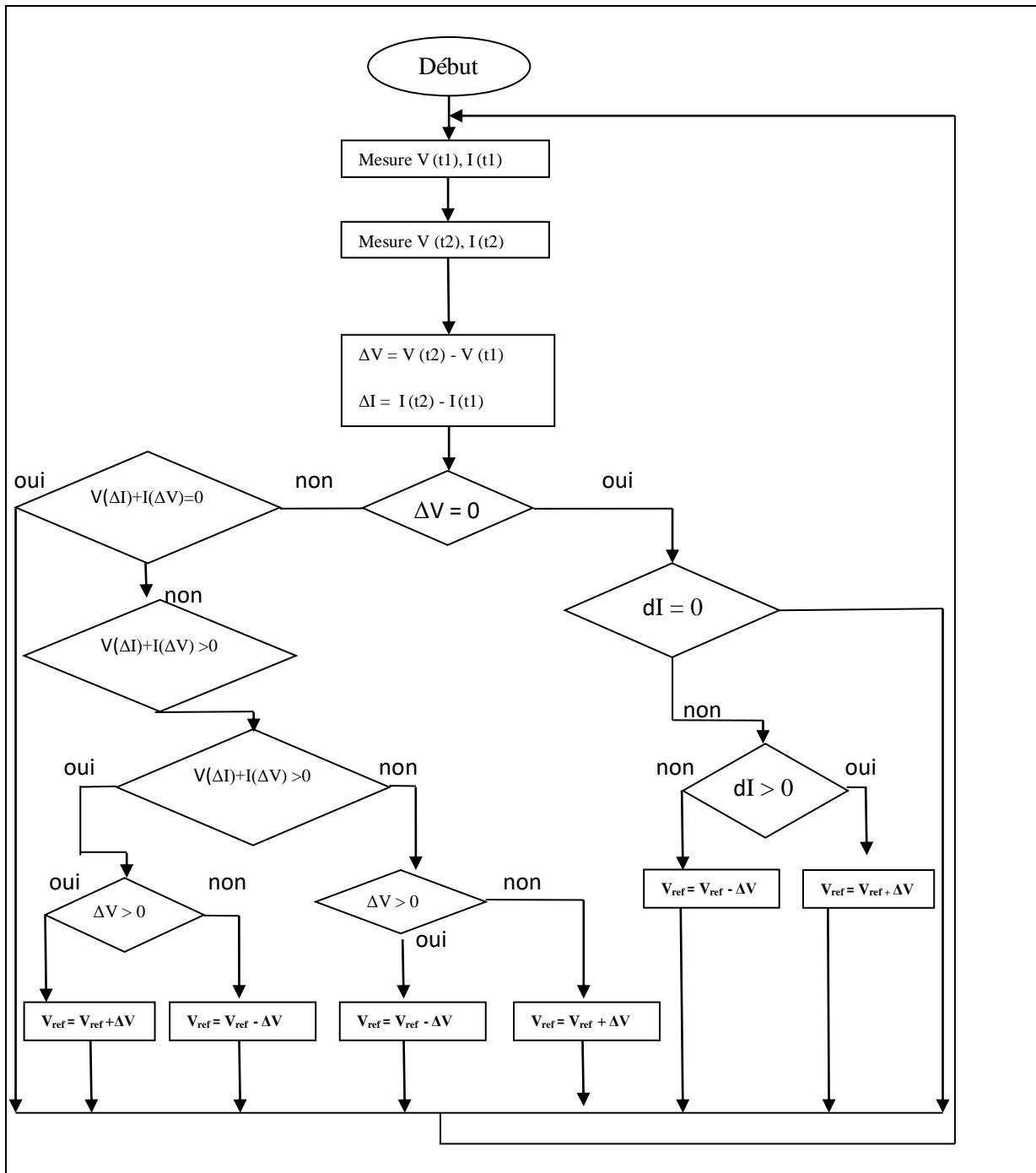


Figure III.18 : Organigramme de la méthode conductance incrémentale améliorée (CIA).

L'organigramme de l'algorithme proposé est donné dans la figure (III.18) où la suppression de tous les calculs de division dans l'algorithme est compensée par l'application d'opérations mathématiques arithmétiques/logiques. Ainsi, la complexité de la structure de l'algorithme est minimisée, ce qui réduit le traitement en temps réel et permet à l'algorithme d'être mis en œuvre par des microcontrôleurs à faible coût

III.10.1. Applications et simulations de la méthode CI Améliorée

Les résultats de simulation de la méthode de la conductance incrémentale améliorée sont dans les figures suivantes :

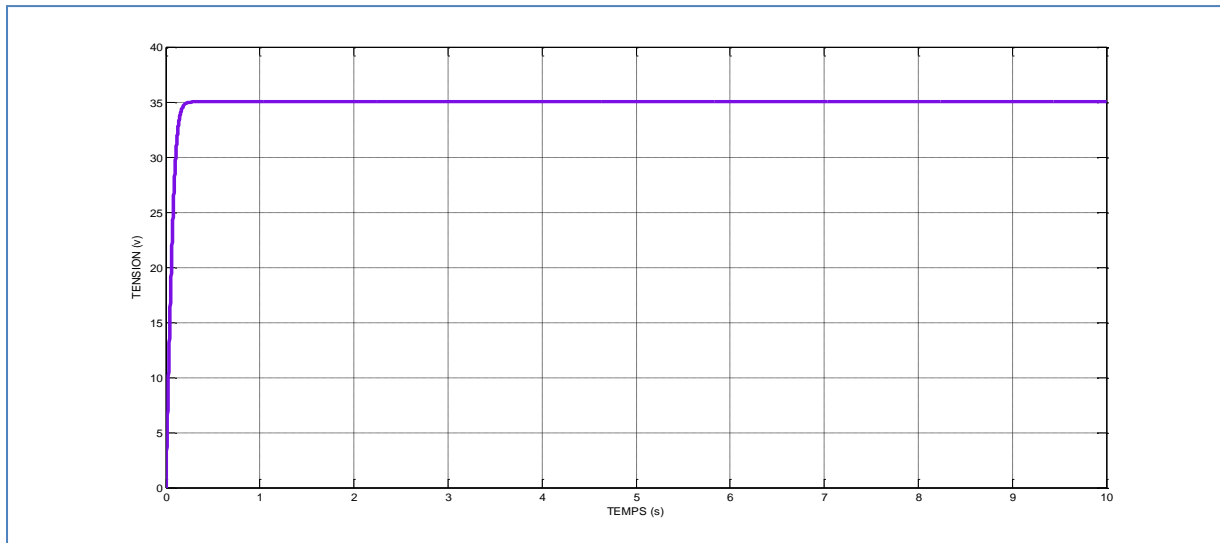


Figure III-19 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque avec l'application de la CIA.

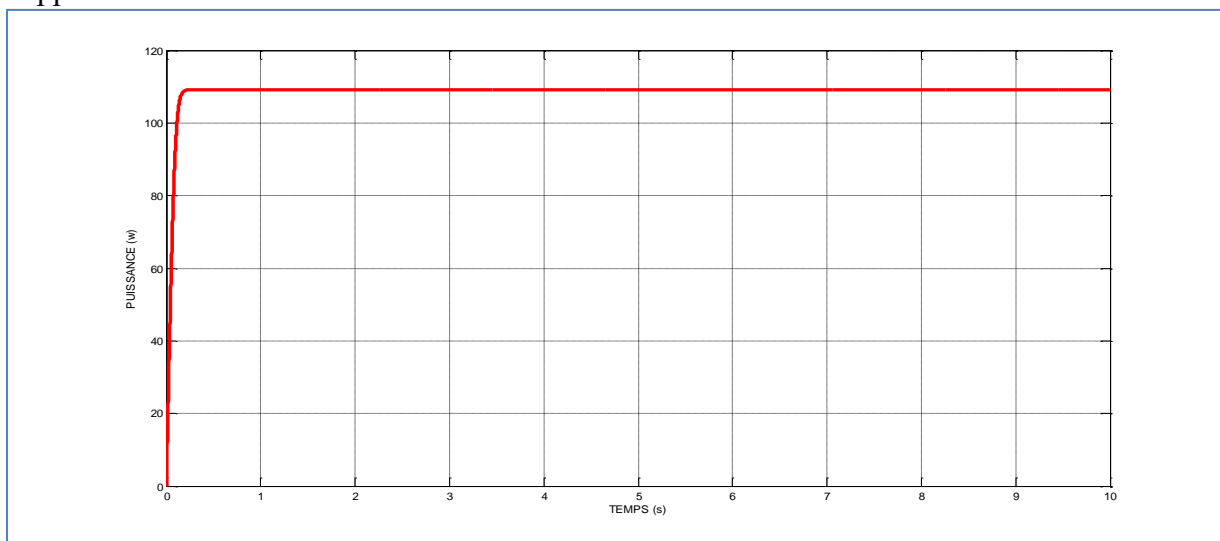


Figure III-20 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque avec la méthode de la CIA.

III.10.2. Interprétation des résultats

Les résultats de la simulation montrent que les performances en régime permanent et transitoire de la technique CI améliorée dépassent celles de la technique conventionnelle, en raison de sa taille de pas variable appliquée basée sur ΔP , mais avec une mise en œuvre plus simple en raison de la division entière éliminant les calculs de sa structure algorithmique. Cela se fait sous des changements des conditions atmosphériques.

III.11. Comparaison entre la CI et la CI améliorée.

Dans cette partie nous allons simuler les deux méthodes au même temps et de les comparer par rapport aux performances et en présentent les résultats de simulation dans la figure suivante.

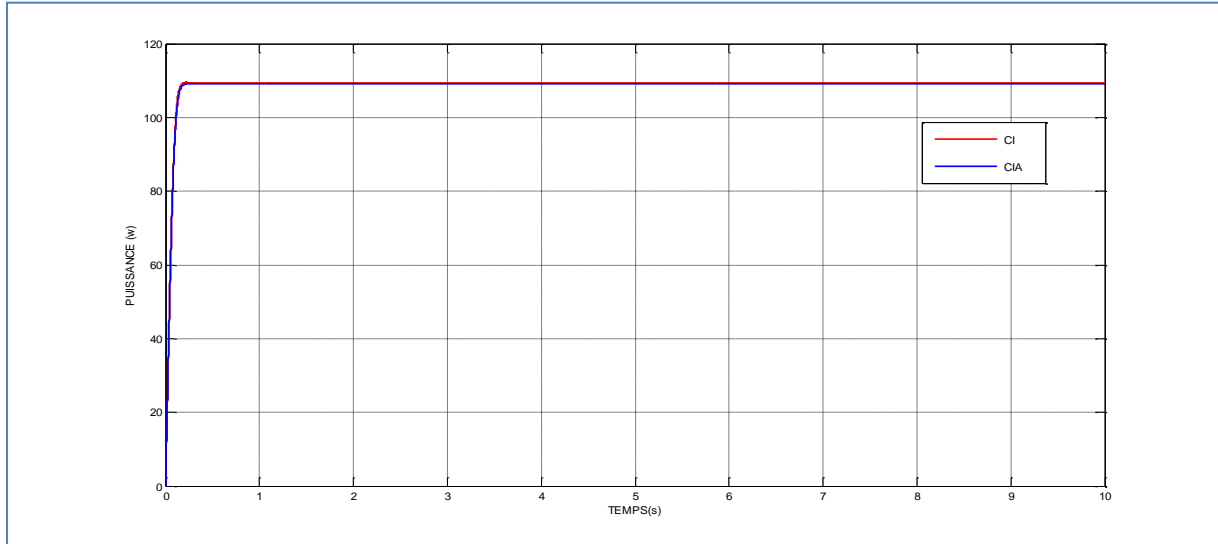


Figure III-21 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque avec la CI et la CIA.

En fait un zoom sur l'allure de puissance pour mieux visualiser l'allure obtenue par les deux méthodes.

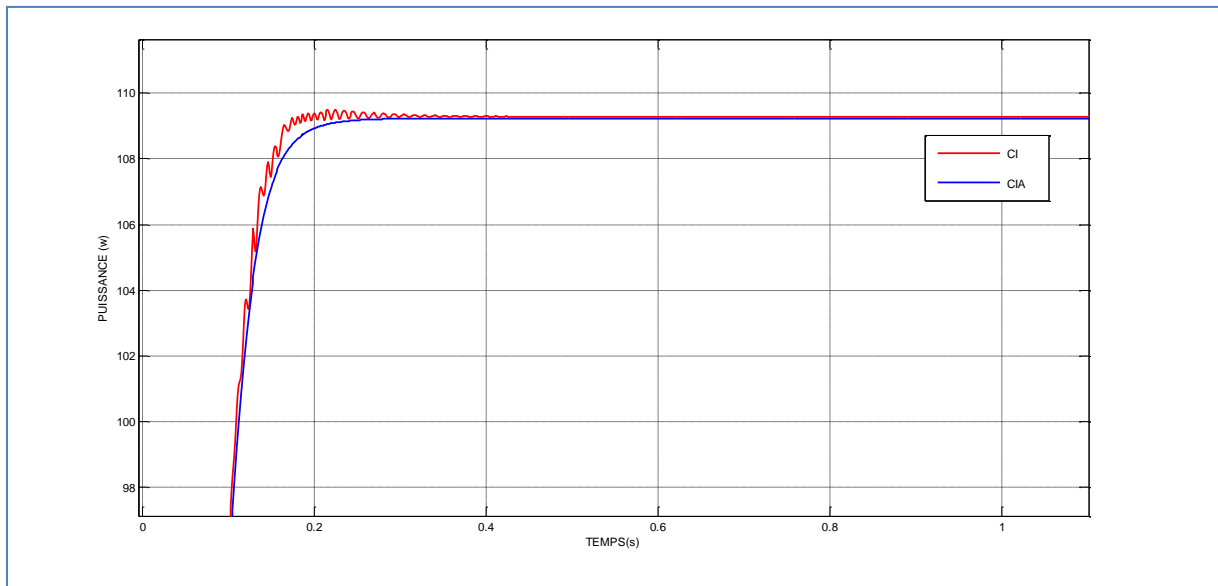


Figure III-22 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la CI et la CIA avec Zoom

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats de la simulation, pour les conditions standards de l'ensoleillement et la température, en constate que les fluctuations de puissance au régime transitoire sont importantes sur l'allure de la CI et un retard pour la stabilisation au régime permanent

Par contre sur l'allure de la CIA en remarque l'absence totale de ces fluctuations de puissance et elle est plus stable et efficace.

III.12. Comparaison entre la P&O Améliorée et la CI Améliorée par un teste de robustesse

Pour un profil d'ensoleillement de la Figure (III-23) et en fait le teste entre les deux nouvelles méthodes qu'en a simulé dans ce chapitre et de comparer les résultats obtenus.

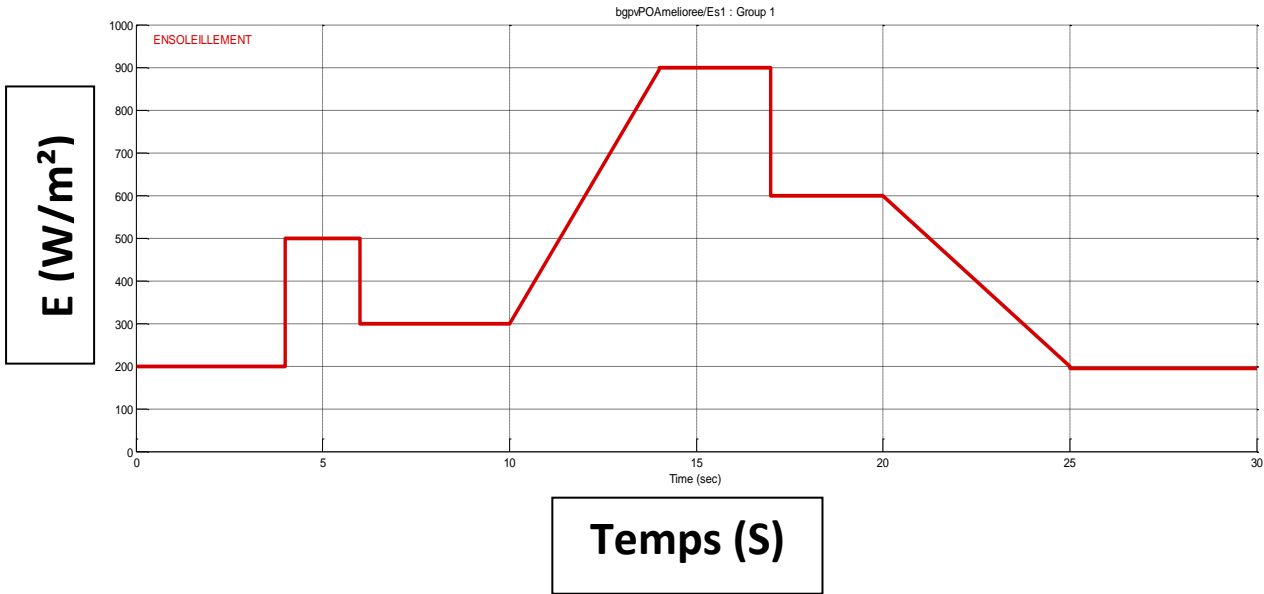


Figure III-23 : profil d'ensoleillement variable (Tc=25°C).

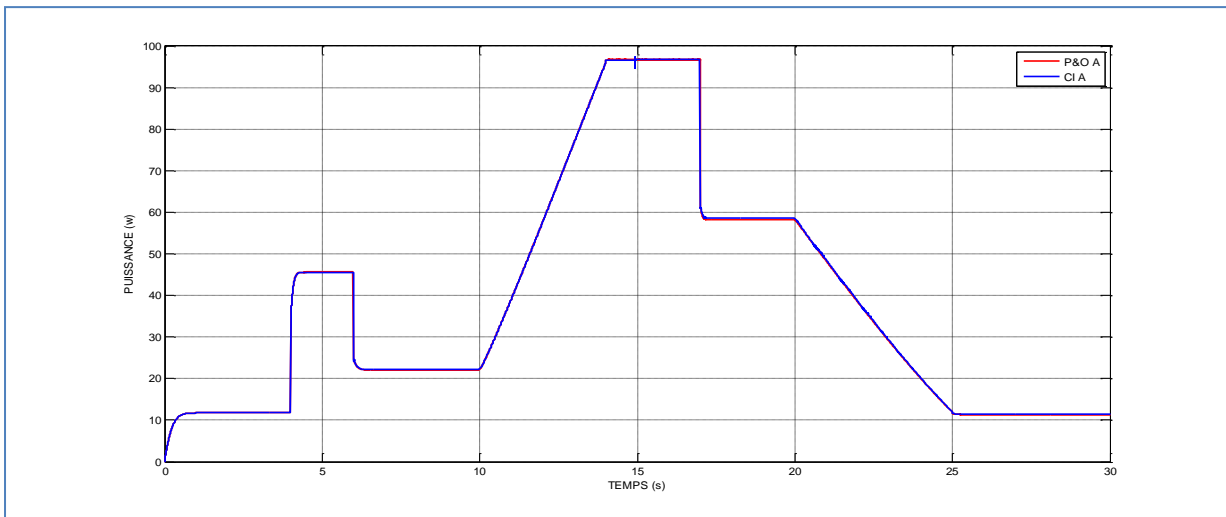


Figure III-24: Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml).

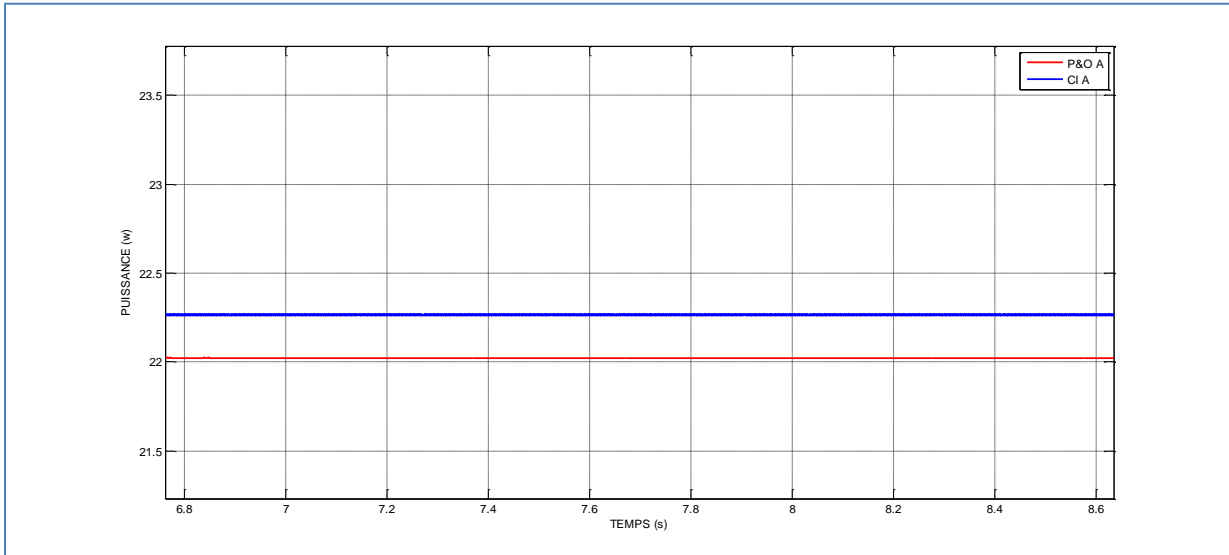


Figure III-25 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml) pour de faible et moyen ensoleillement. Zoom entre [6.8s et 8.6s].

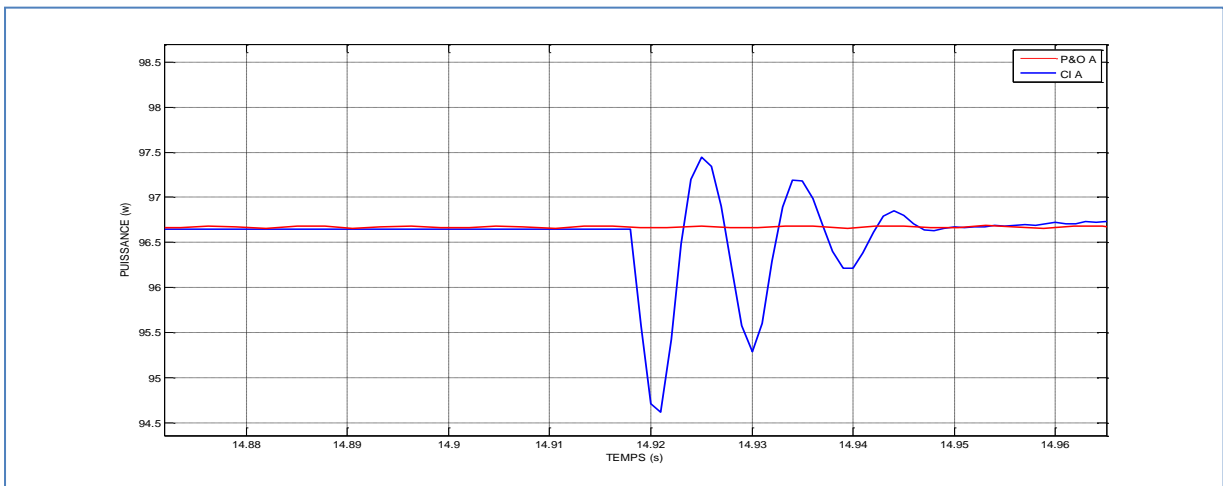


Figure III-26 : Allure de la puissance obtenue par l'application de la (P&O aml) et la (CI aml). pour un fort ensoleillement. Zoom entre [14.88s et 14.96s]

• Interprétation des résultats

- D'après les résultats de la simulation qu'on a obtenus, on remarque que pour de faibles et moyennes valeurs d'ensoleillement, la méthode de la conductance incrémentale améliorée est meilleure, elle est plus précise et elle donne de bons résultats au point de fonctionnement maximal par rapport à la méthode de perturbation et observation améliorée.
- Par contre pour de très fort ensoleillement, la méthode de perturbation et observation est meilleur vis-à-vis la stabilité et la précision, en contre partie la (CIA) représente des fluctuations (oscillations) au tour du point de puissance maximale (PPM).

Alors pour de faibles est moyens profile d'ensoleillement en peut adopter la méthode de conductance incrémentale, Par contre lorsque l'éclairement est fort on bascule sur la méthode de perturbation et observation améliorée.

III.13. Conclusion

Dans ce chapitre, on est arrivé à appliqué les différentes méthodes de MPPT tel que la méthode de Perturbation et Observation (P&O), perturbation et observation améliorée (P&OA), conductance incrémentale (CI) et la conductance incrémentale améliorée (CIA) afin d'accélérer la procédure de recherche du point de puissance maximale au régime permanent et d'voire une bonne qualité de signale de puissance sous des variations des conditions environnementale.

La méthode combinée (P&OA et CIA) prouve qu'elle a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur au régime permanent très faible, et qu'elle est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était d'étudier et de simuler une commande MPPT d'un système photovoltaïque qui est composé d'un générateur photovoltaïque associé à une charge capacitive, un étage d'adaptation convertisseur DC /DC, et un étage de commande pour piloter le convertisseur (la commande MPPT classique en l'occurrence P&O et CI et en suite les améliorées). Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie photovoltaïque et nous avons présenté d'une façon générale le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est réalisée à travers de matériaux semi-conducteurs.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur PV, nous avons vu le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'ensoleillement et la température).

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge associé à une commande MPPT. Alors nous avons utilisé des algorithmes MPPT qui sont l'algorithme « perturbation et observation » (P&O) puis on l'a amélioré et on la nommée (P&OA) , et l'algorithme « Incrémental Conductance » (CI) qu'on a aussi amélioré et la nommée (CIA) commandée par un convertisseur élévateur (hacheur boost). Après avoir modélisé et simulé ces techniques, nous avons donné les résultats de simulation dans de différentes figures.

La commande MPPT soit la P&O améliorée ou la CI améliorée (CIA) permettent une meilleure adaptation entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge. Cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT basée sur la CIA conduit à de meilleures performances pour de faibles et moyens ensoleillement et la P&OA conduit à de meilleures performances pour un fort éclaircissement.

Par ce travail, nous souhaitons avoir apporté une contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques et leurs commandes notamment MPPT classique et améliorée.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant de combiner entre la CI améliorée et la P&O améliorée pour avoir de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur au régime permanent très faible. Procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : https://www.cstc.be/?dtype=patents&doc=Les_systemes_photovoltaiques_en_toiture_Etat_de_l_art_Octobre_2008.pdf
- [2] : F. Benadel, « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV », Mémoire de master, Département de Génie électrique, université mohamed boudiaf - m'sila, 2016.
- [3] : B. Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister 2008, Universitaire De Bechar.
- [4] : H. Hassini née Belghitri, « MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE » mémoire de magister 2010 UNIV de Tlemcen.
- [5] : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/8623/3/1chapitre%20I.pdf>
- [6] : M. Zidane – A. Cheurfa, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque » Mémoire de master 2020, université de bejaia.
- [7] : P. Claux, « Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
- [8] : Dj. Bellala, « Contribution a l'Optimisation des Systèmes de conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques Thèse Doctorat en sciences, Université de Batna.
- [9] : F. meziani, « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG » Mémoire de Magister université mouloud mammeri de tizi ousou
- [10] : A. Djabouabdellah, « étude et mesure des données solaire d'un gisement solaire dans une zone isole » université d'adrar ahmed draya 2015.
- [11] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
- [12] : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [13] : K. rahrah, « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », thèse doctorat, université de Bejaia 2016.
- [14] : J. F. Reynaud, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [15] : F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004

[16] : <http://www.electrosun.fr/energy-news-actualites-photovoltaique-energie-renouvelable/>

[17] : N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek, « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Division Energie Solaire Photovoltaïque Centre de Développement des Energies Renouvelables, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498

[18] : A. singo «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome» thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.

[19] : D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.

[20] : M. Zidane, A.cheurfa, <<Etude et optimisation d'un système photovoltaïque>> Mémoire de Master de l'université de bejaia.

[21] N.Koide, A Islam, Y.Chiba, L. Han , « Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit », Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, Issue 3, 10, pp. 296-30, September 2006.

[22] : Ch.serir, <<Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage>>, thèse Doctorat, université de bejaia 2017.

[22] : site web, titre d'accueille : l'énergie solaire photovoltaïque, web :

<https://fr-static.z-dn.net/files/d9e/1059a79cf5cb4e0ca98788107f427c43.pdf>

[23] : W. R.Anis, H. Metwally « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994.

[24] : D. Rekioua, O.Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.

[25] :K. rahrah, <<Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable>> thèse Doctorat, université de bejaia 2016.

- [26] : T. boukadoum, A. hamidar et N. ourabia «Le Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
- [27] : site web, titre d'accueil : Convertisseur Buck (hacheur série)
www.electrosup.com/convertisseur_buck.php
- [28] : M. boulkouane - N.djabellah, << Influence des générateurs photovoltaïque sur la stabilité des réseaux électriques>>, Mémoire de fin d'étude, Université A. MIRA, Bejaia ,2016.
- [29] : D. Rekioua, E. Matagne « Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control », Edition Springer, 2012.
- [30] : S.Bensmail, « Optimisation Et Gestion D'un Système Hybride A Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2017.
- [31] : C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat en Génie Electrique de l'université de Toulouse 2008, France.
- [32] : C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat en Génie Electrique de l'université de Toulouse 2008, France.
- [33] : Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, « Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking», IEEE Trans. Industrial Electronics, vol: 45, N°: 1, pp: 99–107, 19
- [34] : K. Zaiem, « Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit» MÉMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master de l'université de badji mokhtar-annaba.
- [35] : N. Zakzouk, MAElsaharty, A. Abdelsalam, AA Helal «Improved Performance Low-Cost Incremental Conductance PV MPPT Technique. AAST Electrical and Control Engineering Département
- [36] : Shang, L., Guo, H. & Zhu, W. Une stratégie de contrôle MPPT améliorée basée sur un algorithme de conductance incrémentale. Prot Control Mod Power Syst **5**, 14 (2020).