الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTÈREDEL'ENSEIGNEMENTSUPÉRIEUR ETDELARECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ . YAHIAFARÈSDEMÉDÉA

FACULTÉDETECHNOLOGIE

DépartementduGénieÉlectrique

Projet de Find'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en énergie Renouvelable

Option: énergie renouvelable en éléctrochnique

THÈME

Optimisation de la consommation de l'énergie électrique photovoltaïque d'un hacheur MPPT commandé par la théchnique neuro-flou

Proposé et dirigé par:

DR .BENTOUATI Smain

Préparer et présenté par:

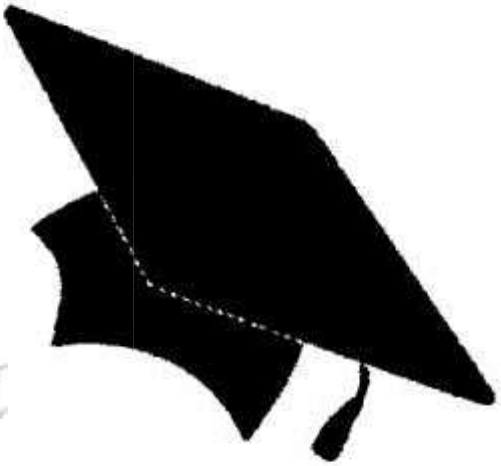
Mr. BENZIREG Abdelkader Boualem

Melle. SAID OTMANI Hadjer

بسم الله الرحمن الرحيم



Remerciement



Au terme de ce travail :

***N**ous tenons à remercier tout d'abord **Dieu** le tout puissant et maîtredel'univers quinous a donnéla forcenécessaire, la fort volonté et la patienceafin d'accomplir cetravail.*

***N**ous tenons à exprimernotregratitudeà nos enseignants de Département Génie Electrique et d'Informatique del'université DR. Yahia Fares DeMédéa.*

***N**ous remercions également par la mêmeoccasion, notre Promoteur Monsieur Ben Touati*

Pour l'aidequel nous a apporté, pour sa disponibilité, ainsi pour ses précieuxconseils. L'honneur qu'il nous a fait, en présidant lejury de cettethèse.

***N**ous exprimons, également nos remerciements àl'examinateur qui participer à l'examen decetravail.*

Enfin nous adressons nos reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin.

.

Dédicaces

Au nom d'Allah le Miséricordieux le très miséricordieux.

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

A mes très chers parents surtout ma mère qui étaient présents pour

Moi durant toute ma vie.

A mes frères et ma famille.

A mes amis.

A mes chers spéciaux.

A tous ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.

.

Abdelkader

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donner le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail a:

Mes très chers parents qui mon soutenu tout au long du mon parcours et qui ont fait tant de sacrifices pour ma réussite, leurs encouragements m'ont donné la force d'accomplir ce travail, que Dieu les gardes heureux à jamais ;

A mes chères sœurs Nesrin Selsabil et spécialement à ma petit sœur Mimi ;

A mon seul frère Abdellah ;

A les fils de ma sœurs Ibtihal et Haron ;

A les amis surtout Afaf, Soumeya, et mon binôme Abdelkader, et a A toutes la famille, et

tous les autres amis qui sont au cœur et mes collègues;

HADJER

Listes des figures

Chapitre I:

Figure (I.1) Structure du solei ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.2) Les coordonnées célestes horizontales ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.3) Variation annuelle de la déclinaison solaire ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I. 4) Position du soleil..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.5) Types de rayonnement solaire reçus au sol. ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.6) Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné .... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.7)Ensoleillent moyen annuel dans le monde..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.8) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.9) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Maroc ..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II :

Figure (II.1): Représentation schématique d'une cellule solaire ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.2) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire .. Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.3) : Schéma équivalent électrique de la cellule PV..... Erreur ! Signet non défini.

Figure II.4 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.5) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.6) : Module photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.7) : Câblage des cellules dans un module ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.8) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.9) : La caractéristique I=f(v) en fonction de l'éclairement Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.10) : La caractéristique P=f(v) en fonction de l'éclairement ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.11) : La caractéristique de I=f(V) en fonction de température **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.12) : La caractéristique de P= f(V) en fonction de température **...** Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.13) : Association de N modules solaires en série. **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (II.14) : Association mixte N xN modules solaires. **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (I.15) : Panneau photovoltaïque……**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre III :

Figure(III.1) Principe de base d'un hacheur**.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.2) Hacheur série (abaisseur) **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.3)Hacheur parallèle (élévateur) **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.4) Hacheur abaisseur-élévateur **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.6) : Schéma électrique d'un hacheur boost **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost**....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III. 8) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé**.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure(III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert**.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (III.10) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT. **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (III.11) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale**...** Erreur ! Signet non défini.

Figure (III.13) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT **.....** Erreur ! Signet non défini.

Figure (III.14) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (III.15) : Principe MPPT à courant de référence en fonction de[illegible] ……..……**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre IV :

Figure(IV.1) : Architecture équivalente d'ANFIS pour deux règles .. Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.2) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT par réseau neuro-flou. ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.3) illustration du principe du ANFIS pour la poursuite du point de puissance maximale ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (IV.4) schéma global PV (MPPT) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.5) La puissance P(t) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.6) le courant I(t) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.7) la tension V(t) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.8) Le rapport cyclique alfa ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.9) schéma de simulation global (neuro-floue) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.10) La tention V(t) ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure (IV.12) : puissance PV ..... Erreur ! Signet non défini.

Figure(IV.12) : Le rapport cyclique. ..... Erreur ! Signet non défini.

Liste des symboles

(ψ) : La latitude

(l) : La longitude

(γ): L'altitude

(δ) : La déclinaison

(n) : le numéro de jour dans l'année

(h) : La hauteur angulaire

(ρ_s): L'angle horaire

(β) : Azimut du soleil

(R_s) : Résistance série

(R_{shu}) : Résistance shunt

(I_{ph}) :photo-courant

(I_s): Le courant de saturation,

(K) : La constante de Boltzmann (1,381 10^{-23} J/K),

(*T*) : La température effective en Kelvin(K),

(e) :la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19}C),

(n) : Le facteur d'idéalité de la jonction (1≤ n ≤ 2),

(I_P) Le courant fourni par la cellule,

(V_P): Latension aux bornes PV,

(I_{Ph}) : Le photo-courant de la cellule,

(R_{shu}): La résistance shunt,

(R_s) : La résistance série,

(I_C) : Courant de court-circuit

(V) : Tension

(V_c) : Tension de circuit-ouvert

(I_s) : c d saturation

(FF) : Facteur de forme

(P_m) : La puissance électrique maximale

(Ƞ) : Rendement énergétique

(I_0): Le courant de saturation inverse de la diode.

(V_d) : La tension à la borne de diode

(V_t): Potentielle thermique

(I): Le courant fourni par la cellule

(I_0) : Le courant de saturation de la diode.

(q) : Charge d'électron =1,602.10^{-1} C.

(Po) : la puissance optimale

(G) : L'éclairement

(N_s): Nombre modules en série

(N_p): N du modules en parallèle

(D) : La diode

(T_e) : Le temps

(α_0) : Rapport cyclique initial

Liste des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques principales du soleil

Liste des abréviations

(TSV):Le temps solaire vrai

(ASA) : l’Agence Spatiale Allemande

(PV) : photovoltaïque

(DC) : courant continu

(MPPT)Maximum Power Point Tracker

(PPM) : Point de puissance maximale

(GPV) : Générateur photovoltaïque

(CS) : Convertisseur statique

Table des matière :

I.1.Introduction :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.Le soleil :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.Présentation générale : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.L'énergie solaire : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.1.L'énergie solaire thermique: ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.2.L'énergie solaire photovoltaïque : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5. Principes de calcul de l'énergie solaire :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.1. La latitude (ψ) : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.2.La longitude (l) :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.3.L'altitude (γ): ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.4. La déclinaison (δ) :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.5. Le temps solaire vrai (TSV):..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.6. La durée et le taux d'insolation :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.7. L'angle horaire :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.8. Position du soleil :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.Rayonnement solaire..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.1.Spectre solaire ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7. Le gisement solaire dans le monde :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7.1 Le gisement solaire en Algérie..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7.2 Le gisement solaire en Maroc :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.8.CONCLUSION :……
……. **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE II

II.1.Introduction : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2. L'effet photovoltaïque :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.La cellule photovoltaïque ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.1.Principe de fonctionnement ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.5.Paramètres photovoltaïque d'une cellule:..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.5.1. Courant de court-circuit (I_{cc}) :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.5.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}) : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.5.3.Rendement énergétique..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.5.4. Facteur de forme ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.6.1. Cellule photovoltaïque idéal ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II .6.2.Cellule photovoltaïque réel : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.Module photovoltaïque :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.Les principales caractéristiques d'un module : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.1.Puissance crête : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.2.Rendement:..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.3. Facteur de forme :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.4.Caractéristique courant-tension d'un module : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.5. Influence de l'Éclairement ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.6. Influence de la Température :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.7.1.7. Influence de l'association série des cellules PV..... **Erreur ! Signet non défini.**

II .7.1.8. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8. Panneau photovoltaïque :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8.1. Avantages et inconvénients d'une installation PV..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8.1.1. Avantages :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8.1.2. Inconvénients : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.9. Conclusion: ..... **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE III

III.1.Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.2.Présentation des convertisseurs continus-continus (DC/DC).. **Erreur ! Signet non défini.**

III.3.Différents types des hacheurs ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3.1. Hacheur série ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3.2. Hacheur parallèle ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3.3. Hacheur abaisseur-élévateur ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3.4. Hacheur monophasé en pont ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.4. Hacheur boost ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.1.Fonctionnement ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.2. Modèle mathématique équivalent ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5. La commande MPPT ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5. 1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .. **Erreur ! Signet non défini.**

III.5. 2. Principe du MPPT ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5. 3. Classification des techniques MPPT : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5. 4. Les premiers types de technique MPPT ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5.5.Evolution du point d'opération du générateur PV :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5.6. Les méthodes de poursuite de MPP :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5.7. Méthodes à contre réaction de tension ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5.8. Méthodes à contre réaction de puissance ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.5.9.Algorithme perturbation et observation..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.9.Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITER IV

IV.1.Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.Système d'inférence flou base sur les réseaux de neurones adaptatifs ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.1Structure d'ANFIS ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3. CONCEPTION D'UN CONTROLEUR MPPT A BASE DE RESEAU NEURO-FLOU .....**Erreur ! Signet non défini.**

IV.4. Description de système .....**Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.Simulation global PV :.....**Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.1.Schéma de simulation (MPPT) : .....**Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.2. Simulation de système avec le réseau de (neuro-floue) ..**Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.2.1. résultat Simulation :.....**Erreur ! Signet non défini.**

IV.6.CONCLUTION…

…..…….**Erreur ! Signet non défini.**

الملخص

في هذه المذكرة قمنا بمعالجة محاكاة لوحة**بواسطة تقنية** عصبية غامضة هدفنا الرئيسي هو تقليل الخطأ والحصول على الحد الاقصى من الطاقة لذلك تم تطوير نموذج محاكاة لتمثيل الرسم التخطيطي للوحة باستخدام **أداة مطلبلضمان لاستمرار الحد** الأقصى من الطاقة التي توفرها لوحة الطاقة الضوئية.

الكلماتالمفتاحية: الطاقة الضوئية - عصبية غامضة

Résumé

Dans cette mémoire nous avons traité la simulation d'un panneau avec MPPT par la technique de neuro flou. Notre objectif essentiel et avoir le point de puissance maximale, pour cela un modèle Simulink a été développé pour représenter le schéma block d'un panneau utilisant l'outil de MATLAB/Simulink assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le panneauPV.

Mots clés :énergie PV- neuro-flou MPPT

Abstract

In this work we treated the simulation of a panel with MPPT by the fuzzy neuro technique. Our main goal and have the maximum power point, for this a Simulink model has been developed to represent the block diagram of a panel using the MATLAB tool.

Key words: Optical Power – Mysterious neurosis

L'utilisation des énergies renouvelables pour la production de l'énergie est une option énergétique prometteuse qui répond à la demande croissante en énergie dans le monde, avec des avantages comme l'absence de la pollution et la disponibilité partout au globe terrestre.

Ce travail consiste à l'étude de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique photovoltaïque d'un hacheur MPPT commandé par neuro-flou, Le système complet a été implémenté dans le simulateur Matlab. Nous avons utilisé les modèles comportementaux de la bibliothèque SimpowerSystems.

Le système conçu consiste à tirer le maximum de puissance des panneaux solaires en utilisant la technique de MPPT pour la commande du hacheur boost. Consiste également à imposer la commande neuro-flou pour voire les effets de cette commande. Les effets des différents paramètres du système sur la qualité des grandeurs électriques ont été étudiés. Des analyses spectrales des signaux de sortie permettent de choisir les valeurs optimales de ces paramètres.

Les résultats apportés par le mémoire démontrent le fonctionnement du système photovoltaïque à son point de puissance maximale (PPM). Ces résultats démontrent également l'amélioration de la qualité du courant de sortie en fonction des différents paramètres du tout le système.

A cet effet, nous avons fait dans notre étude :

- Au premier chapitre, on fait une description générale sur le gisement solaire
- Le second chapitre, présente la modélisation de chaque élément du Système photovoltaïque
- Le troisième chapitre consiste à donner une explication sur les convertisseurs continue/continue
- Le quatrième chapitre est consacré au simulation du système PV qui constitué a un panneau PV et un hacheur boost MPPT commandé par neuro-flou

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notreétude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

I.1.Introduction :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [1]

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme

I.2.Le soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1], [2].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

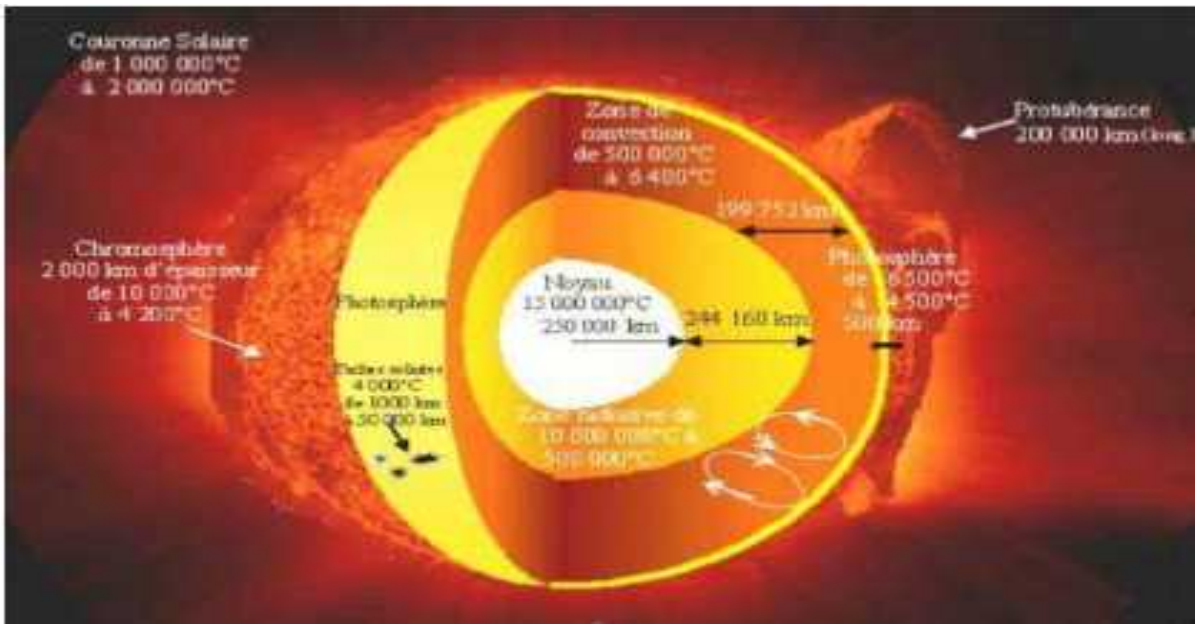


Figure (I.1) : Structure du soleil [1]

I.3.Présentation générale :

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [1], [2].

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil [1], [3].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 suivant:

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km2)	$6.09.10^{12}$
Volume (km3)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m3)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5.1017

Tableau (I.1) Caractéristiques principales du soleil

I.4.L'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 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré 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:

I.4.1.L'énergie solaire thermique:

Qui 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.

I.4.2.L'énergie solaire photovoltaïque :

Qui 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 ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

I.5. Principes de calcul de l'énergie solaire :

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

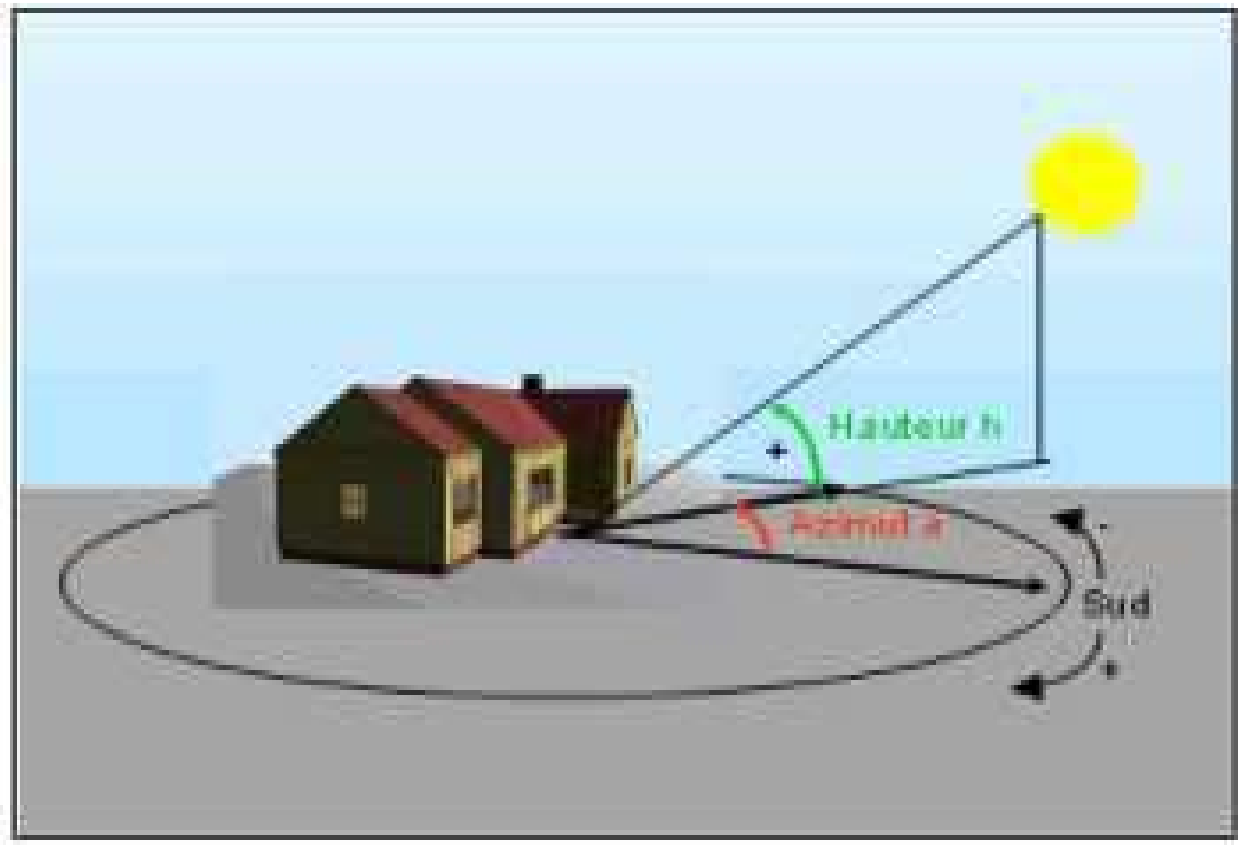


Figure (I.2) Les coordonnées célestes horizontales

I.5.1. La latitude (ψ) :

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considère, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [5].

I.5.2.La longitude (l) :

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude . Les longitudes situées à l'set de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [5].

I.5.3.L'altitude (γ):

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

I.5.4. La déclinaison (δ) :

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre (le 21 décembre) et (le 21 juin) (fig.I.2). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur [5], [6].

$$\delta = 23.45 * \sin\left(2\pi \frac{2}{3} + n\right) \qquad \text{(I .1)}$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année.

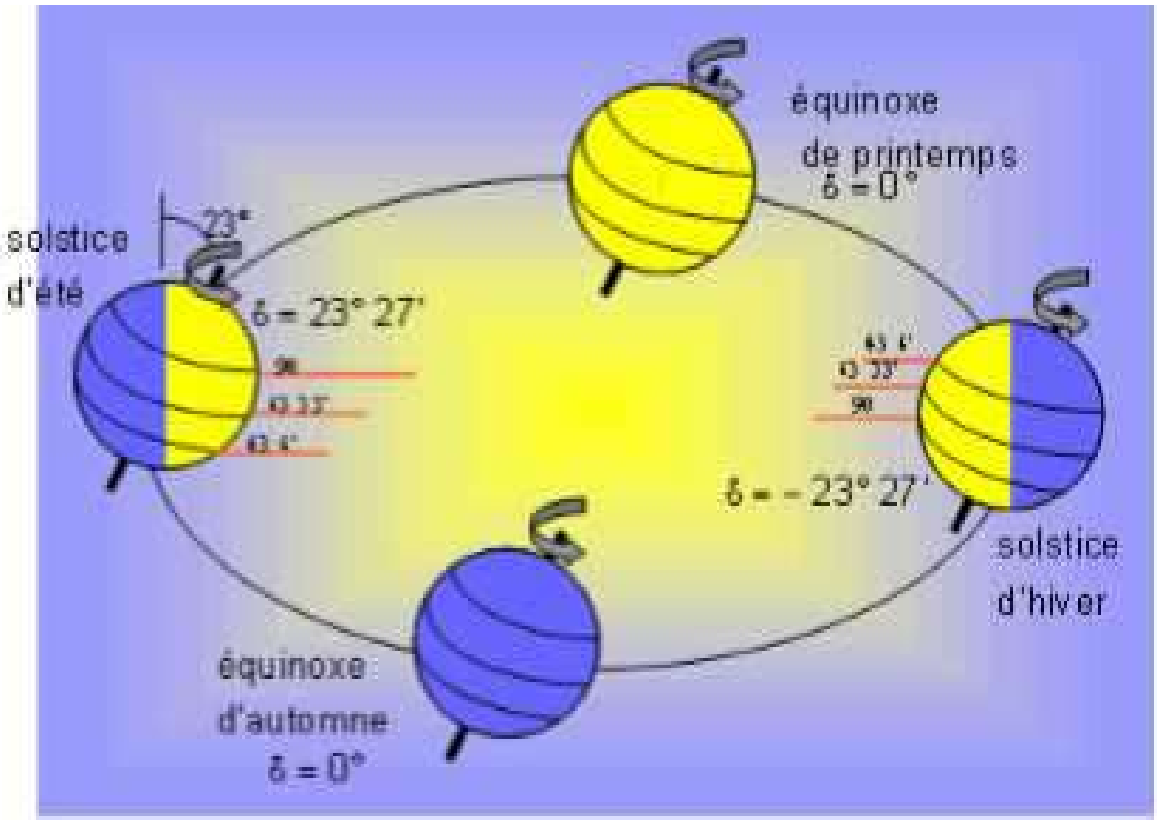


Figure (I.3) Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.5.5. Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [7].

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini [7].

TSV=12+$\frac{p}{1}$(I.2)

I.5.6. La durée et le taux d'insolation :

Par ciel claire et pendant la durée de jour d'ensoleillement (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [6].

Le taux d'insolatio1n est donné par l'expression :

δ=$\frac{S}{S_0}$(I .3)

Calculer par l'expression suivante [7]

$S_0=\left(\frac{2}{1}\right)\cos^{-1}(-\tan\psi * \tan\delta)$(I.4)

Avec :

δ : La déclinaison

Ψ : La latitude du lieu

I.5.7. L'angle horaire :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil auteur de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de par heure (donc un tour de en heures) [6].

I.5.8. Position du soleil :

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur angulaire (h) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [5], [6].

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il fout donc écrêter cette variable.

$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\rho) + \cos(\psi)\cos(\rho)\cos(\delta)$(I.5)

L'angle horaire ρ_s au lever de soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$

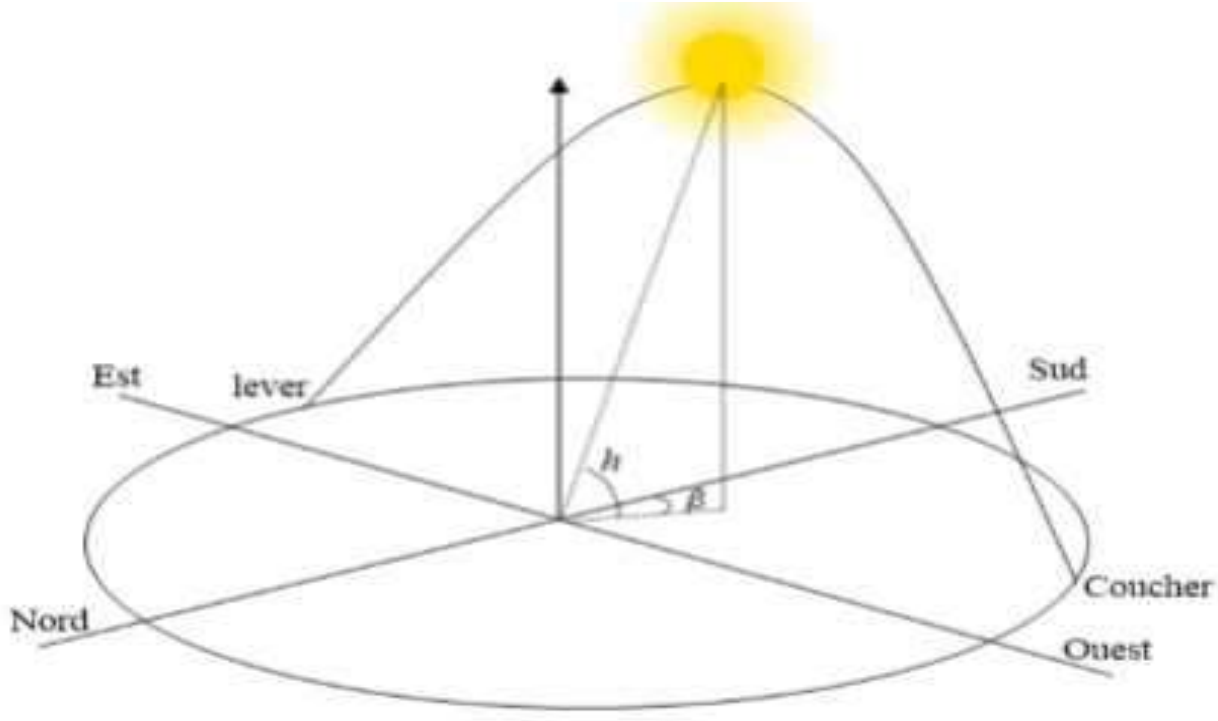
$\cos(\rho_s) = -\tan(\psi)\tan(\delta)$(I.6)

Où (δ) la déclinaison calculée d'après l'équation (I.1) et (ψ) la latitude du lieu.

- Azimut du soleil (β) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [5], [6].

$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta)\sin(\rho)}{\cos(h)}$(I.7)

Ces deux angles sont représentés sur la figure (I.4)



Figure(I. 4) Position du soleil

Pour le site d'Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes : [6]

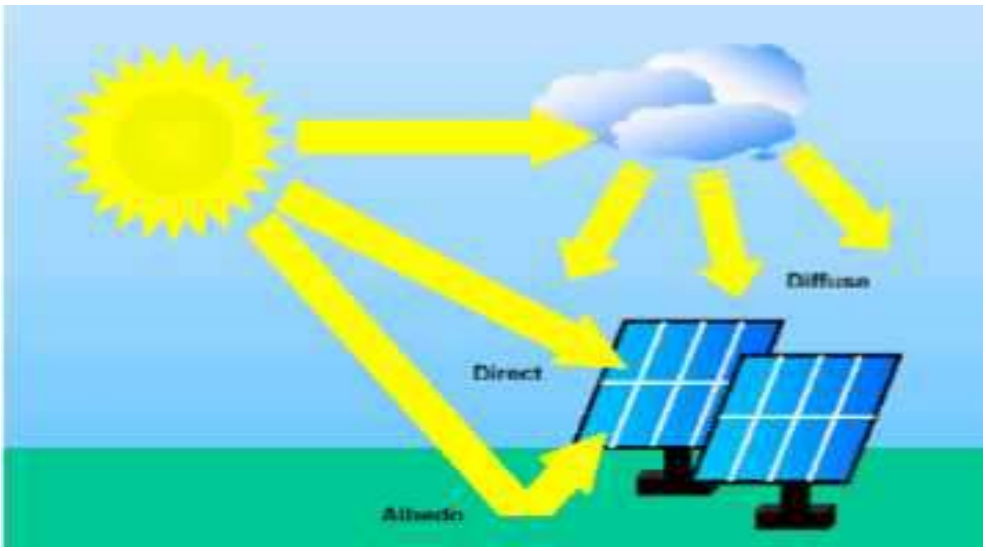
- La latitude : 31N
- La longitude : 5°24´E
- L'altitude : 141m
- Albédo : 0.35

I.6.Rayonnement solaire :

I.6.1.Spectre solaire :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Le rayonnement direct** :La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.
- **Le rayonnement diffus** : c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- **Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol** : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.…).
- **Le rayonnement global :** le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol) [7]. Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.



:(5.I) figure Types de rayonnement solaire reçus au sol.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [8].

Dans la figure (1.6) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

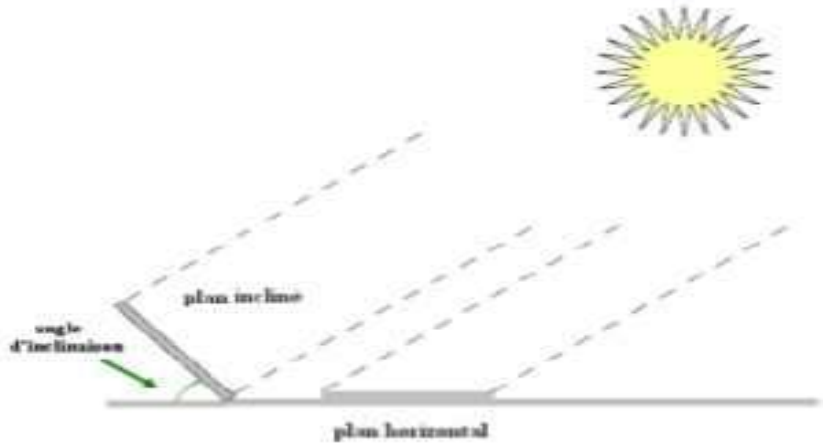


Figure)I.6) Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné

I.7. Le gisement solaire dans le monde :

La situation géographique de notre planète nous montre un gisement solaire très élevé ce qui nous pousse à faire penser à l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable et facile à l'exploiter pour produire de l'électricité.[9]

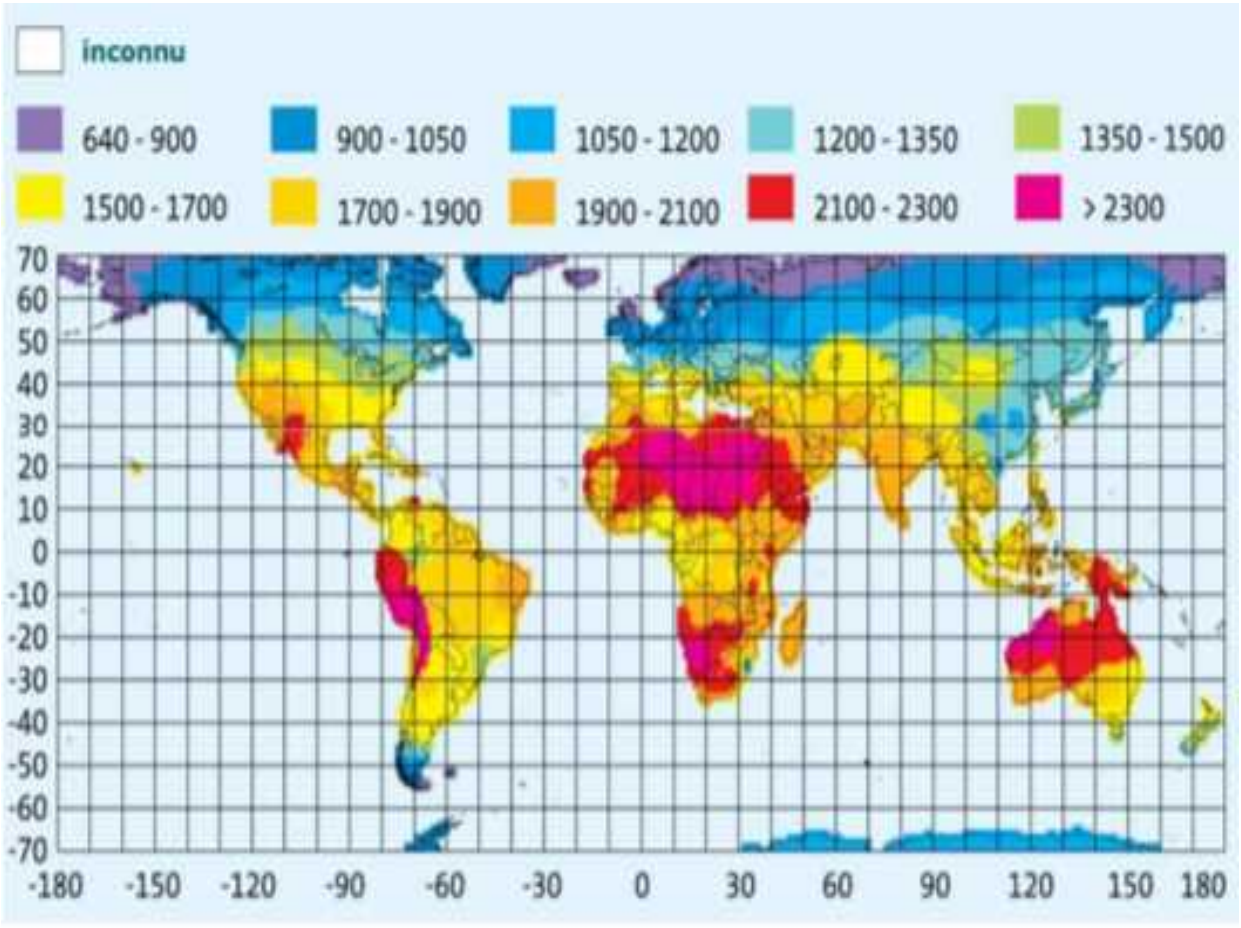


Figure (I.7) :Ensoleillent moyen annuel dans le monde

I.7.1 Le gisement solaire en Algérie :

L'Algérie offre un gisement solaire très élevé, ce qui la classe parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde.

Les taux d'irradiation solaire au niveau du nord de Sahara Algérien, La région d'Adrar particulièrement, est de l'ordre de 1200KWh/m^2/an, Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800KWh/m^2/an limités à la partie sud de l'Europe. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000TWh/an pour le solaire thermique, 13,9TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel[10].

Laduréed'insolationsurlaquasi-totalitéduterritoirenationaldépasseles2000heures annuellement et peut atteindre les 3900heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue

quotidiennement sur une surface horizontale de 1m2 est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m2/an au Nord et 2263KWh/m2/an au Sud du pays [11].

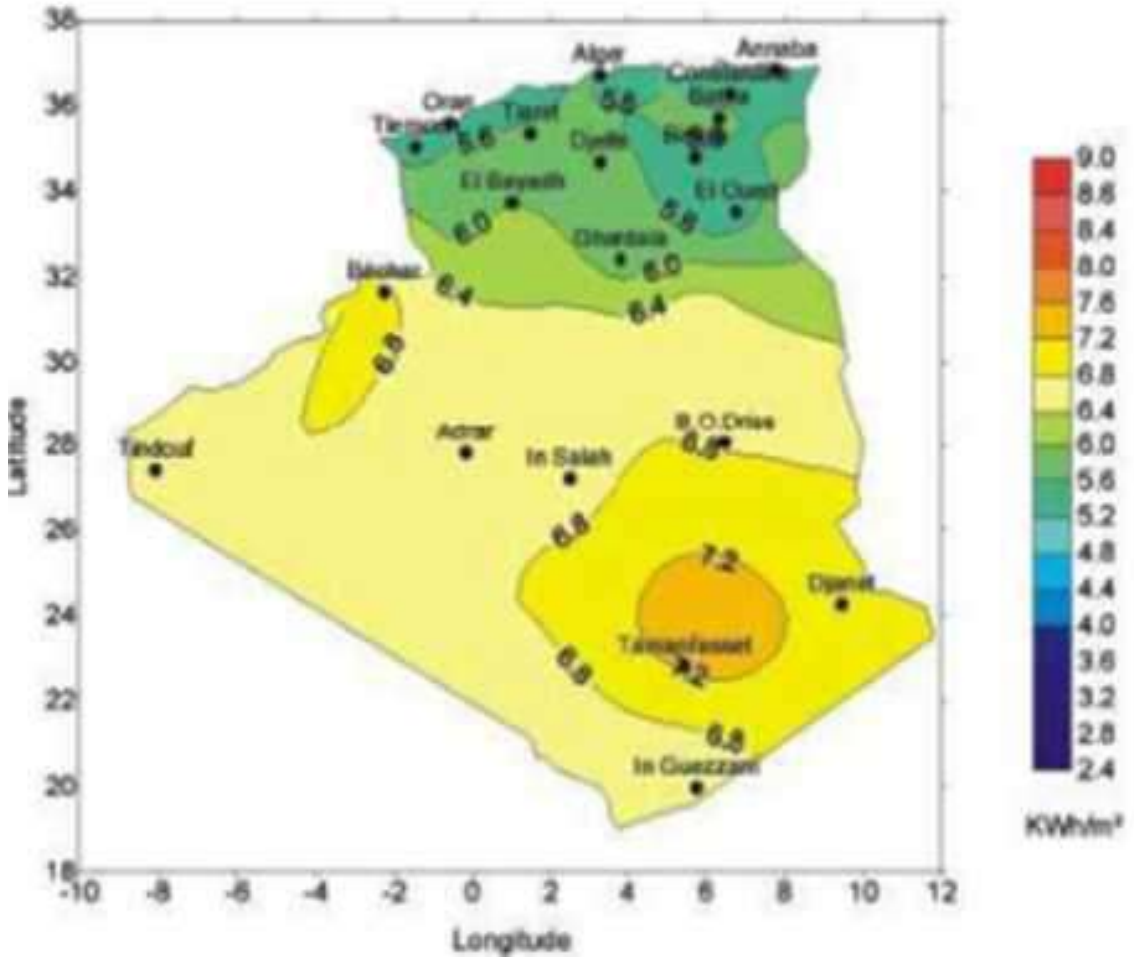


Figure (I.8) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie

I.7.2 Le gisement solaire en Maroc :

De par sa situation géographique, le Maroc dispose d'un gisement solaire considérable d'une capacité de 20000MW, avec plus de 3000h/an d'ensoleillement et d'un potentiel moyen 5,5kWh/m^2/jour.de1700KWh/m2/anauNordet2263KWh/m2/an au Sud du pays [11].

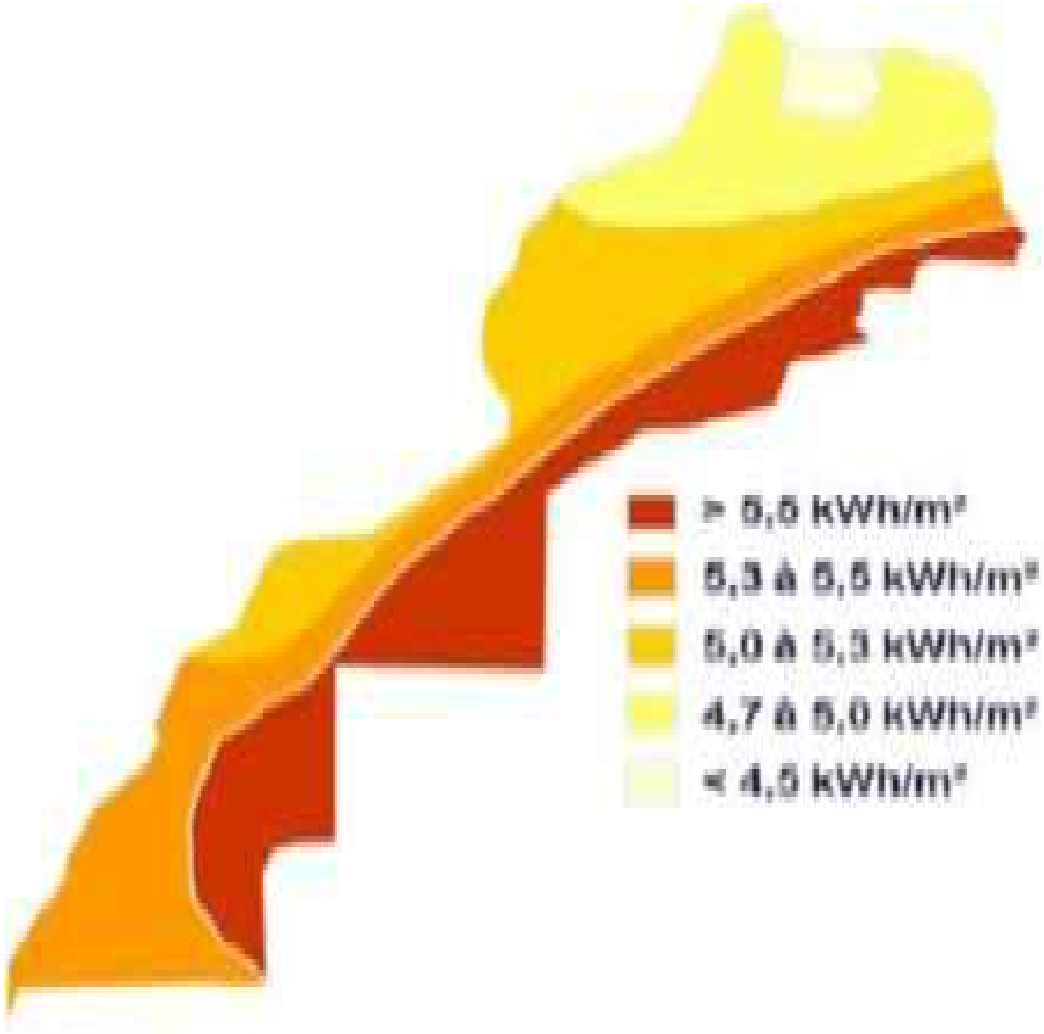


Figure (I.9) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Maroc

I.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'irradiation solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, la composition du rayonnement solaire, et les différents modèles qui permettent d'estimer les composantes, et enfin les gisements solaire dans le monde et Alger et Maroc.

II.1.Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques constituées de semi-conducteur en silicium.

On commencera par brève rappelle sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Nous présenterons ensuite la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque puis décrirons les modèles mathématiques et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement. A la fin on termine parconclusion.

II.2. L’effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Allessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l’unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L’effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l’énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire. L’effet photovoltaïque, c’est-à-dire la production d’électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n’est qu’au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l’élément primaire d’un système photovoltaïque [12].

II.3.La cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d’une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l’énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d’une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d’énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d’une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d’une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d’un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

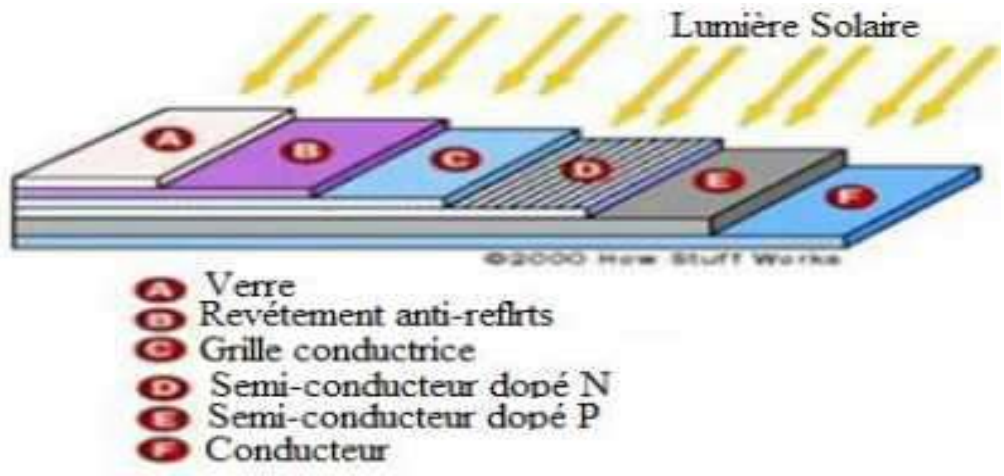


Figure (II.1): Représentation schématique d'une cellule solaire

II.3.1.Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des pairs électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [12].

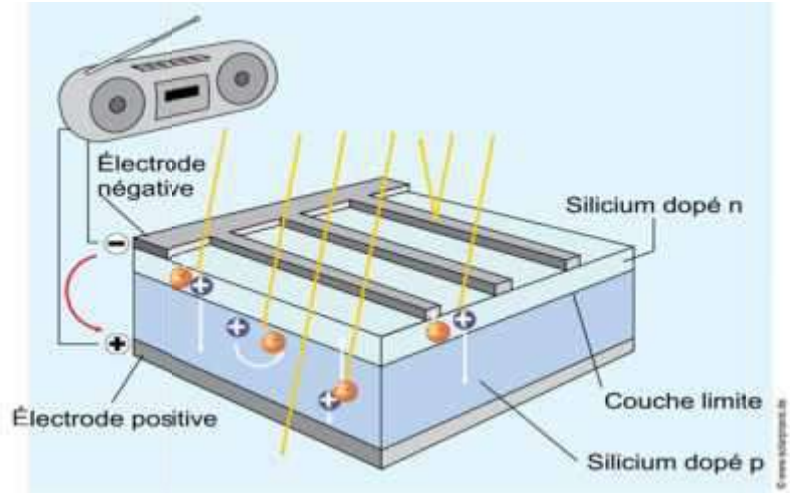


Figure (II.2) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

II.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La figure (II.3) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I =f (V) de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;
- La résistance shunt (R_{shu}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [13]

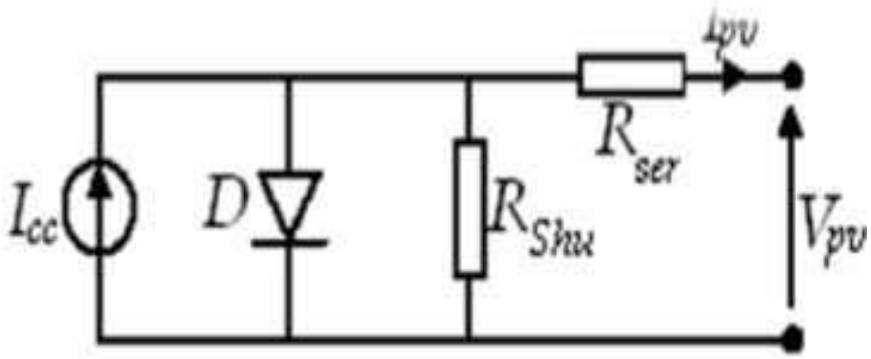


Figure (II.3) : Schéma équivalent électrique de la cellule PV

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est :

$$I_P = I_{ph} - I_S \left[e^{\left(\frac{e(V_p + (I_p * R_S))}{n} \right)} - 1 \right] - \frac{V_p + (I_p * R_S)}{R_{shu}} \qquad \text{(II.1)}$$

Où

- $\mathbf{I_S}$ est le courant de saturation,
- K est la constante de Boltzmann (1,381 10^{-23} J/K),
- ***T*** est la température effective des cellules en Kelvin(K),
- (e) est la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19} C),
- **n** est le facteur d'idéalité de la jonction (1≤ n≤ 3),
- $\boldsymbol{I_P}$ est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,
- $\boldsymbol{V_P}$ est la tension aux bornes de cette même cellule,
- $\boldsymbol{I_P}$ est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court- circuit),
- $\boldsymbol{R_S}$ est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,
- $\boldsymbol{R_S}$ est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions. [3]

II.5.Paramètres photovoltaïque d'une Cellule:

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes:

II.5.1. Courant de court-circuit (I_C) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sht}infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.1) on obtient

$$I_C = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{e(I_C + (I_p \cdot R_s))}{n} \right)} - 1 \right] - \frac{(I_C \cdot R_s)}{R_{sht}} \qquad \text{(II.2)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_s \left[e^{\left(\frac{e(I_p \cdot R_s)}{n} \right)} - 1 \right]$ Devant I_{ph}.l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_C \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sht}}\right)}$$

(II .3)

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_C = I_{ph}$)

II.5.2. Tension de circuit-ouvert (V_C) :

C'est la tension V_C pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

$$0 = I_C - I_s \left[e^{\left(\frac{eV_p}{n} \right)} - 1 \right] - \frac{V_p}{R_{sht}} \qquad \text{(II.4)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_C = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \qquad \text{(II.5)}$$

II.5.3.Rendement énergétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_m (I_o , V_o) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{li}} = \frac{I_o \ V_o}{P_{li}} \qquad \text{(II.6)}$$

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

II.5.4. Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_m (I_o , V_o) et le produit du courant de court-circuit Icc par la tension de circuit-ouvert V_c (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasitesR_s etR_{shu} .il est définit par :

$$FF = \frac{P_m}{I_C\ V_c} = \frac{I_o\ \ V_o}{I_c\ V_c} \quad \text{(II.7)}$$

II.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

II.6.1. Cellule photovoltaïque idéal :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en Parallèle avec une diodefigure (II.4) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad \text{(II.8)}$$

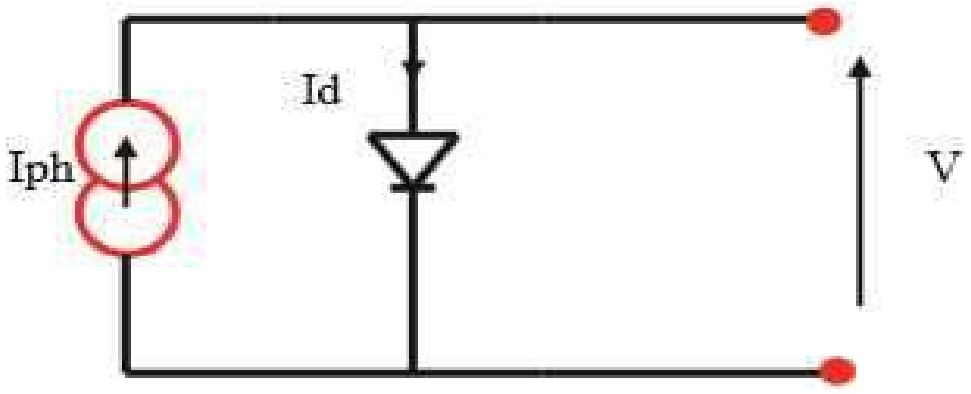


Figure II.4 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal

Pour un générateur PV idéel, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux

bornes de la diode :

$V=V_d$ (II.9)

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d=I_0.\left(e^{\left(\frac{V_d}{V_t}\right)}-1\right) \quad \text{(II.10)}$$

Avec:

I_0: Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension au borne de diode

V_t: =KT/q potentielle thermique

Donc la relation (II.8) sera :

$$I=I_{ph}-I_0\left(e^{\left(\frac{V_d}{V_t}\right)}-1\right) \quad \text{(II.11)}$$

II .6.2.Cellule photovoltaïque réel :

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série $R_s$et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh}[14].

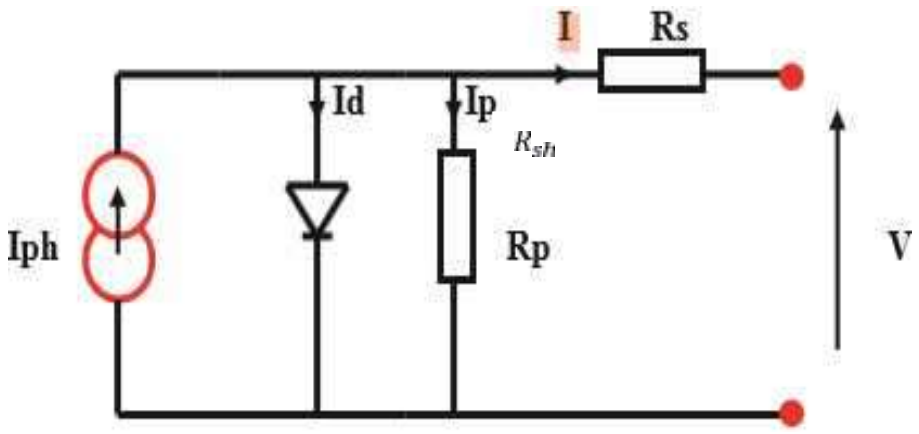


Figure (II.5) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Donc on a :

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

$$I_p = \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \quad \text{(II.13)}$$

$$I_d = I_0 . \left(e^{\left(\frac{V + I.R_s}{V_t}\right)} - 1\right) \quad \text{(II.14)}$$

Donc (II.12) sera:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V + I.R_s}{V_t}\right)} - 1\right) - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \quad \text{(II.15)}$$

Avec:

I: Le courant fourni par la cellule

$I_{ph} = I_S . \left(\frac{G}{1}\right)$ Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

k: Constante de Boltzmann (1,381.10^{-2} joule/Kelvin).

q: Charge d'électron =1,602.10^{-1} C.

n: Le facteur de qualité de diode.

T: La température de cellule en kelvin.

II.7.Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles.

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité.

Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [15].



Figure (II.6) : Module photovoltaïque

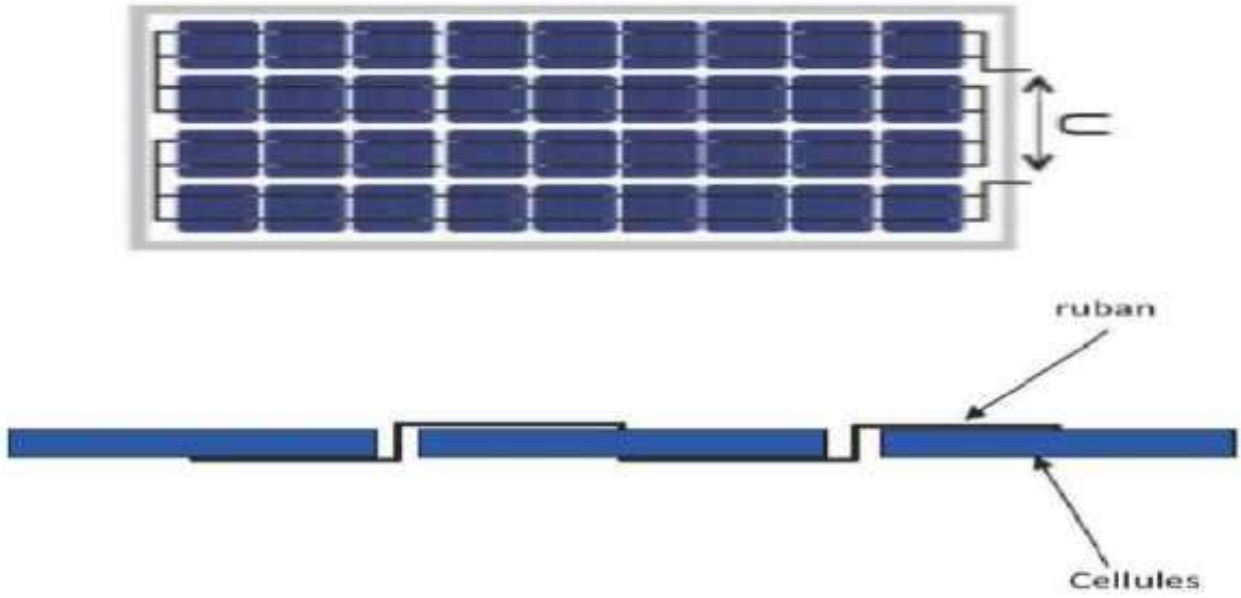


Figure (II.7) : Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [16].

II.7.1.Les principales caractéristiques d'un module :

II.7.1.1.Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m² et pour une température de jonction de la cellule de 25°C. En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peutfournir.

II.7.1.2.Rendement:

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules,Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

II.7.1.3. Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale Po et la puissance maximale Pm que peut avoir la cellule : V_{co},I_{cc}.

II.7.1.4.Caractéristique courant-tension d'un module :

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépendde l'éclairement solaire et de la température des cellules [16].

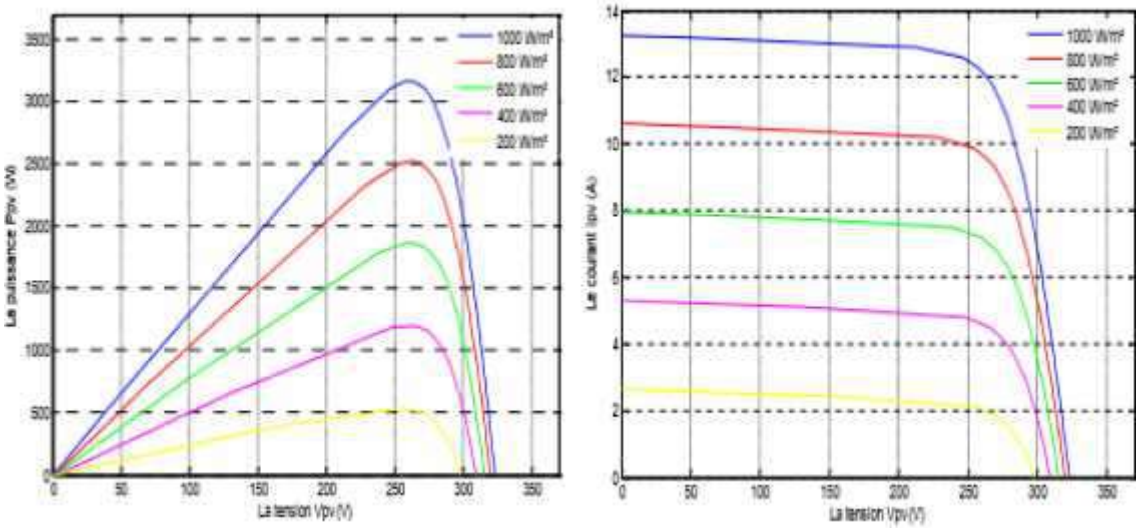


Figure (II.8) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

II.7.1.5. Influence de l'Éclairement :

Les figures (II.9) et (II.10) présentons un exemple des courbes pour différents niveaux derayonnement:

Nous avons fixé la température pour différents éclairements.

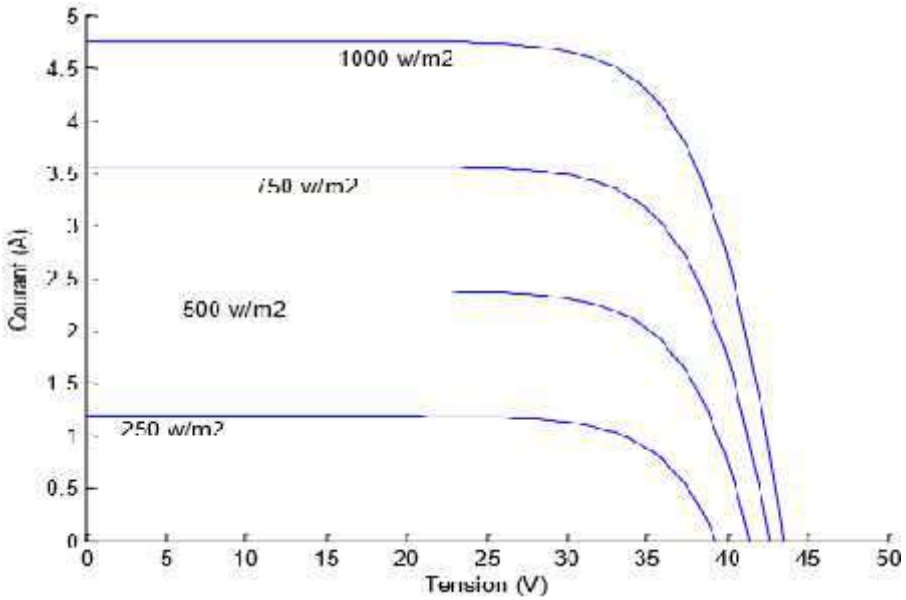


Figure (II.9) : La caractéristique I=f(v) en fonction de l'éclairement

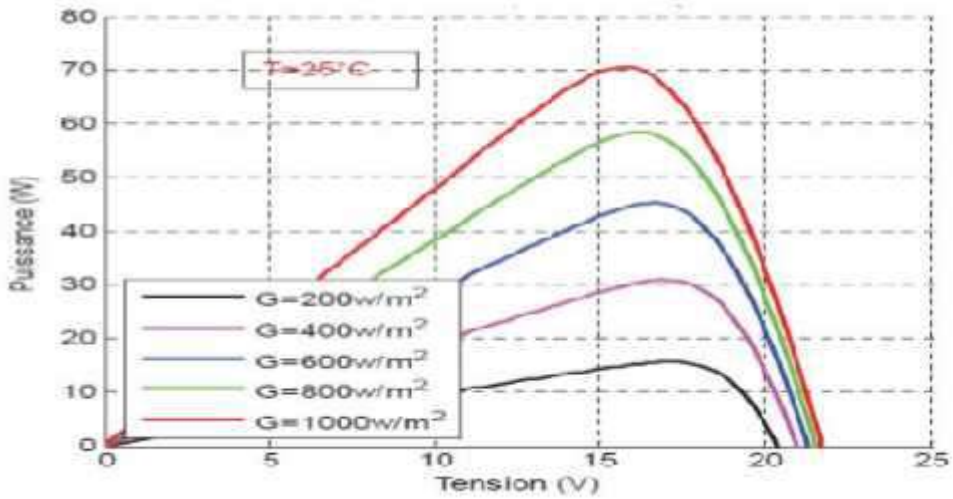


Figure (II.10) : La caractéristique P=f(v) en fonction de l'éclairement

Pour la figure (1.9) on remarque que pour l'éclairement G=1000 w/m2 le courant I_S =4.8A

et pour G=800w/m2 le courant I_S =3.84A on peut voir que le courant subit une variation

Importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

II.7.1.6. Influence de la Température :

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (II.11) et(II.12) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures

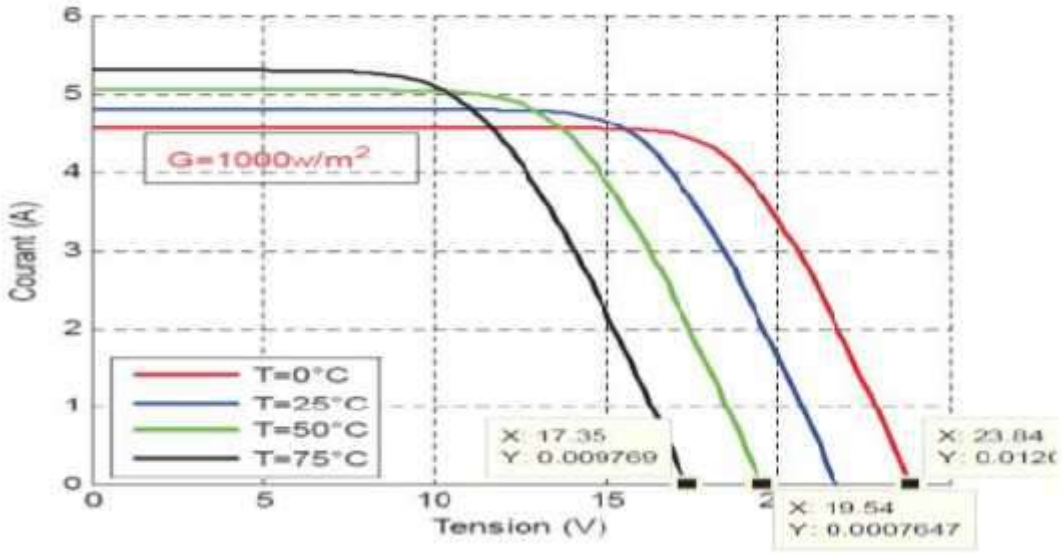


Figure (II.11) : La caractéristique de I=f(V) en fonction de température

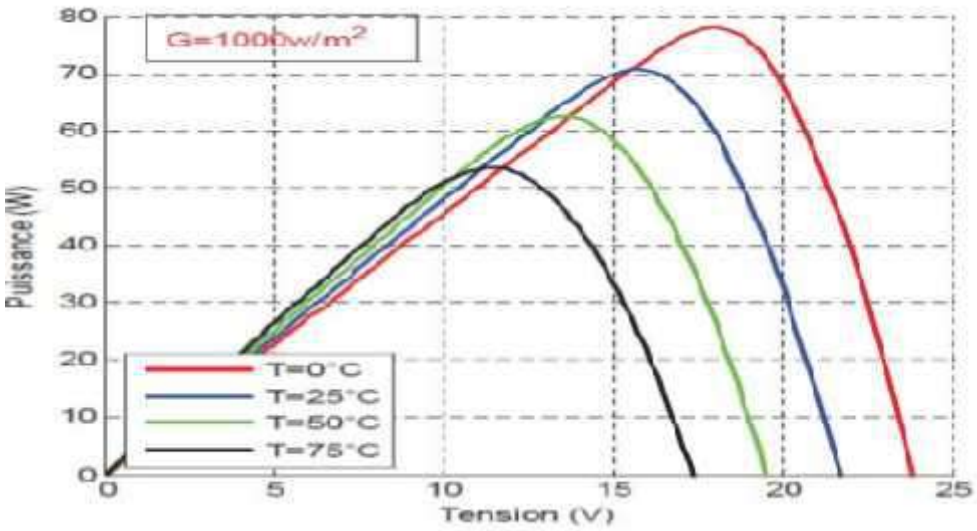


Figure (II.12) : La caractéristique de P= f(V) en fonction de température

Pour la figure (II.11) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (II.12). [17]

II.7.1.7. Influence de l'association série des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule .[18]

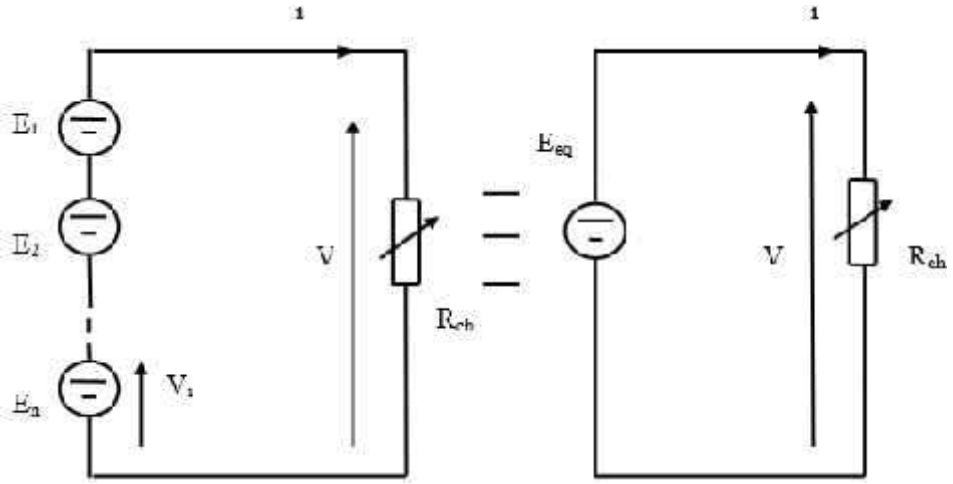


Figure (II.13) : Association de N_p modules solaires en série.

II .7.1.8. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [18].

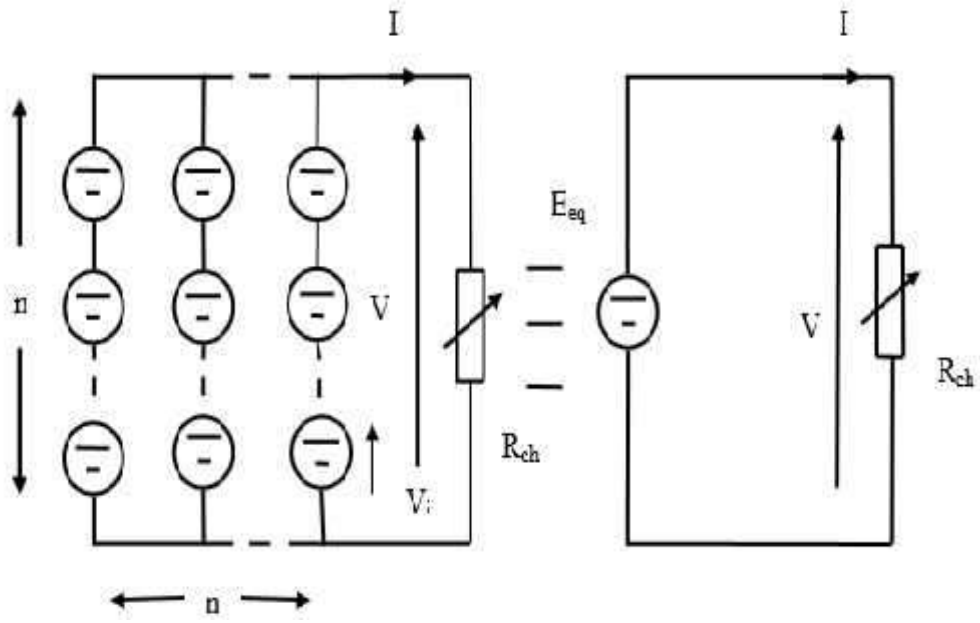


Figure (II.14) : Association mixte N_sxN_p modules solaires.

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{a\ N_s}\right)} - 1\right) - \left(\frac{V+I.R_s}{R_{sh}}\right) \quad \text{(II.16)}$$

$$I_{ph} = I_S + K_i(T - 298.15)\frac{G}{1} \quad \text{(II.17)}$$

$$I_0 = \frac{I_S + K_i(T-2\ \ .1\ )}{e^{\left(\frac{q(V_O + K_v(T-2\ \ .1}{a\ \ N_S}\right)-1}} \quad \text{(II.18)}$$

II.8. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui perm et de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [19].



Figure (I.15) : Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui les regroupe, Alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [20].

II.8.1. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

II.8.1.1. Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- 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 Méga Watt.
- 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 [20] .

II.8.1.2. 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 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.
- Tributaire 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 [20].

II.9.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque qui connait depuis quelques années une évolution profonde associées à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque.

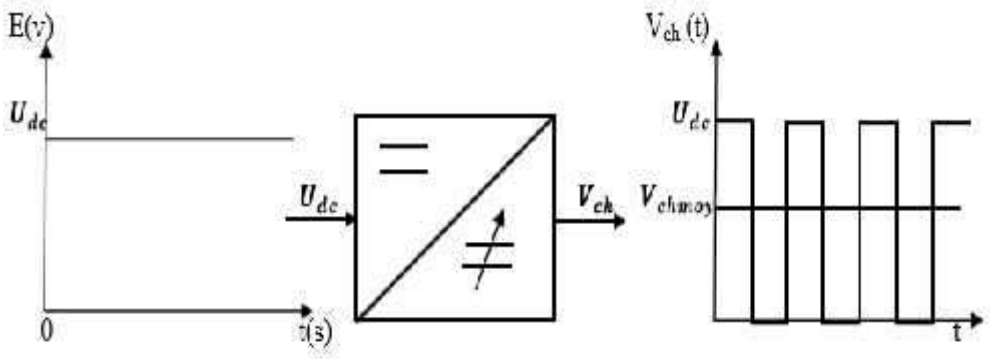
III.1.Introduction :

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée… On distingue deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux qui sont non isolés, que l'on appellera hacheurs, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, que l'on appelle alimentations à découpage (cas des alimentations de PC…). Par la suite, nous n'étudierons que les premiers.et Nous allons nous concentrer sur les hacheurs boost.

III.2.Présentation des convertisseurs continus-continus (DC/DC) :

Un hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue fixe à un niveau donné de tension ou de courant en une énergie continue variable à un autre niveau de tension ou de courant [21].

On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs.



Figure(III.1) Principe de base d'un hacheur

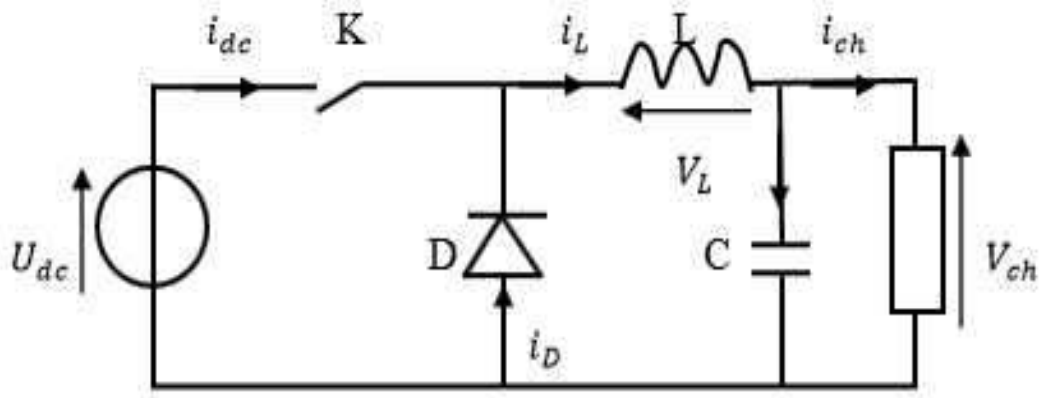
III.3.Différents types des hacheurs :

On distingue plusieurs types des hacheurs :

- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur élévateur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost converter »
- Hacheur monophasé en pont « Full Bridge converter »

III.3.1. Hacheur série :

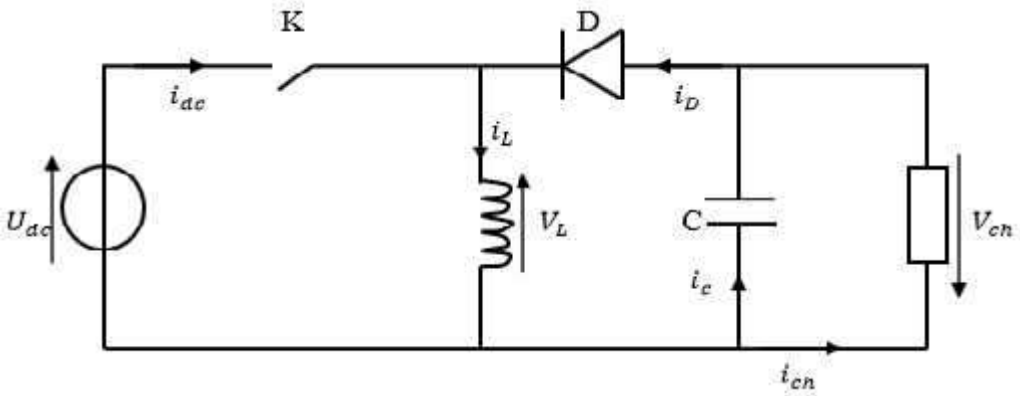
Hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant [22].



Figure(III.2) Hacheur série (abaisseur)

III.3.2. Hacheur parallèle :

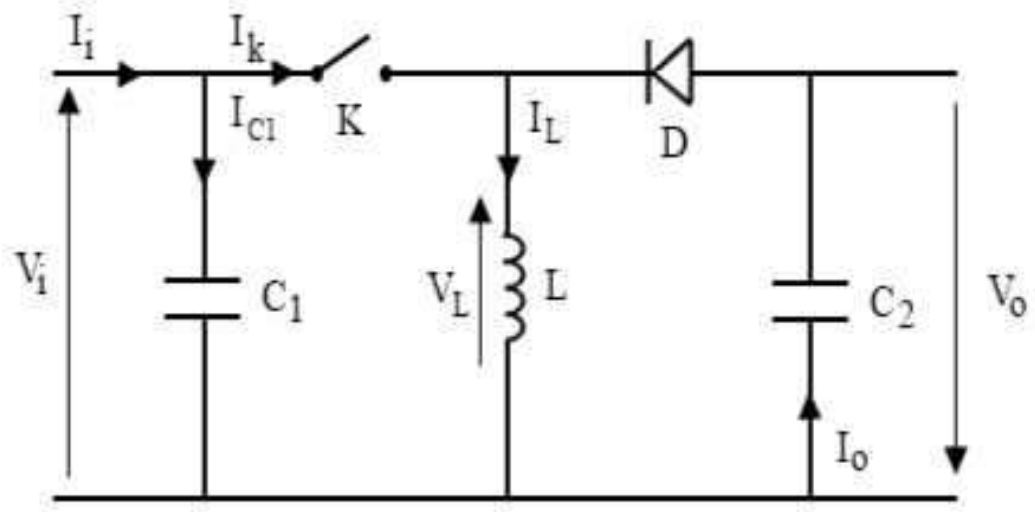
Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [23].



Figure(III.3)Hacheur parallèle (élévateur)

III.3.3. Hacheur abaisseur-élévateur

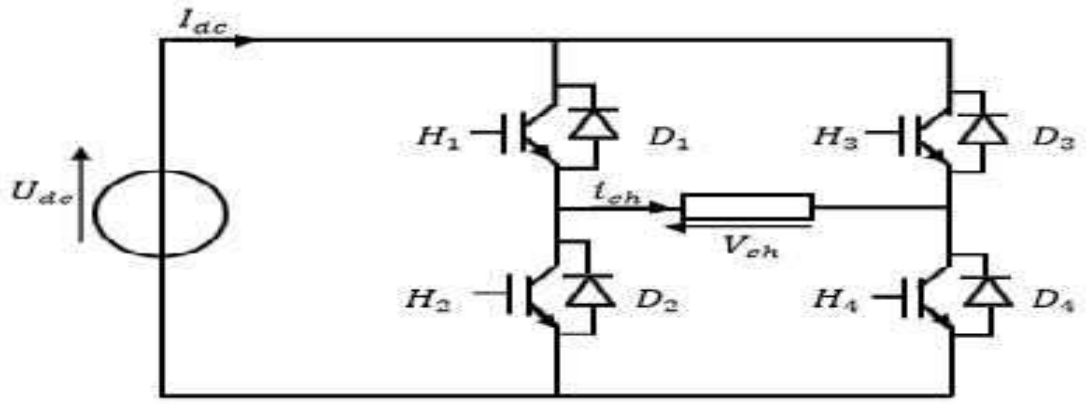
Hacheur abaisseur-élévateur, dévolteur-survolteur, de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élévateur est un convertisseur indirect DC–DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [24].



Figure(III.4) Hacheur abaisseur-élévateur

III.3.4. Hacheur monophasé en pont :

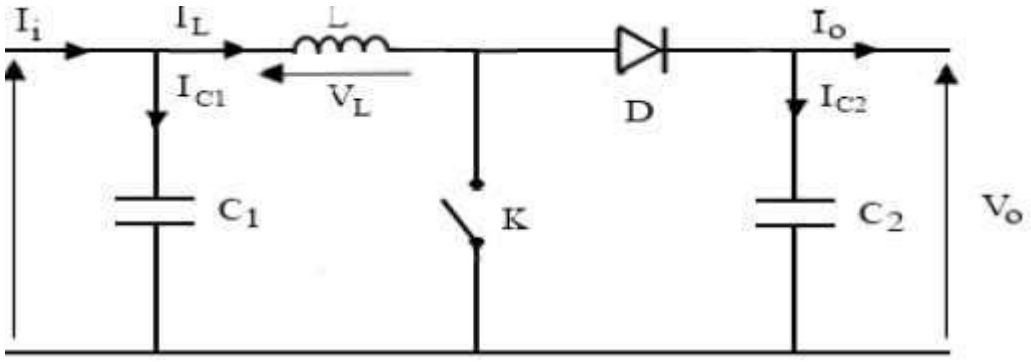
Hacheur réversible en courant et en tension, Hacheur en pont, Hacheur à quatre quadrants, type Full Bridge. Il permet de délivrer une tension moyenne de sortie et un courant moyen de sortie peuvent être positif ou négatif, à partir d'une source d'entrée de type continue.



Figure(III.5) Hacheur monophasé en pont (quatre quadrants)

III.4. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [25].

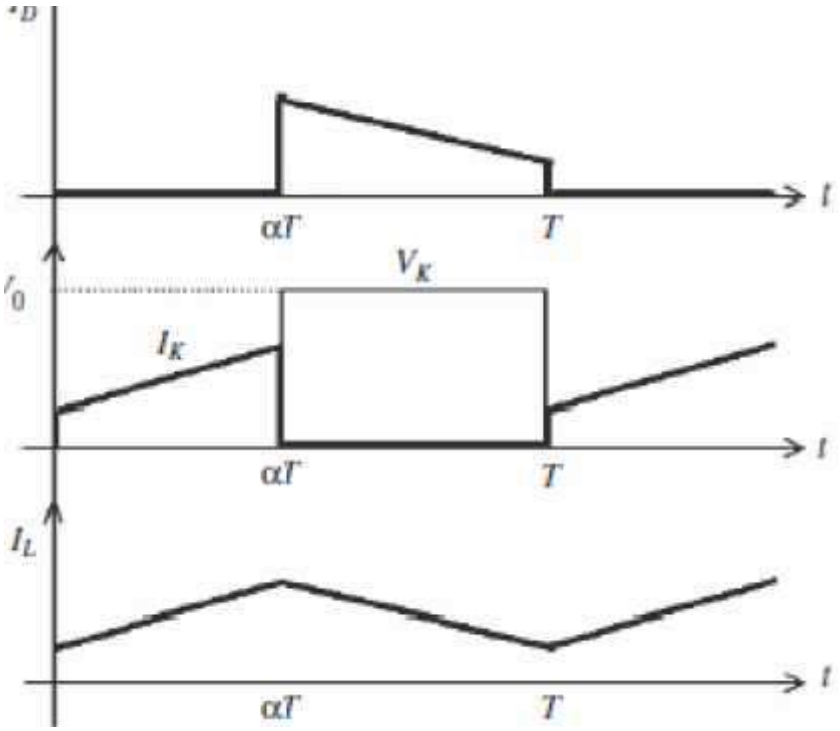


Figure(III.6) : Schéma électrique d'un hacheur boost

III.4.1.Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la duréeαT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps t$\in$ [αT_e,T_e], l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors$V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [26] :

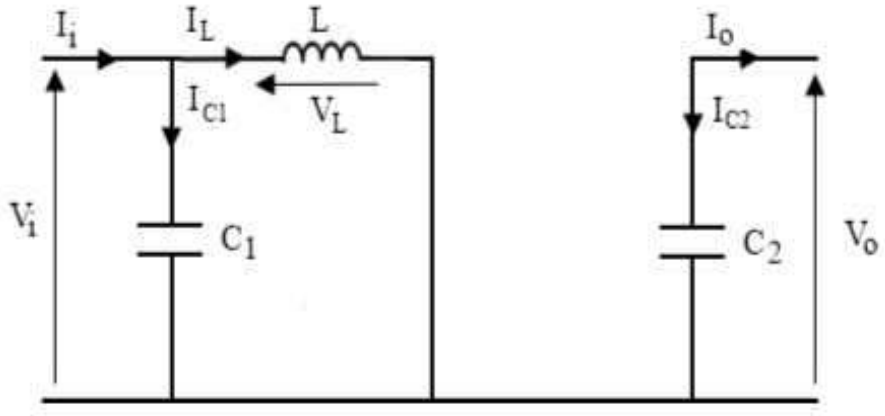
$V_0(1-\square) = V_i$ (III.1)



Figure(III.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

III.4.2. Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (figure.III.8), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre [0, αT_e] [27]



Figure(III. 8) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

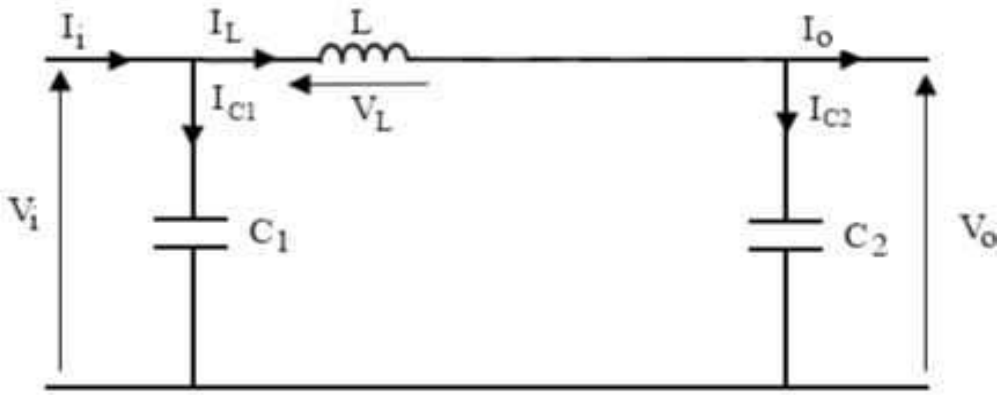
L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t)=C_1\frac{d\,V_i(t)}{d}=I_i(t)-I_L(t) \quad \text{(III.2)}$$

$$I_{c2}(t)=C_2\frac{d\,V_0(t)}{d}=-I_C(t) \quad \text{(III.3)}$$

$$V_L(t)=L\frac{d\,I_L(t)}{d}=V_i(t) \quad \text{(III.4)}$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:



Figure(III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{c1}(t)=C_1\frac{d\,V_i(t)}{d}=I_i(t)-I_L(t) \quad \text{(III.5)}$$

$$I_{c2}(t)=C_2\frac{d\,V_0(t)}{d}=I_L(t)-I_0(t) \quad \text{(III.6)}$$

$$V_L(t)=L\frac{d\,I_L(t)}{d}=V_i(t)-V_0(t) \quad \text{(III.7)}$$

III.5. La commande MPPT :

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [30].

III.5. 1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de

publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [30].

III.5. 2. Principe du MPPT :

Par définition, une 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, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_m ,I_m) [30].

L 'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.10).

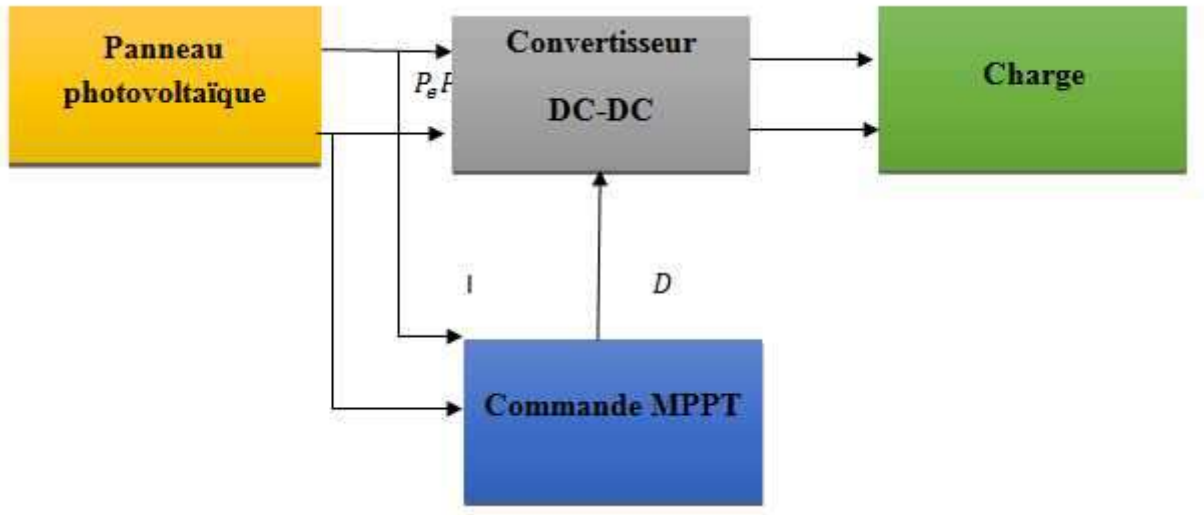


Figure (III.10) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

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 qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (III.11) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point defonctionnement bascule du point de puissance maximale PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

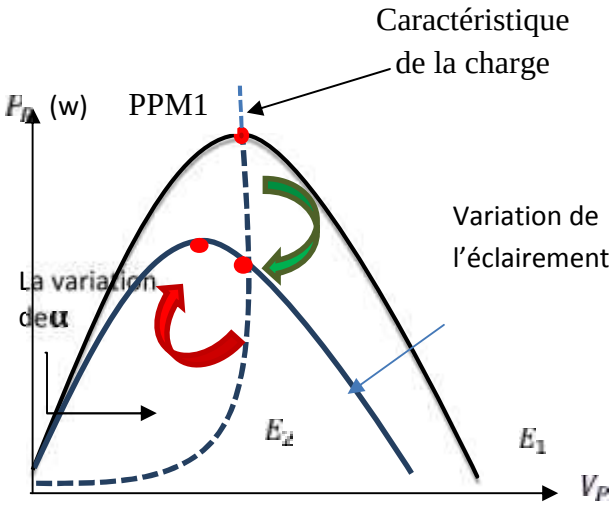
- Pour une variation d'ensoleillement (cas a). Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du **GPV**(cas c).Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peutretrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM.

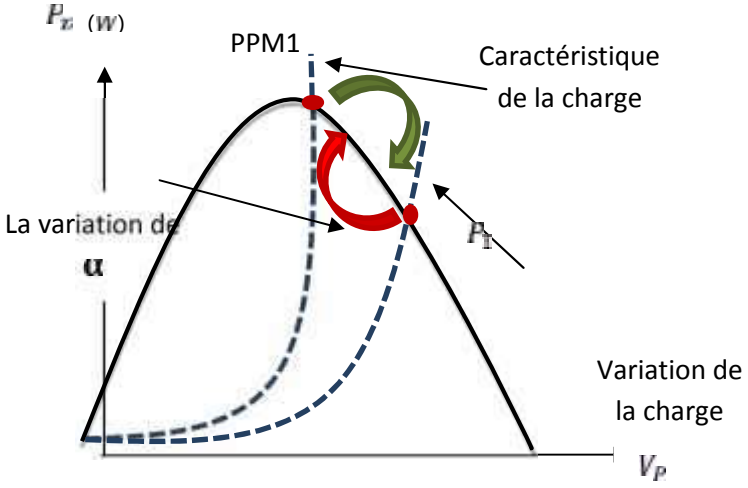
Réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [31].

Charge : constante
T : constante
L'éclairement : variable



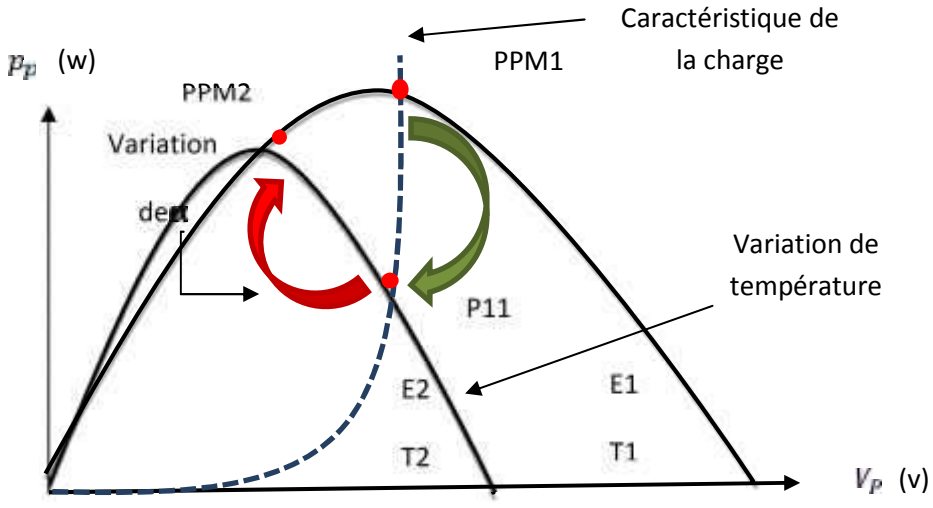
(a)

Charge : variable
T : constante
L'éclairement : constante



(b)

Charge : constante
T : variable
L'éclairement : constante



(c)

Figure (III.11) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

(a) suite à une variation d'éclairement,

(b) suite à une variation de charge,

(c) suite à une variation de température.

III.5. 3. Classification des techniques MPPT :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [K].

III.5. 4. Les premiers types de technique MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM) [31].

Ce dernier est décrit en figure (III.12) et peut être implanté entièrement en numérique.

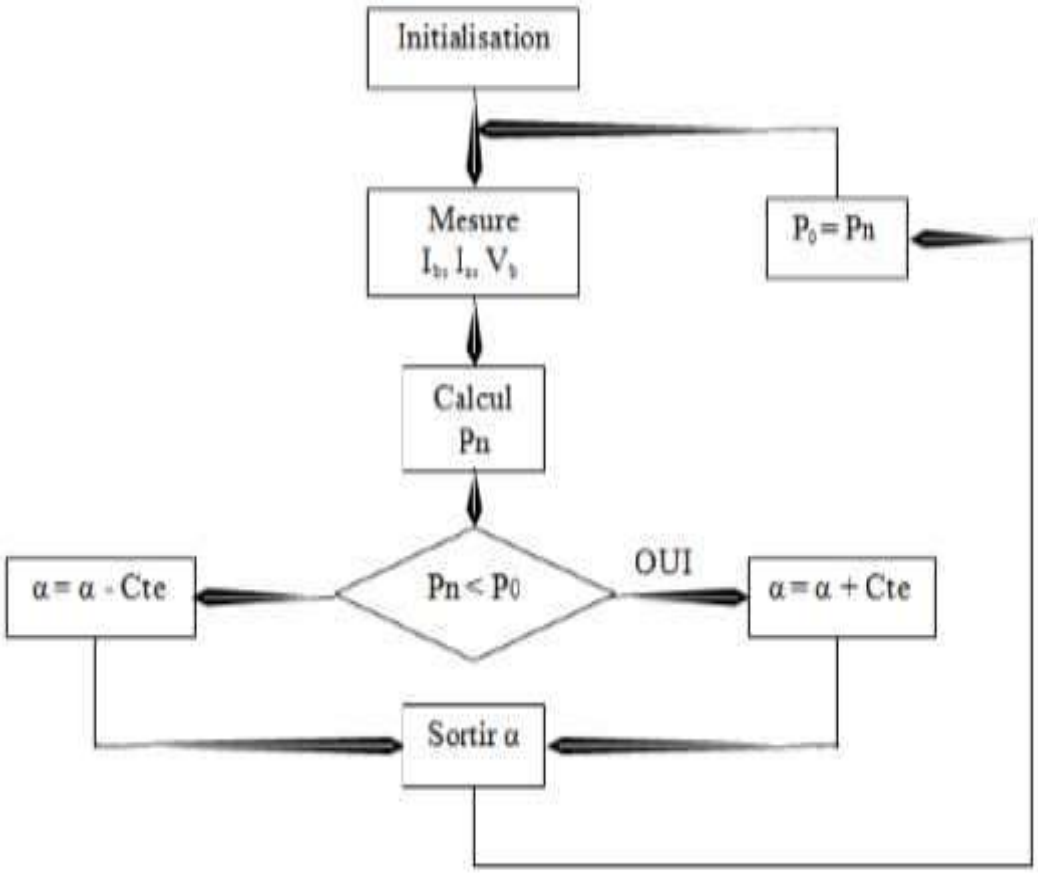


Figure (III.12) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant et de la tension $V_b$aux bornes de la batterie et du courant de charge I_s, le produit >(I_b+ I_s)x. V_b est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée Pn délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectué.

Cette image est alors comparée à la puissanceP_0, si $P_n$$P_n$est inférieure à$P_0$, alors α est incrémenté, sinon α est réduit. Une fois $\boldsymbol{\alpha}$ modifié, P_0 prend la valeur $P_n$et on effectue une nouvelle mesure deI_b,V_b et + I_s pour calculer la nouvelle puissanceP_n.

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [1].

III.5.5.Evolution du point d'opération du générateur PV :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P1) mesuré à l'instant (t-I) (figure III.13).

Si P1<P2, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [28].

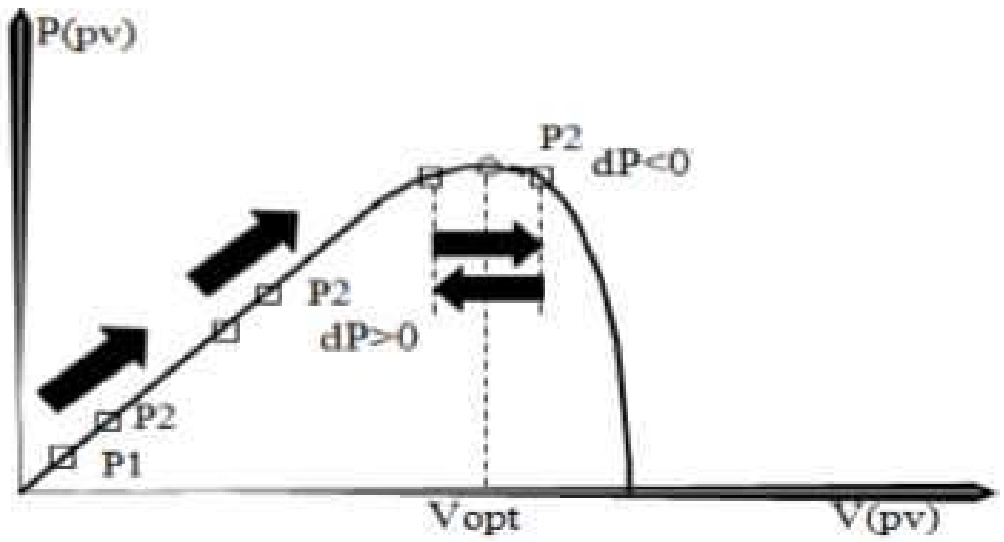


Figure (III.13) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir [28] :

La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.

Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure (III.14).Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance 1'avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

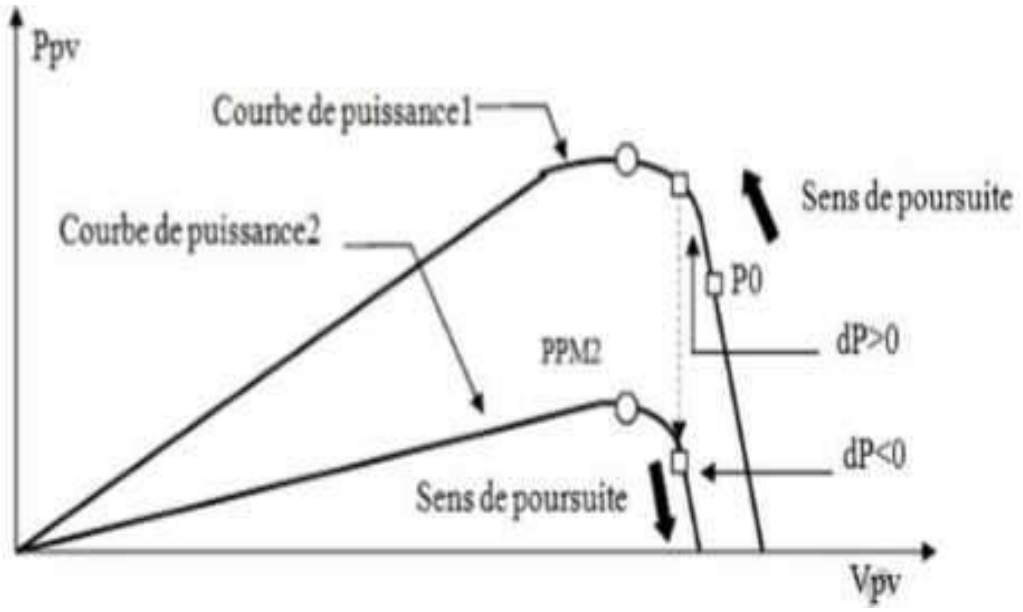


Figure (III.14) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge

III.5.6. Les méthodes de poursuite de MPP :

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [29].

III.5.7. Méthodes à contre réaction de tension :

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [30].

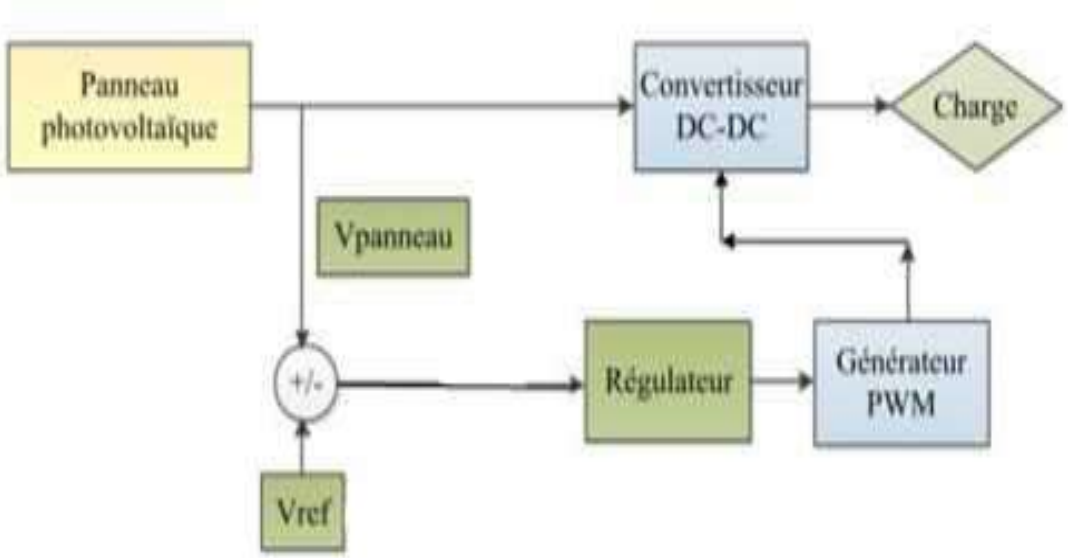


Figure (III.15) : Principe MPPT à courant de référence en fonction de I_S

Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes :

- Référence en fonction du courant de court-circuit I_C .
- Référence externe (Cellule pilote).

III.5.8. Méthodes à contre réaction de puissance :

Les méthodes à contre réaction de puissance se bases sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs P = V× I [30].

III.5.9.Algorithme perturbation et observation:

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. [20] Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution deV_T ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P(k) du panneau est supérieure à la valeur précédente P (k-1*)* alors en garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (4.9) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_m de fonctionnement Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aconditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et al. [20].Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précèdent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance, figure (4.8).

Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires lors de leurs passages dans une zone d'ombre tels que végétation ou bâtiments ainsi que le changement de l'angle d'incidence pour des véhicules en mouvement.

Tableau.III.1.Perturbation de la tension Observation de la puissance Prochaine Perturbation

Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC). Nous sommes sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost). On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

IV.1.Introduction :

Les réseaux de neurones (RN) multicouches constituent des approximateurs universels. L'atout principal de ces réseaux réside dans leur capacité d'apprentissage. Par contre, leur structure et leurs paramètres n'ont pas toujours des justifications physiques. De plus, la connaissance humaine ne peut pas être exploitée pour les construire. Les systèmes d'inférence flous sont également des approximateurs universels. Ces systèmes possèdent deux points forts par rapport aux RN. D'une part, ils sont généralement construits à partir de la connaissance humaine, d'autre part, ils ont une capacité descriptive élevée due à l'utilisation de variables linguistiques. Il est donc apparu naturel de construire des systèmes hybrides qui combinent les concepts des systèmes d'inférence flous et des RN. Ainsi l'approche Neuro-floue est apparue. [32]

Plusieurs auteurs ont utilisé cette approche. Nous présentons ici un type spécial de réseaux neuro-flous. Il s'agit de l'approche ANFIS (Système d'inférence flou organisé en réseau adaptatif) proposée par Jang.

IV.2.Système d'inférence flou base sur les réseaux de neurones adaptatifs :

IV.2.1Structure d'ANFIS :

ANFIS met en application un SIF du type Takagi Sugeno et a une architecture composée de cinq couches comme représentée. Pour simplifier la compréhension et sans perte de généralité, nous considérons un système à deux entrées x_1 et x_2 et une sortie y. Considérons aussi un modèle flou de type TSK de ce système, composé des deux règles suivantes :

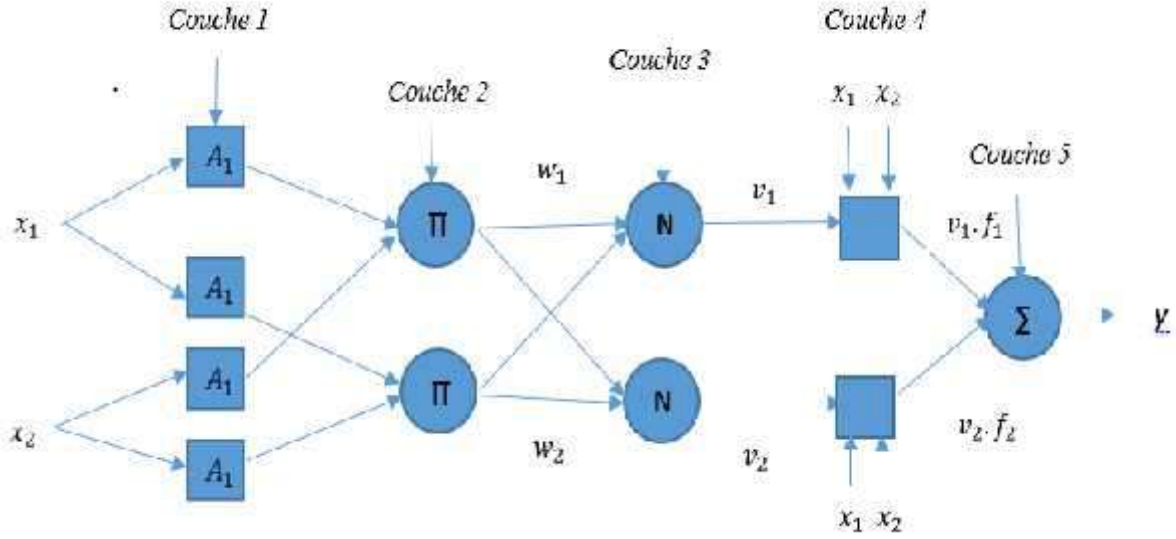
Si $x_1$est A_1 e x_2 est B_1 alors

$y_1 = f_1(x_1,x_2) = a_1x_1 + b_1x_2 + c_1$

Six_1 est A_2 et $x_2$estB_2 alors

$y_2 = f_2(x_1,x_2) = a_2x_1 + b_2x_2 + c_2$(1)

Jang a proposé de représenter cette base de règles par le réseau adaptatif de la figure 1.



Figure(IV.1) : Architecture équivalente d'ANFIS pour deux règles.

Le réseau adaptatif ANFIS est un réseau multi- couches dont les connexions ne sont pas pondérées, ou ont toutes un poids de 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité :

- les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres,
- les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres.

Toutefois, chaque nœud (carré ou circulaire) applique une fonction sur ses signaux d'entrées. La sortie O_i^Kdu nœud i de la couche k (appelée nœud (i, k)) dépend des signaux provenant de la couche k-1 et des paramètres du nœud (i, k), c'est-à-dire,

$O_i^{K-1}=f(O_1^{K-1}\dots O^{K-1}$nk-1, a, b, c…)(IV.1)

Où n_{k-1}est le nombre de nœuds dans la couche k-1, et a, b, c ... sont les paramètres du nœud (i, k). Pour un nœud circulaire ces paramètres n'existent pas.

Couche 1 :

Les neurones de cette couche réalisent les ensembles flous qui serviront dans les antécédents des règles. Dans le modèle de Jang, les fonctions d'appartenance sont des gaussiennes. $O_i^1 = \mu_A(x)$ (VI.2)

Où *x* est l'entrée du nœud i, et *Ai* le terme linguistique associé à sa fonction. En d'autres termes, O_i^1est le degré d'appartenance de *x* à *Ai*. Les paramètres d'un nœud de cette couche sont ceux de la fonction d'appartenance correspondante.

Couche 2 :

Chaque neurone dans cette couche correspond à une règle floue Sugeno. Il reçoit les sorties des neurones de fuzzification et calcule son activation. La conjonction des antécédents est réalisée avec l'opérateur produit.

$$w_i = \mu_A(x_1).\mu_B(x_2) \quad , i = 1,2 \qquad \text{(VI.3)}$$

Couche 3 :

Chaque neurone calcule le degré de vérité normalisé d'une règle floue donnée. La valeur obtenue représente la contribution de la règle floue au résultat final.

$$V_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \qquad \text{(VI.4)}$$

Couche 4 :

Chaque neurone i de cette couche est relié à un neurone de normalisation correspondant et aux entrées initiales du réseau. Il calcule le conséquent pondéré de la règle.

$$O_i^4 = V_i f_i = V_i (a_i x_1 + b_i x_2 + c_i) \quad , i = 1..2 \qquad \text{(VI.5)}$$

Où vi est la sortie de la couche 3, et {ai, bi, ci} est l'ensemble des paramètres de sortie de la règle i.

Couche 5 :

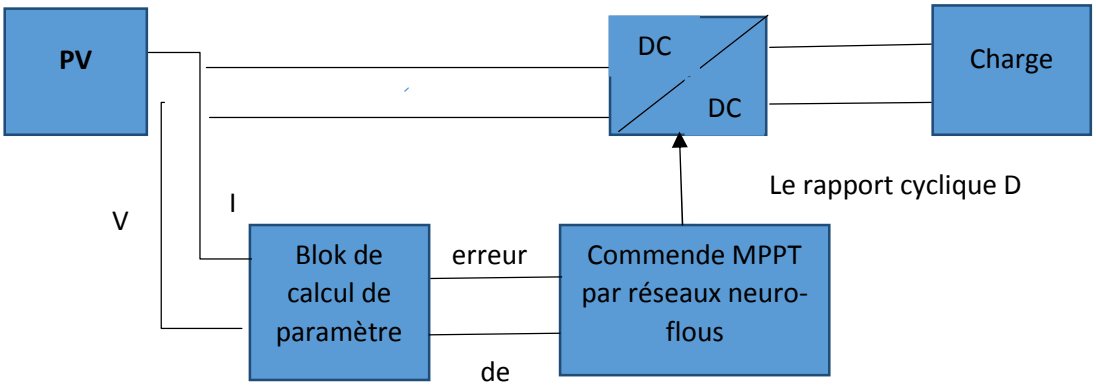
Comprend un seul neurone qui fournit la sortie de ANFIS en calculant la somme des sorties de tous les neurones de défuzzification.

$$O_1^5 = y = \Sigma_i . V_i . f_i \qquad \text{(VI.6)}$$

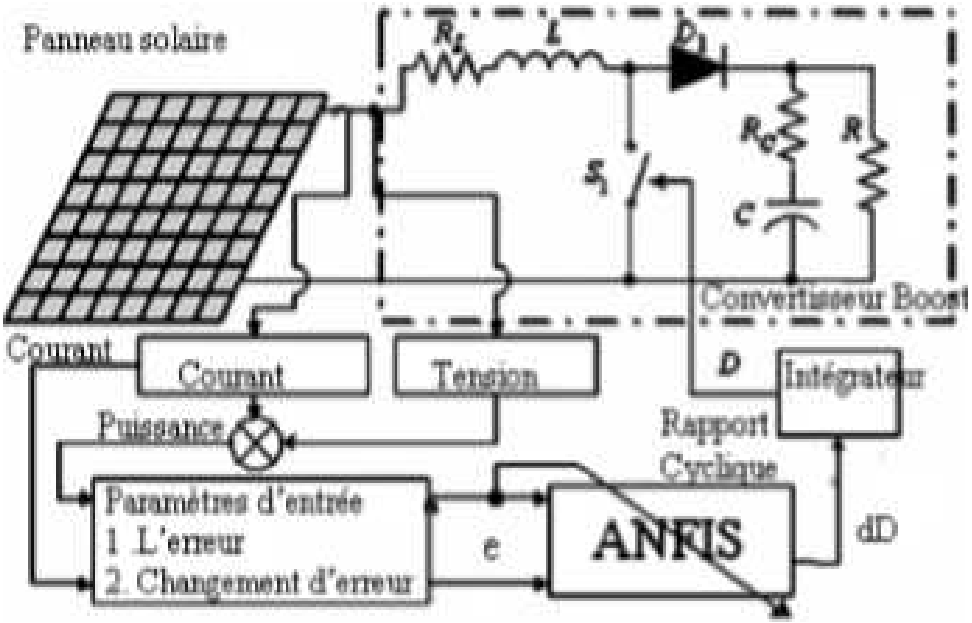
L'apprentissage à partir d'un ensemble de données concerne l'identification des paramètres des prémisses et des conséquences, la structure du réseau étant fixée. L'algorithme d'apprentissage commence par construire un réseau initial, ensuite on applique une méthode d'apprentissage par rétro propagation de l'erreur. Jang a proposé d'utiliser une règle hybride d'apprentissage qui combine un algorithme de descente de gradient avec une estimation par moindres carrées.

IV.3. CONCEPTION D'UN CONTROLEUR MPPT A BASE DE RESEAU NEURO-FLOU

La figure 6.areprésente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque doté d'une commande MPPT à base de réseaux neuro-flou.



Figure(IV.2): Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT par réseau neuro-flou.



Figure(IV.3) illustration du principe du ANFIS pour la poursuite du point de puissance maximale

A. Description et structure du contrôleur MPPT neuro-flou proposé Le contrôleur neuro-flou développé dans cette partie comprend deux entrées 'e' et 'de' et une seule sortie 'D' qui représentent respectivement l'erreur, la variation de l'erreur, et la commande. Les deux

variables d'entrées génèrent l'action de contrôle 'D' qui sera appliquée au hacheur, afin d'ajuster le rapport cyclique de ce dernier de telle manière à assurer l'adaptation de la puissance fournie par le GPV. Ce contrôleur permet une génération automatique de règles floues basées sur le modèle d'inférence de Sugeno**.**

IV.4. Description de système

Le modèle contient :

- un champ PV délivrant un puissance crête de 100 kW à 1000 W / m^2 des irradiationssolaire.
- un convertisseur boost augmente la tension de PV (273.5 VDC à la puissance maximale) à 500 VDC. Le rapport cyclique D est optimisé par le contrôleur MPPT
- un bloc de commande V_S qui contrôle la tension V_{cl} et les courants Id Iq.

-un bloc de commande MPPT

IV.5.Simulation global PV :

IV.5.1.Schéma de simulation (MPPT) :

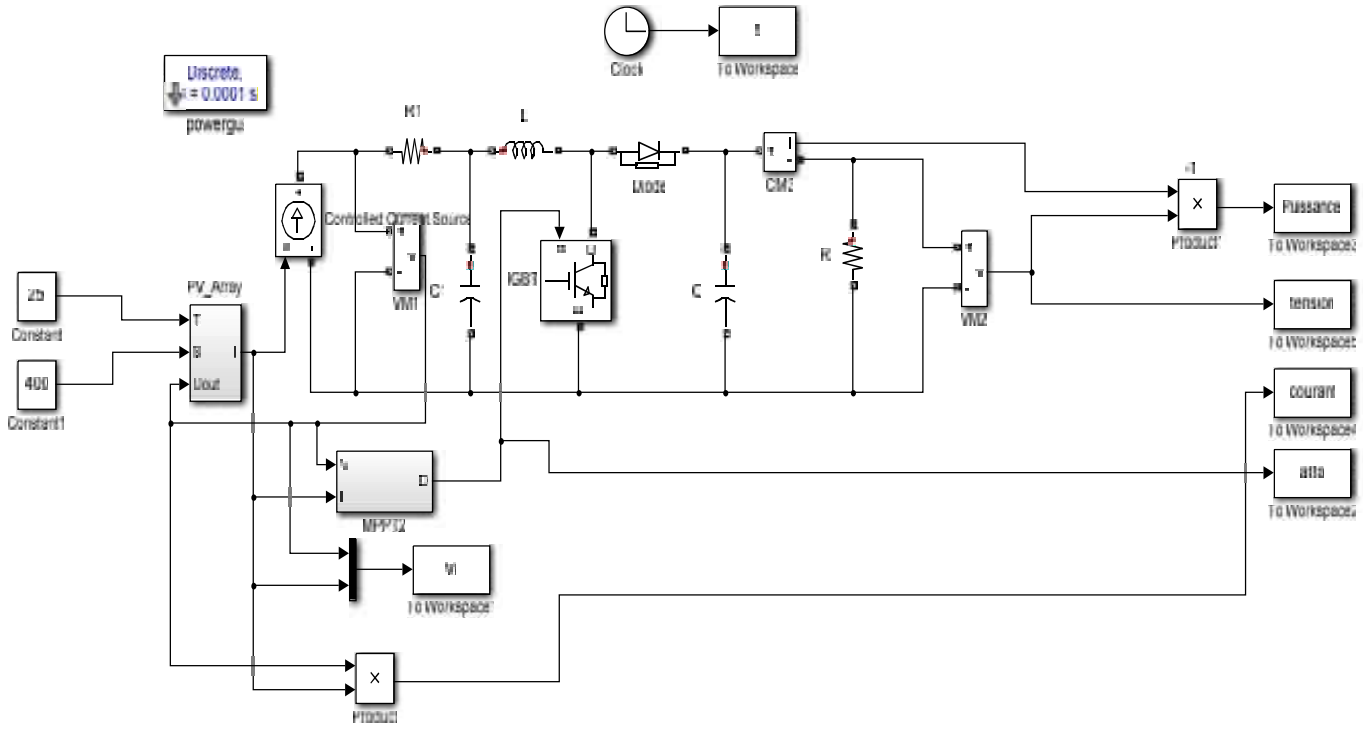
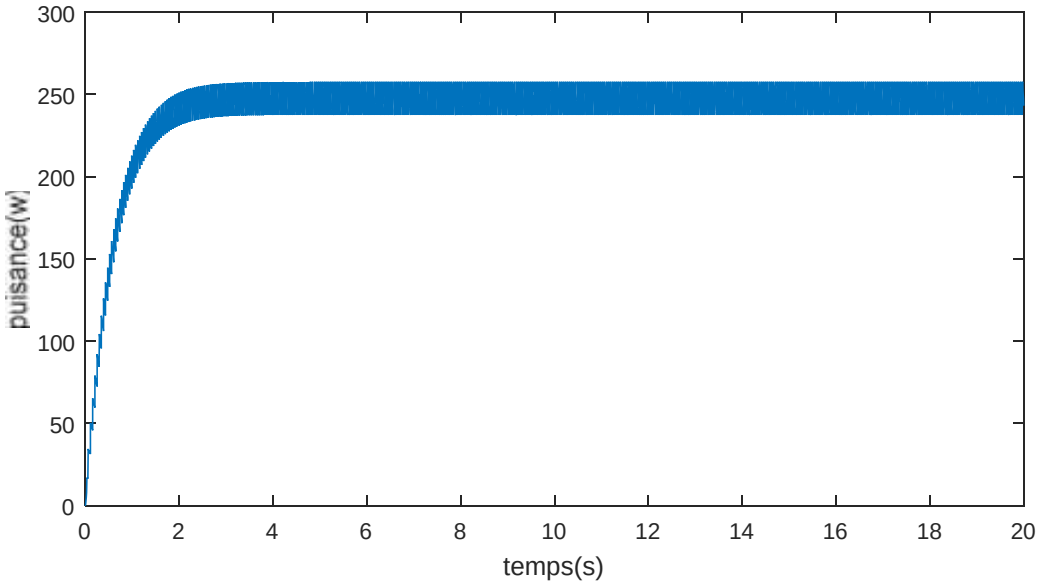
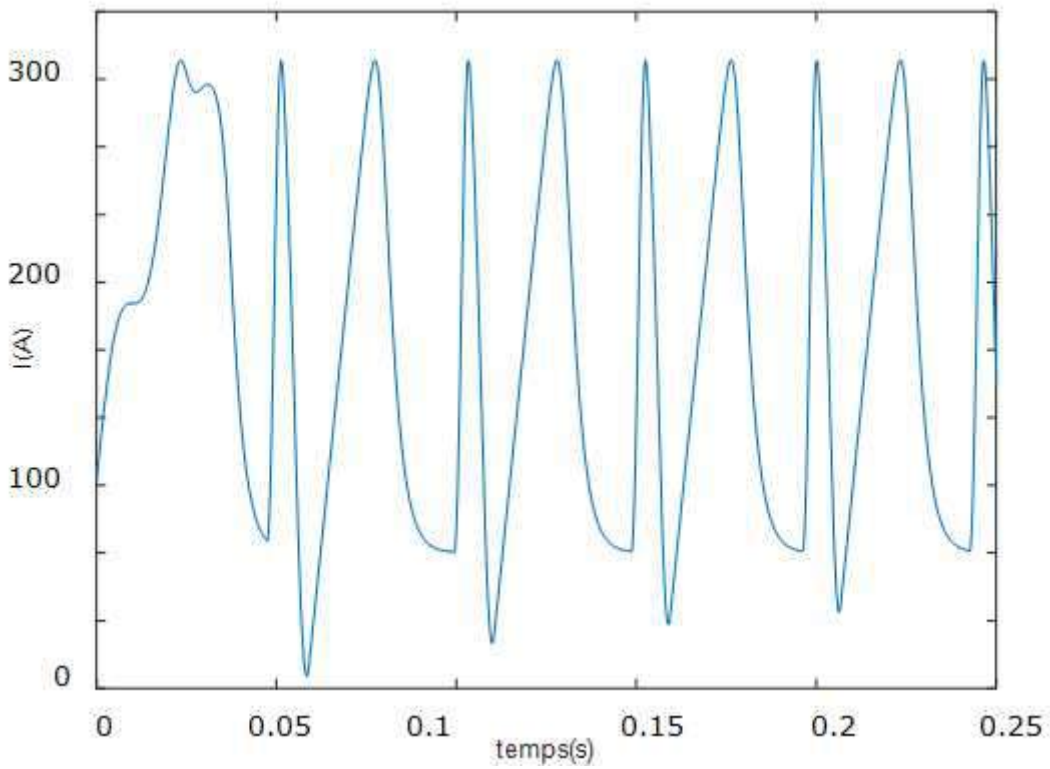


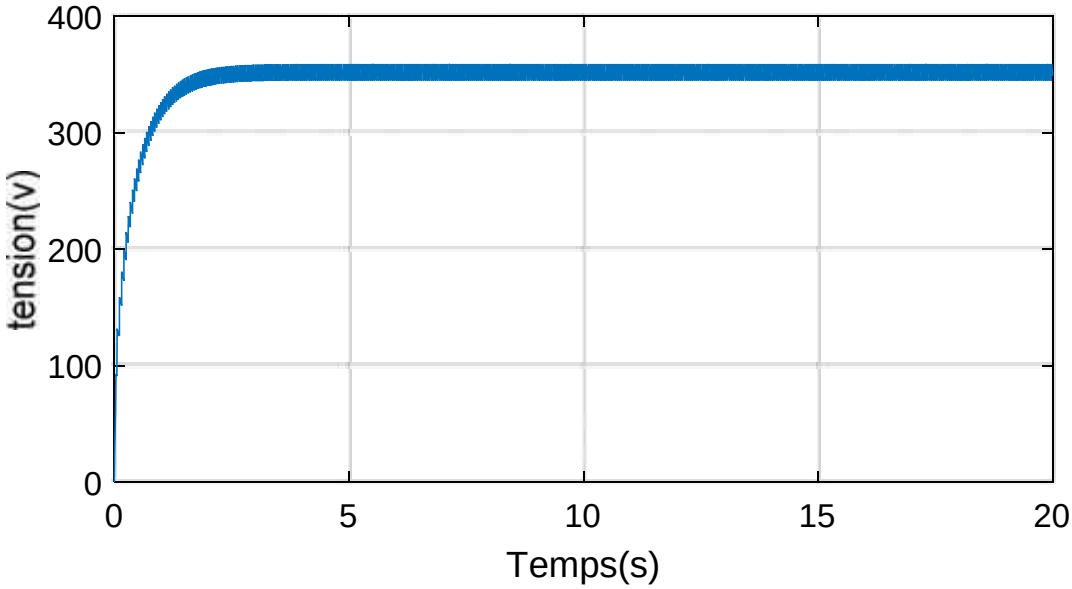
Figure (IV.4) schéma global PV (MPPT)



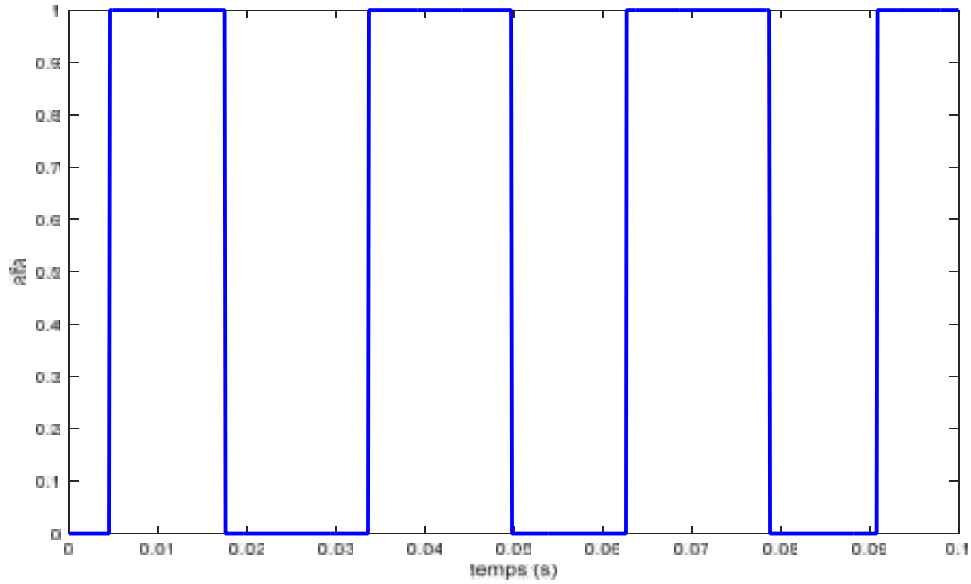
Figure(IV.5) La puissance P(t)



Figure(IV.6) le courant I(t)



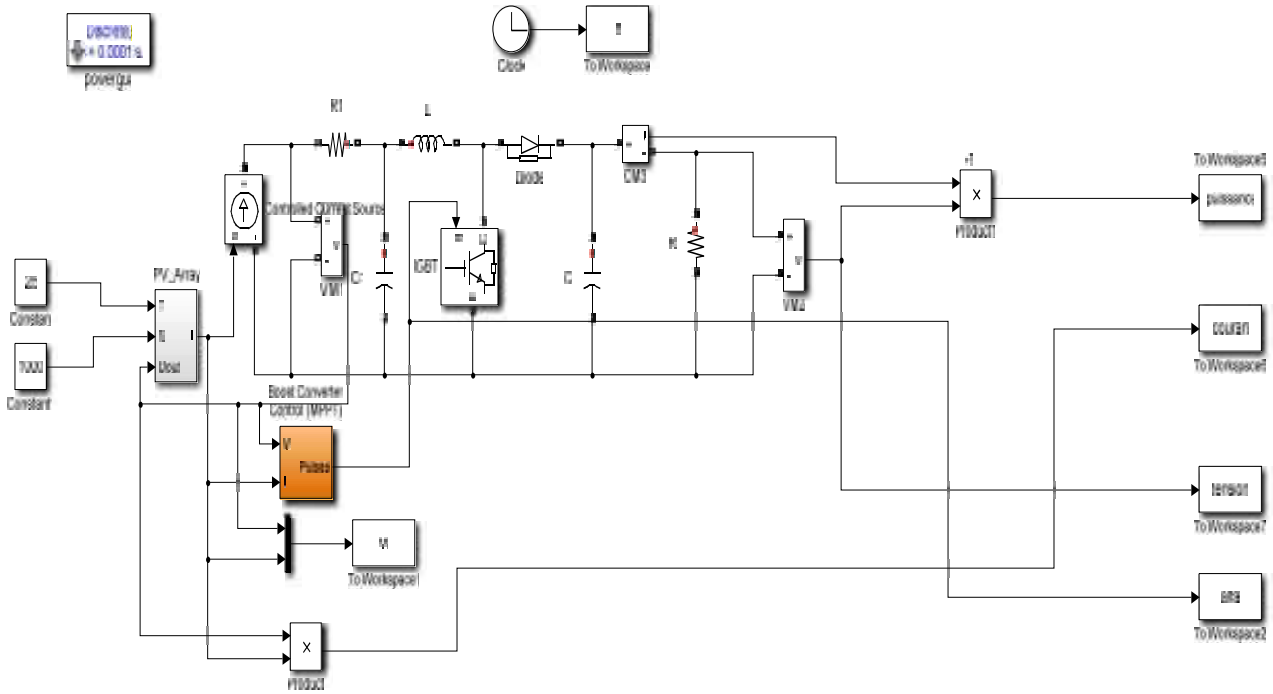
Figure(IV.7) la tension V(t)



Figure(IV.8) Le rapport cyclique alfa

IV.5.2.Simulation de système avec le réseau de (neuro-floue)

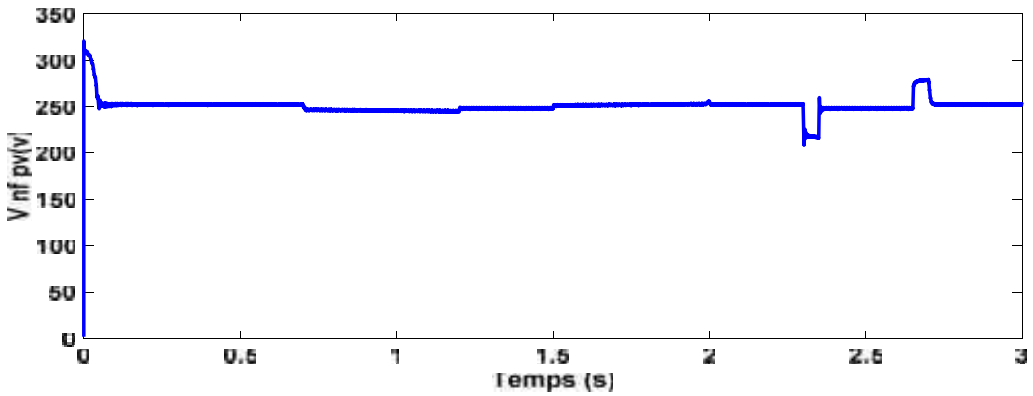
La simulation d'un système photovoltaïque contrôlé par neuro-flou



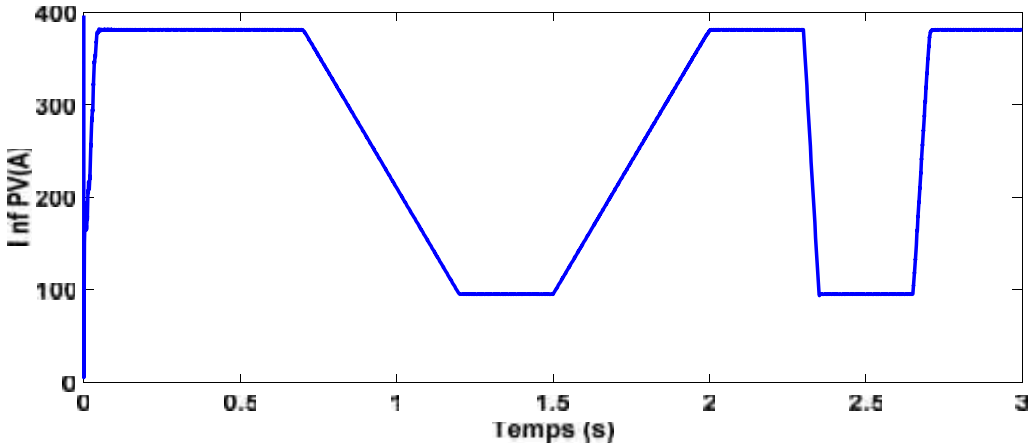
Figure(IV.9) schéma de simulation global (neuro-floue)

IV.5.2.1. résultat Simulation :

Les figures suivantes représentent lesrésultats de simulation de système PV avec la commande neuro-floue**.**



Figure(IV.10) La tention V(t)



Figure(IV.11) le courant I(t)

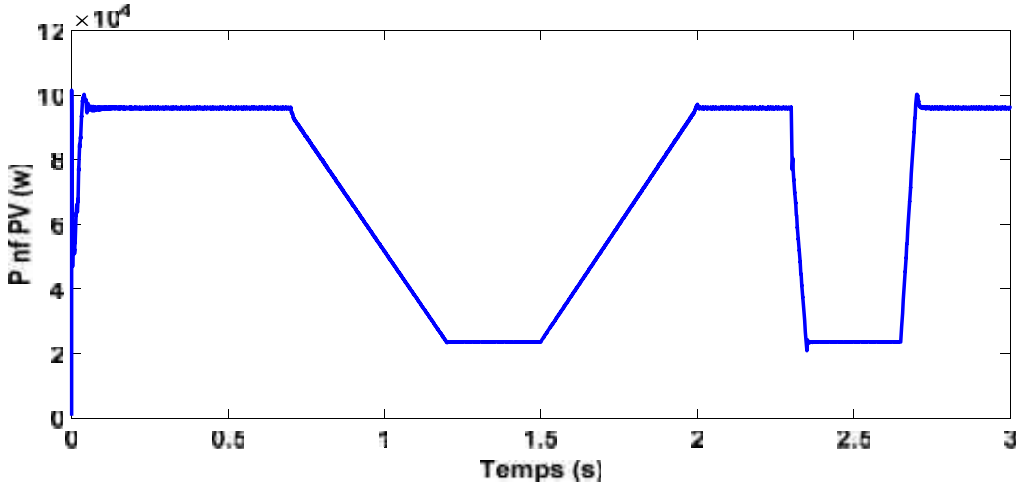
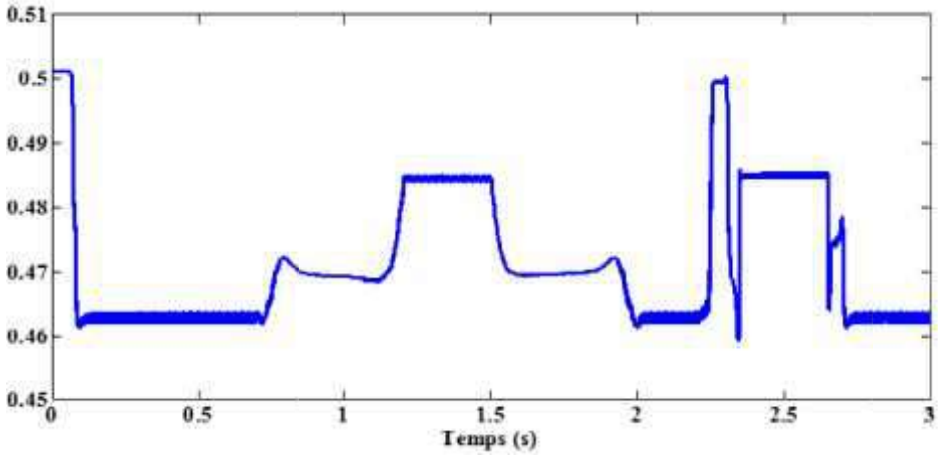


Figure (IV.12) :puissance PV



Figure(IV.12) : Le rapport cyclique.

IV.6.CONCLUTION :

Dans ce chapitre nous avons simulé les équipements représentant le système photovoltaïque, tel que le panneau photovoltaïque, le hacheur survolteur (booste) et la charge.et le régulateurs MPPT (neuro-flou).

Comme résultats nous pouvons dire que dans la technique neuro-flou quand on a minimisé l'erreur t'envers zéro on obtenue un bon résultat pour avoir le point de puissance maximal.

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont out conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile est rayonnement solaire reçu par le panneau photovoltaïque solaire, donne des généralités sur les systèmes PV, l'effet PV, principe de cellule PV, Ainsi, les avantages et les inconvénients.

Nous avons étudions à un convertisseur DC/DC de type boost qui fournit une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC /DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal, Ainsi, approfondie sur les différents algorithmes des techniques de poursuite de point de puissance maximale basés sur contre réaction (tension courant puissance), algorithme perturbation et observation algorithme incrémentation.

Le choix du convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique de la différente configuration des convertisseurs DC-DC nous a facilité la tâché de développement d'un modèle de recherche du MPPT en Simulink.

Finalement, on a étudié la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Pour cela, on a étudié d'abord la modélisation du panneau PV par la commande MPPT

Puis, on a représenté la structure de Technique neuro-flou. Cette Technique neuro-flouutilise la dérivée de la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

.

[1] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).

[2] A, H, Khedim. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et Photovoltaïque. , Centre de Publication Universitaire. (2003).

[3] Z, Sen. Solarenergyfundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).

[4] BelakehalSoltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010

[5] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008

[6] Louazene Mohamed Lakhdar, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla", Mémoire de Magister, université de Batna, 12/06/2008

[7] Camara Mohamed Ansoumane, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs", thèse de Doctorat, université de Paris, 04/07/2011

[8] A Benkhelifa : Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan a eau influence de l'intensite de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solairesurlerendementducapteur. MémoiredeD.E.A.,KasdiMerbah-Ouargla, 2012.

[9] S Semoui : Modélisation, simulation et optimisation des gisements solaires et éoliens des sites isolés de l'algérie cas d'adrar et de naama. Mémoire de D.E.A., 2015.

[10] http ://www.algerie-focus.com/category/algerie,consultée le 15/03/2017.

[11] M Addou et A Beddiaf : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme. Mémoire de D.E.A., Abou BekrBelkaïd- Tlemcen, 2016.

[12] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur

FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[13]] M.N.Mchalikh et CH.Hmada’’Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ’’ Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013

[14] A. T.SINGO ‘ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride

[15] M.N.Mchalikhet CH.Hmada’’ Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ’’ Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013.

[16] M.AmaudDeves ‘’ énergie photovoltaïque (Application au traitement de l’eu potable et des eaux usées en rurales)’’ document technique Rédition 2003 FNDAE n 12.

[17] O.BENSEDDIK et F.DJALOUD ’’ Etude et optimationdu fonctionnement d’un système photovoltaïque ‘’Mémoire de Master Université KasdiMerbah-Ouargla 27/06/2012.

[18] W.Bensaci’’ Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ’’ Mémoire de Master Université KasdiMerbah-Ouargla 2011/2012

[19] M.N.Mchalikhet CH.Hmada’’Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque

[20] I.Bendjamaa ‘’Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque ‘’ Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.

[21] C. bernard, C. sebrao, O. bernardlaval, C.vaudouer «Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques» université de sfax école nationale d’ingénieurs de sfax,
2008-2009.

[22] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC

», octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[23] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[24] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.

[25] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005

[26] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008

[27] Abouchabana Nabil, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009

[28] Alain Bilbao learreta '' Réalisation de commandes MPPT Numériques '' Rapport de stage Projet Fin d'Etudes UniverstatRoviraVirgili 2006.

[29] M.N.Mchalikhet CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013.

[30] F.Slama '' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique '' Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 01/04/2011

[31] S.Lhlah '' Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation
(P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)'' Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.

[32] Y.Nakoula, ''Apprentissage des modèles linguistiques flous, par jeu de règles pondérées'', Thèse de doctorat, Université de Savoie, 1997

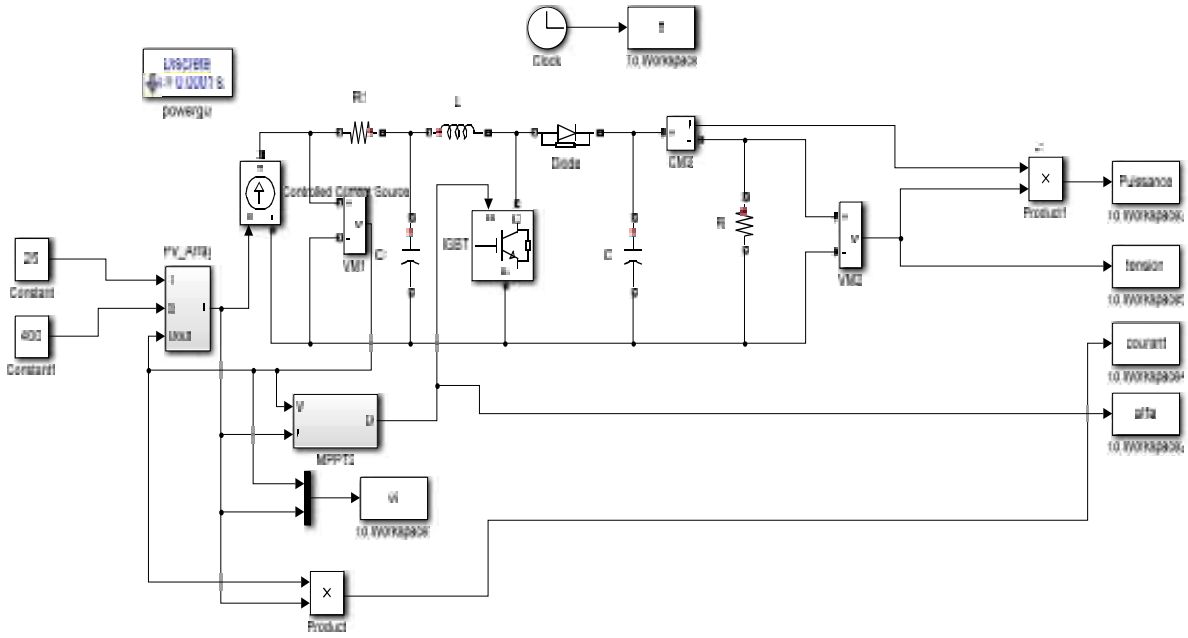
Annexe



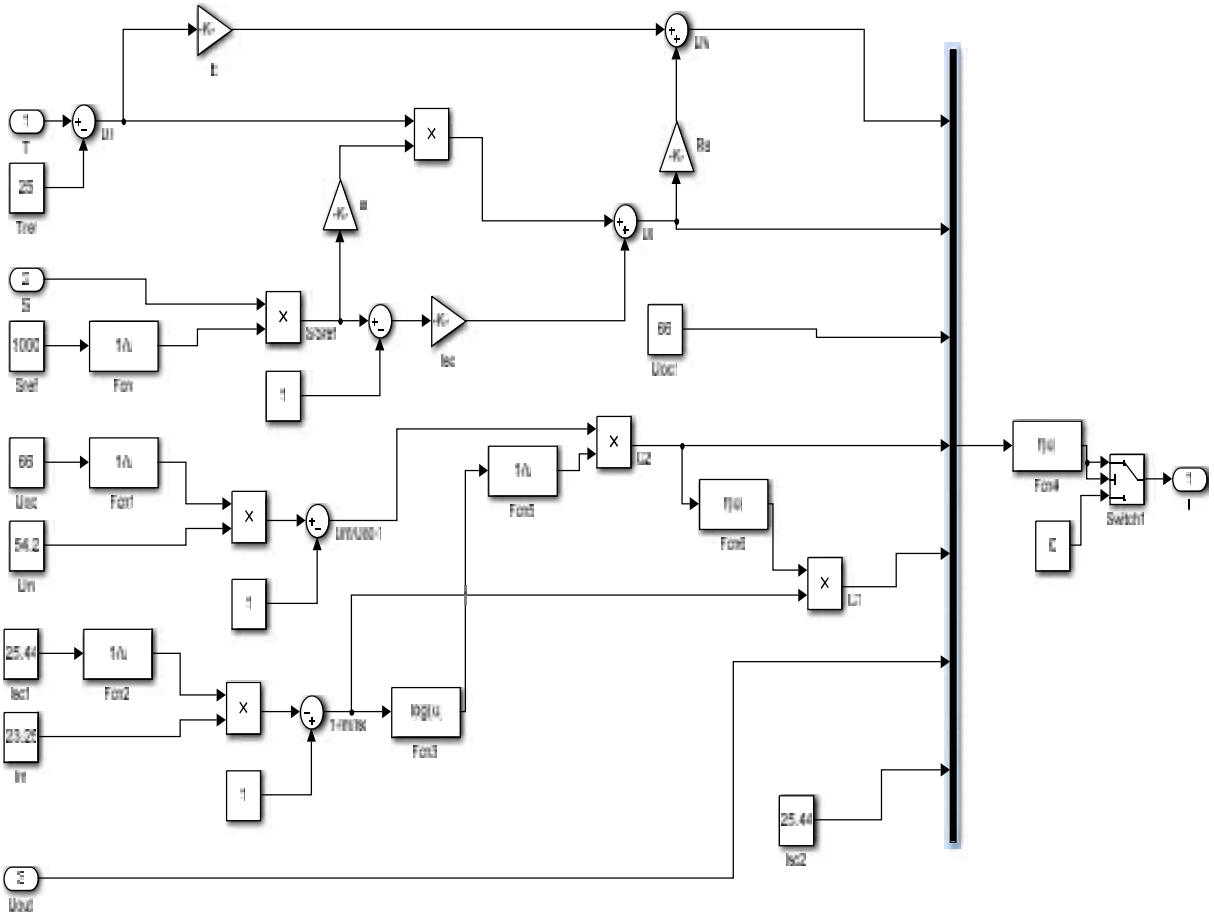
Paramètres du panneau solaire

Irradiation et température de la cellule	$1000w.m^{-2}$ AM 1.5 25^0C
Pmax	1000W
Vpmax	250 V
Ipmax	4.4 A
Tension maximale du système	600V

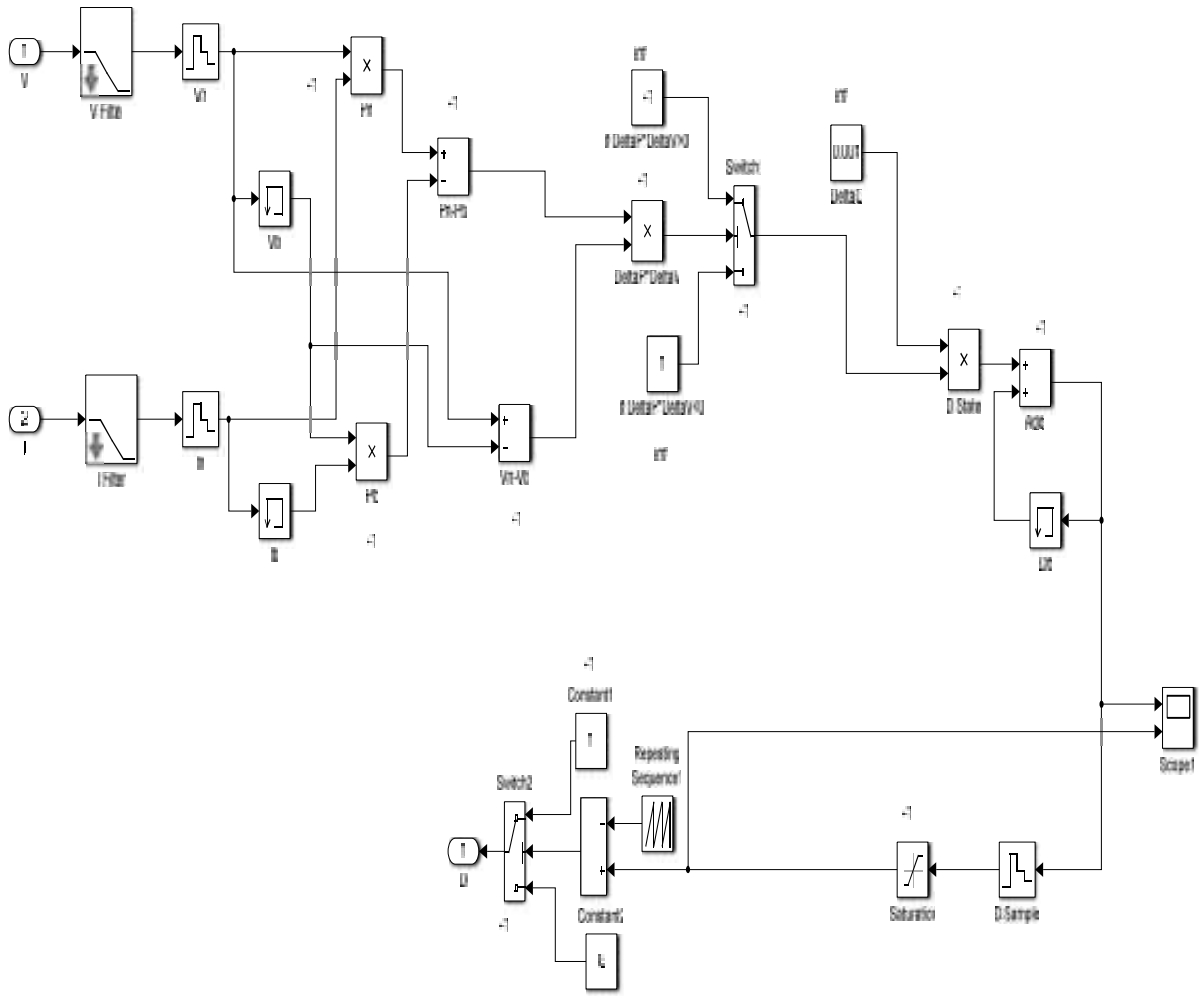
Schéma de simulation globale



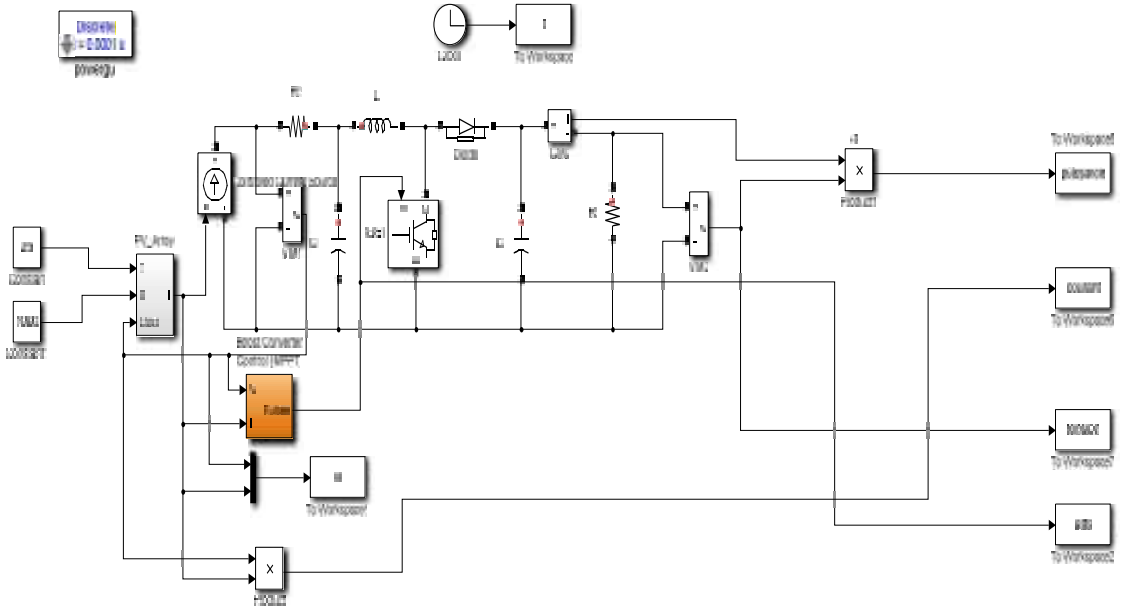
Le modèle PV


T
25
Tref
S
1000
Sref
Fcn
66
Uoc
Fcn1
54.2
Um
25.44
Isc
Fcn2
23.28
Im
Fcn3
Fcn4
Fcn5
Fcn6
Switch
Uout
Isc2

La commande MPPT



Le système avec le réseau de (neuro-floue) :



Block de commande neuro_Floue

