

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT  
En Électrotechnique  
**Option**  
**Réseaux électrique**

**MÉMOIRE**

**Contrôle de Tension d'un Système Photovoltaïque Connecté  
à un Réseau Local par Réseau de Neurones**

**Encadré par :**  
**MOHAMMEDI MESSAOUD**

**Présenté par :**  
**BOUGHAZALA HAMED Wafa**  
**HECHIFA AICHA**

**Promotion 2007**

## **Remerciement**

*Nous offrons notre remerciement premièrement et dernièrement à notre Dieu qui nous a fourni par l'aide et le succès afin d'achèner ce travail. Prière et salut pour le plus honorable messager le maître de la création notre prophète "Mohamed".*

*Nous remercions vivement et avec tout respect et reconnaissance :*

*Le professeur encadreur "Mohammedi Messaoud" Pour tous ce qui nous a fourni de conseils et instructions.*

*Le professeur compétente "Kawthar Dhif" à qui nous souhaitons La continuation de santé et du bonheur.*

*Le professeur respectueux, Monsieur "Chemssa Ali" que Dieu le Bénisse.*

*Le professeur R . Rouiha de sont inestimable contribution .*

*Le professeur du français à l'école privé "Planète Services " Monsieur "Abdelbaki benali" pour traduction.*

*Les collègues de la première promotion de mon spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelles,*

*Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté,*

*Remerciement spécial aux responsables du centre universitaire*

*D'El-Oued qui nous ont mis à notre disponibilité une salle d'informatique.*

*A tous ceux-là nous présentons nous remerciements et nos respect.*

*Boughazala Hamed Wafa et Hechifa Aicha*

## ***Dédicace***

*Je dédie fruit de mes efforts à :*

*Les plus chers personnes de ma vie*

*Mes parents généreux que bien éloge leur vie*

*Tout ce qui resurgit, dans mon âme, au symbole de la tendresse, et à l'offre à ma tendre mère qui a plaidé, le germe de connaissance dans mon cœur et désigné le chemin du succès ce qui à été mon exemple et mon soutien fort dans cette vie "mon cher père"*

*Mes chers frères : Sabah, Adel, Fatma, Amina, Abd elhake, Abdelgheffar, Abdessamia*

*À tout mes familles et relatives.*

*Ma collègue qui à performe ce travaille avec moi "Boughazala Hamed Wafa"*

*Atout mes amies Nasira, soumia, latifa, fatma.a, fatma.k, Djemaa, Abla, Zineb ,Fouzia, Messaouda*

*A'tous mes collègues dans ma promation : Halima, Fatma, Zohra, Mouna, Asmaa.*

*A'ceux-là je dédie ce travail modeste.*

*He chifa Aicha*

## ***Dédicace***

*Mes remerciement vont premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il ma donné durant durant toutes ces années d'études . Dieu, met le coran le printemps de mon cœur et la lumière de mon intérieur et la disparition de mon souci, Amen.*

*A la plus chère, et sincère personne dans ce monde entier, ma mère puis ma mère et encore ma mère.*

*Celui qui a illuminé ma vie m'a aidé pour arriver à ce niveau éducatif : Mon cher père que dieu le bénisse et lui donne plus de vie.*

*A tous ce qui m'ont conseillé et soutenu frères, et sœurs : Baha, Hatem, Haithem, Abdelfattah, Messaouda, Ahmed, Abdessamie, Abdelalim, Friha.*

*A tous ce qui ont allumé notre maison par leur lumière et qui ont designé un sourire,aux visage du membre de la famille, aux anges qui sont chères à mon cœur : Abdellatif, khalil, Dhia eldin, Abdelhamid, Mariam, Hakima,*

*A'toutes mes familles et relatives.*

*A' ma collègue compétente qui a achèné ce travail avec moi "Hechifa Aicha".*

*A' toute mes amies : Soumia, Latifa, Fatma.a, Fatma.k, Djemaa, Abla, Saiida, Luisa, Fouzia, Messaouda, Zaineb.*

*A tous mes collègues dans ma promotion : Halima, Fatma, Zohra, Mouna, Asmaa.*

*A ceux la je dédie ce modeste travail.*

*Boughazala Hamed Wafa*

# Sommaire

-Introduction générale.....	1
-----------------------------	---

## Chapitre 1

### Énergie solaire et Conversion photovoltaïque

-1.1. Introduction.....	4
-1.2. Énergie solaire.....	4
-1.2.1. Historique de l'énergie solaire.....	4
-1.2.2. Rayonnement solaire.....	4
-1.2.3. Caractéristique du rayonnement solaire.....	5
-1.2.3.1. Énergie renouvelable.....	5
-1.2.3.2. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	5
-1.2.3.3. Rayonnement solaire au niveau du sol.....	5
-1.2.3.4. Spectre solaire.....	6
-1.2.3.5. Mesure du rayonnement solaire.....	7
-1.3. Conversion photovoltaïque.....	8
-1.3.1. Le module photovoltaïque.....	10
-1.3.2. Caractéristique de la cellule.....	10
-1.3.2.1. Schéma équivalent.....	11
-1.3.2.2. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$ .....	12
-1.3.2.3. Caractéristique puissance-tension $P=f(V)$ .....	13
-1.3.2.4. Le rendement.....	14
-1.3.2.5. Facteur de forme.....	14
-1.3.2.6. Influence de l'éclairement.....	14
-1.3.2.7. Influence de la température.....	16
-1.3.2.8. La résistance série ( $R_s$ ).....	17
-1.3.2.9. La résistance shunt ( $R_{sh}$ ).....	18
-1.3.2.10. Groupement des cellules.....	18
-1.3.2.10.1. Groupement des cellules série.....	18

-1.3.2.10.2. Groupement des cellules en parallèles.....	18
-1.3.2.10.3. Groupement série -parallèles des modules.....	19
-1.4. Avantages du photovoltaïque.....	19
-1.5. Inconvénients du photovoltaïque.....	20
-1.6. Conclusion.....	20

## **Chapitre 2**

### **Application des systèmes photovoltaïques**

-2.1. Introduction.....	22
-2.2. Application de système photovoltaïque.....	22
-2.2.1. Système photovoltaïque non raccordé à un réseau.....	22
-2.2.1.1. L'éclairage.....	23
-2.2.1.1.1. L'éclairage domestique et communautaire.....	23
-2.2.1.1.2. Lampe portable.....	23
-2.2.1.1.3. L'éclairage public.....	24
-2.2.1.1.4. L'éclairage de signalisation.....	24
-2.2.1.2. Pompage photovoltaïque.....	24
-2.2.1.2.1. Le groupe électropompe.....	24
-2.2.1.2.2. Adaptation électrique des électropompes au photovoltaïque.....	25
-2.2.1.2.3. Différents systèmes de pompage.....	25
-2.2.1.3. Le froid.....	25
-2.2.1.4. Le télécommunication.....	26
-2.2.1.5. La recharge de Batterie.....	27
-2.2.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau.....	28
-2.2.2.1. Les centrales villageoises.....	29
-2.2.2.2. Les centrales reliées directement aux réseaux nationaux.....	29
-2.3. Description du système PV connecté au réseau étudié.....	30
-2.3.1. Générateur photovoltaïque.....	30

-2.3.2. Conversion continue/alternative.....	30
-2.3.3. Couplage au réseau.....	30
-2.4.Conclusion.....	31

### **Chapitre 3**

#### **Les Réseaux des Neurones**

-3.1. Introduction.....	34
-3.2. Historique.....	34
-3.3. Le neurone biologique.....	35
-3.3.1. Caractéristiques.....	36
-3.3.2. Structure.....	36
-3.4. Le Neurone formel (Artificiel).....	37
-3.5. Structure et Comportement du neurone artificiel.....	37
-3.6. Type de neurone artificiels.....	39
-3.6.1. Automates à seuil.....	39
-3.6.2. Automates continus.....	39
-3.7. fonctionnement.....	40
-3.7.1. L'état initiale.....	40
-3.7.2. Les modes de fonctionnement.....	40
-3.8. Réseau de neurones artificiels (RNA).....	40
-3.9. Structure général d'un réseau de neurones.....	41
-3.10. Architecteur du réseau.....	41
-3.10.1. Réseau multicouche.....	41
-3.10.2. Réseau à connexions locales.....	42
-3.10.3. Réseau à connexions récurrentes.....	42
-3.10.4. Réseau à connexion complète.....	43
-3.11. L'apprentissage.....	43

-3.11.1. Apprentissage supervisé.....	44
-3.11.2. Apprentissage non supervisé.....	44
-3.12. La Rétro-propagation.....	44
-3.13. Apprentissage d'un réseaux de neurones par rétro-propagation.....	44
-3.14. Utilisation des réseaux de neurones.....	47
-3.15. Domaine d'application.....	48
-3.16. Avantages des réseaux de neurones.....	48
-3.17. Inconvénients des réseaux de neurones.....	49
-3.18. Conclusion.....	49

## **Chapitre 4** simulation

-4.1.Introduction.....	51
-4.2. Choix du réseau de neurones appliqué.....	51
-4.3. Température fixe et éclairage variable.....	52
-4.3.1. La phase d'apprentissage.....	53
-4.3.2. La phase de reconnaissance .....	55
-4.4. Conclusion.....	59
-Conclusion générale.....	60
-Annexe.....	61
-Bibliographies.....	62

## NOMENCLATURE

$E$ : l' éclairement solaire	(W/m <sup>2</sup> )
$I$ : courant de sortie du générateur photovoltaïque	(A)
$V$ : tension de sortie du générateur photovoltaïque	(V)
$R_s$ : résistance série du générateur	(Ω)
$R_{sh}$ : résistance shunt du générateur	(Ω)
$I_d$ : courant direct sous obscurité de la jonction	(A)
$U$ : tension imposée à la diode	(V)
$U_t$ : tension thermique	(V)
$k$ : coefficient de Boltzmann	(j/°K)
$q$ : charge de l'électron	(coulomb)
$A$ : facteur de compilation	(coulomb/j)
$T$ : température absolue	(°K)
$T_c$ : température de la cellule	(°C)
$I_s$ : courant de saturation de la diode	(A)
$I_p$ : photo-courant	(A)
$I_{cc}$ : courant du court-circuit du générateur	(A)
$U_{co}$ : tension a circuit ouvert	(V)
$N_s$ : nombre de module en série	
$N_p$ : nombre de module en parallèle	
$V_{th}$ : tension thermique	(V)
$I_0$ : le courant d'obscurité	(A)
$V_{op}$ : tension optimale	(V)
$I_{op}$ : courant optimale	(A)
$V_{oc}$ : tension à circuit ouvert	(V)
$T_{ref}$ : la température référence	(°C)
$E_{ref}$ : l'éclairement référence	(W/m <sup>2</sup> )
$\alpha$ : coefficient de variation du courant en fonction de la température	(%/°c)
$\beta$ : coefficient de variation de la tension en fonction de la température	(%/°c)
$V_{ref}$ : la tension référence	(V)

$I_{ref}$ : le courant référence	(A)
$P_{op}$ : puissance optimale	(W)
$P_{max}$ : puissance maximal du générateur photovoltaïque	(W)
$\eta$ : le rendement du module solaire	(%)
$A$ : la surface effective du module	(m <sup>2</sup> )
$V_{con}$ : la tension simple de sortie du convertisseur à côté du réseau	(V)
$P_{pv}$ : La puissance du générateur photovoltaïque	(V)
$\alpha_i$ : angle de commande	
$\alpha$ : angle d'amorçage	(°)
$V_i$ : la tension simple d'entrée du convertisseur au côté du réseau électrique	(V)
$V_r$ : la tension de réseaux par phase	(V)
$I_{pv}$ : le courant du générateur photovoltaïque	(A)
$w_{ij}^h$ : les poids de la connexion de $i^{eme}$ neurone d'entrée	
$\theta_j^h$ : les biais des neurones de la couche cachée	
$\theta_k^o$ : représentent les biais des neurones de la couche de sortie	
$y_k^0$ : la sortie des neurones dans la couche de sortie	
$Err$ : l'erreur absolue entre la puissance d'apprentissage et la puissance désirée	
$Err(\%)$ : l'erreur relative d'apprentissage	

## ***Introduction générale***

*Les développements globaux récents semblent à garantir un marché vierge pour l'énergie renouvelable. Parmi plusieurs sources d'énergie renouvelable actuellement explorées, les systèmes photovoltaïques semblent être prometteurs en raison de leur nature propre dans l'environnement et de l'avantage de la conversion directe en énergie électrique. Naturellement, le soleil est la source primaire originale de la plupart des autres ressources des énergies renouvelables: de vent, de vague, hydroélectrique, biomasse, géothermique... etc. Le soleil fournit déjà presque toute l'énergie pour subvenir aux besoins de la vie comme nous le savons. En moyenne, la terre reçoit environ de  $1.2 \times 10^{17} \text{W}$  d'énergie solaire. Le défi pendant un futur soutenable doit exploiter une fraction minuscule de cette énergie pour assurer les demandes modestes des activités humaines.*

*Les laboratoires 'Bell' étaient les pionniers de la première pile solaire efficace. Etant rapportée en 1954, elle a attiré les titres en premières des journaux; le New York Times a écrit sur la première page "une vaste énergie du soleil est captée par une batterie". Depuis cette époque, beaucoup d'efforts ont été déployés pour rendre cette tâche vraie. L'utilisation croissante de ces cellules solaires est liée aux facteurs économiques, d'efficacité et de fiabilité. Les progrès récents en technologies des semi-conducteurs ont donné un lancement à l'attraction des cellules solaires avec un rendement élevé disponible. Bien que le prix soit encore élevé en comparaison avec d'autres ressources d'énergies renouvelables, les cellules solaires ont des avantages en termes de fiabilité à long terme, d'entretien, et d'influence environnementale et sociale minimale. La production photovoltaïque de module a ainsi monté de façon constante depuis les années 70 (une décennie de la crise d'énergie), et a excédé 24MW vers la fin du dernier siècle. L'électricité solaire devient un fait dans le monde.*

*Les régions isolées, où la connexion au réseau d'électricité est fortement chère, ont trouvé dans l'électricité solaire une excellente solution à leurs besoins. Dans les pays développés, c'est devenu une autre source d'énergie alternative et elle est appliquée dans l'électrification résidentielle, la réfrigération et la climatisation aussi bien que les petites industries alimentaires, agricoles et services de santé. Dans certains cas, où la puissance développée excède la demande, l'électricité est envoyée au réseau électrique, ce qui exige de nouveaux règlements et normes à formuler.*

*De nos jours, le prix principal d'installation des cellules solaires est encore élevé (avec l'absence de support gouvernemental dans la plupart des pays), donc, on doit correctement*

*classer et optimiser l'exploitation du système. Beaucoup de travaux de recherches se concentrent sur l'utilisation optimale des générateurs photovoltaïques, qui constituent 60-80% du prix du système, selon que des moyens de stockage étaient employés ou pas. Les systèmes PV peuvent fonctionner en station seule, hybride ou systèmes reliés au réseau. Les systèmes autonomes ont trouvé une large application dans les régions éloignées.*

*Les systèmes PV connectés au réseau ont un rôle important parce qu'ils fournissent une énergie alternative afin d'utiliser des appareils électriques récepteurs de grande diffusion. Ces systèmes peuvent être reliés à un réseau local ou interconnectés ou réinjectent le courant qu'ils produisent sur un réseau national sans avoir besoin de le stocker.*

*Le problème qui se pose toujours, comment faire fonctionner le système PV pour qu'il fournisse sa puissance maximale? Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques étaient appliqués, et des techniques suivies pour avoir une adaptation et un rendement élevé. La méthode de MPPT (Maximum Power Point Tracking) rentre en compte ici, elle fait appel à plusieurs techniques, soit celles traditionnelles ou celles basées sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones, la logique floue, le neurone- flou et les algorithmes génétiques.*

*Le présent travail consiste à étudier la liaison d'un système photovoltaïque à un réseau électrique urbain à travers une liaison CC/CA. Dans ce cas, l'énergie PV générée est injectée directement au réseau tout en assurant un fonctionnement optimal du GPV en utilisant un contrôleur à base de réseaux de neurones.*

*Dans le premier chapitre, on a donné un aperçu sur la conversion photovoltaïque ainsi que les caractéristiques des modules et générateurs photovoltaïques. Le deuxième chapitre est consacré aux différentes applications des systèmes photovoltaïques. Le troisième présente une introduction aux réseaux de neurones et leurs différents types.*

*Enfin le dernier chapitre expose la simulation et les interprétations des résultats obtenus qui permettent de mettre en évidence l'efficacité du réseau de neurones utilisé pour ce système, le tout est suivi par une conclusion générale.*

## **-1.1. Introduction**

Nous allons, dans ce qui suit, aborder le cœur du phénomène photovoltaïque : la conversion de la lumière en électricité.

Le mot «photovoltaïque» vient du grec «photos» qui signifie lumière et de «Volta» le nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est le Savant français, Antoine Becquerel qui, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie: la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière [16].

## **-1.2. L'énergie solaire**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil [10].

### **-1.2.1. Historique de l'énergie solaire**

- Socrate (470-399 avant JC), philosophe grec qui a enseigné la construction bioclimatique (entre autres choses).
- Lorsque Syracuse fut assiégée par la flotte romaine, en 209 avant JC, pendant la deuxième guerre punique, on attribue à Archimède (en 287-212 avant JC) l'invention d'un moyen d'incendier les navires ennemis en concentrant sur eux les rayons du soleil grâce à un jeu de miroirs.
- Antoine Becquerel (1788-1878) inventa la pile photovoltaïque en 1839.
- Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), chimiste, il inventa un four solaire utilisant des lentilles convergentes afin de fondre des métaux sans la pollution des combustibles.
- Horace Bénédict de Saussure (1740-1799), physicien suisse, inventa la "boîte chaude" en 1767 afin de démontrer l'effet de serre. Il est considéré comme le précurseur du capteur solaire plan.
- Charles Vernon Boys (1855-1944), physicien anglais, inventa un capteur cylindro-parabolique, qui a été mis en oeuvre pour la première fois en 1912.
- Félix Trombe (1906-1985), chimiste français qui a fait construire des fours solaire à Mont Louis et à Odeillo dans les Pyrénées, comme laboratoires du CNRS. Il a développé les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le "mur Trombe" [37].

### **-1.2.2. Rayonnement solaire**

Le soleil reste jusqu'à présente la plus importante source d'énergie Malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ( $150 * 10^6$  de kilomètres). La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimé à  $390 * 10^{15}$ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à

recevoir que  $180 \cdot 10^6 \text{GW}$  [23], [31], [4]. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte  $1 \text{kW/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires [23].

### **-1.2.3. Caractéristique rayonnement solaire**

Il y a cinq caractéristiques de rayonnement solaire :

#### **-1.2.3.1. Énergie renouvelable**

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, de pétrole et de charbon [1], [6].

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons + 2 neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétique (lumière) [6].

#### **-1.2.3.2. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire**

Sur la surface terrestre, le rayonnement solaire subit des modifications considérables [2], dues principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causés par les aérosols (poussière de diverses origines), ainsi que par les molécules d'eau et différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc) présents dans la couche atmosphère enveloppante [4], [2].

#### **-1.2.3.3. Rayonnement solaire au niveau du sol**

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, l'autre sera diffusé. Une autre composante du rayonnement est mise en évidence, c'est la partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol. Cette partie s'appelle l'ALBEDO, et qui varie en fonction du sol et de son état [2], [4].

- **Rayonnement global**

C'est l'énergie du soleil reçue par une surface horizontale, elle est la somme des deux rayonnements relatifs des rayonnements directs et diffus [23], [2].

- **Rayonnement direct**

C'est l'ensemble des rayonnements solaires parallèles qui produisent de l'énergie venant, directement du soleil vers la terre plus au moins alterné. (Par la diffusion ou l'absorption) [23], et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire [2].

- **Rayonnement diffus**

C'est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère [2]. Il provient d'une manière isotrope de toutes les directions de l'espace, lui même, il est décomposé en : diffus (provenant du ciel, provenant du sol, provenant de la rétro- diffusion du sol) [23].

#### -1.2.3.4. Spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou (couleurs). La lumière du soleil est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisés par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde [6].

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E$ , qui répond elle même à la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où  $h$  est la constante de plank,  $\nu$  la fréquence,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde [13].

C'est cette relation, mise à jour par Louis de broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière: présence de corpuscules –les photons -et propagation d'onde avec une fréquence de vibration et unlongueur d'onde. Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillites par les satellites, est désignée sous le nom de *AMO*. Sa distribution en énergie est répartie comme suit [6].

- Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$  6.4 %
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  48.0 %
- Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45.6 %

La figure 1.1, montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de  $48^\circ$  au niveau de la mer. La définition de ce spectre de ciel clair, noté *AM1.5*, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. On peut également remarquer le spectre du diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de la diffusion de Rayleigh sur l'air [1], [6].

On voit clairement sur le spectre *AM 1.5* les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau. Est représenté aussi sur la figure 1.1, le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5900k, très proche spectre solaire *AM0*. Le soleil est donc souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement [6].

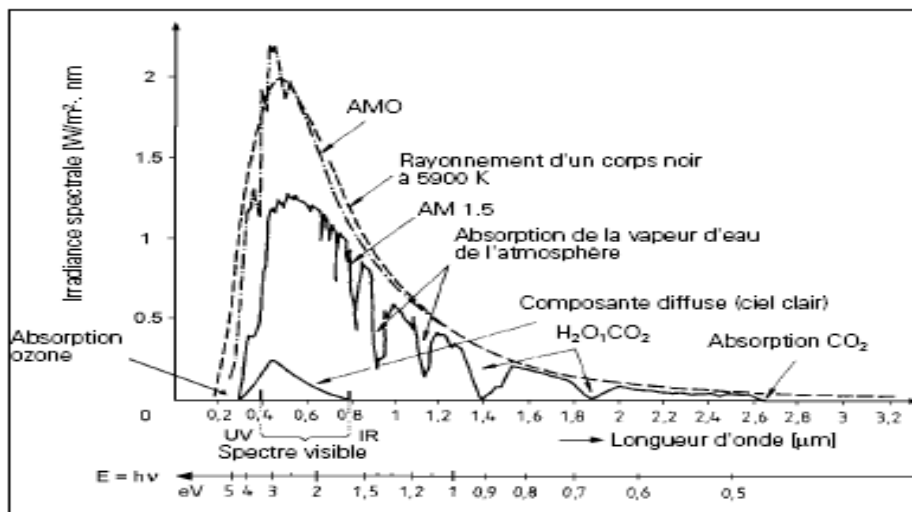


Figure 1.1 : spectre du rayonnement solaire: *AM0* (extraterrestre) et *AM1.5* (épaisseur de 1.5 atmosphère, correspondant à une hauteur du soleil de  $48^\circ$  au niveau de la mer) [1], [6]

### -1.2.3.5. Mesure du rayonnement solaire

Comme il est indispensable d'estimer et mesurer l'éclairement solaire dans les régions d'intérêt, un ensemble d'appareils de mesure sont mis au point et dont on cite les plus utilisés [4]:

- **Le pyranomètre**

Cet appareil est utilisé pour la mesure du rayonnement global et diffus. Dans le premier cas, on mesure le rayonnement incident sur une surface horizontale, et dont le spectre se situe approximativement entre  $0.3 \mu m$  et  $3 \mu m$  (lumière visible et proche – infrarouge); Parcontre dans le deuxième cas, la surface réceptrice se compose de deux anneaux concentriques en argent. L’anneau intérieur est recouvert de noir, celui de l’extérieur est recouvert de blanc. La différence de température entre ces anneaux, mesurée par des thermocouples est proportionnelle au flux lumineux incident. Ce type d’instrument possède une grande sensibilité telle que la tension de sortie pour l’éclairement maximal de l’ordre du millivolt [2], [4].

- **L’héliographe**

Cet instrument mesure la durée d’ensoleillement journalière. L’instrument actuel enregistre l’irradiation au dessus d’un seuil de  $210W/m^2$  (soit un -cinquième du maximum possible), et dont le plus répandue est celui de CAMPBELL –STOCKES. Il se compose d’une sphère en verre d’environ 10cm de diamètre permettant les rayons solaires sur une bande de carton bleu foncé, où le rayonnement laisse une trace de brûlure [4], [2].

- **Les pyrhéliomètres**

mesurent le rayonnement solaire direct (c’est-à-dire le rayonnement d’une petite partie du ciel contenant tout le soleil) en incidence normale.

- **Les pyrradiomètres**

mesurent le rayonnement total (de grande comme de courte longueur d’ondes) provenant d’un angle solide  $2 \pi$  [40].

### **-1.3. Conversion photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques sont généralement a base de silicium, reliées entre elles, elles constituent des modules ou panneaux solaires, qui transforment directement la lumière du rayonnement solaire en énergie électrique [10] environ 15% de l’énergie solaire reçue, comme l’indique la figure 1.2.

Un panneau de  $1m^2$  permet de fournir une puissance de 100W et peut produire 80 à 150kWh/an. Les panneaux sont connectés à un récepteur et produisent de l’électricité selon le niveau d’ensoleillement. Leurs performances électriques sont garanties pendant 25 ans pour répondre à la demande en électricité, les panneaux peuvent être assemblés et interconnectés,

constituant alors un "champs PV" 20 à 30m<sup>2</sup> de panneaux sont à même de satisfaire les besoins en électricité d'un foyer d'Europe du sud.

Les cellules photovoltaïque sont utilisées pour la production d'électricité, une énergie de haute qualité. Cependant, leur rendement est bien inférieur à celui des capteurs solaires thermiques.

Les sources d'énergie exercent la pression la plus forte sur l'environnement.

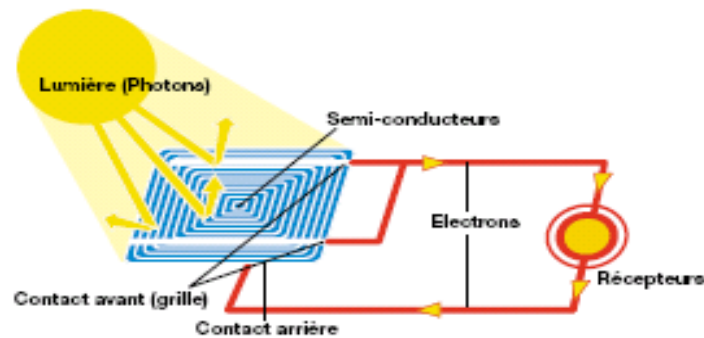


Figure 1.2 : la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique [28]

Les cellules photovoltaïques au silicium consistent en deux couches dopées, de caractéristiques électriques opposées. Dans la zone de charge d'espace (barrière n-p), les électrons "détachés" par la lumière et les "trous" sont poussés dans des directions opposées, générant ainsi une tension électrique continue de l'ordre de 0.6V des couches conductrices ou des bandes de contact sur les faces frontale et arrière permettent de recueillir le courant électrique et de l'utiliser. Les cellules solaires délivrent une tension continue. Elles ont les propriétés suivantes:

- La tension est pratiquement constante et, de plus, presque indépendante de l'irradiation solaire (intensité du rayonnement).
- La puissance électrique augmente proportionnellement avec la puissance du rayonnement.

Pour caractériser la puissance des cellules photovoltaïques, on indique leur puissance de crête en  $W_c$  (en anglais  $W_p$  :  $p=peak$ ). Cette valeur indique la puissance délivrée par le champ des cellules solaires lorsqu'elles sont exposées à un rayonnement incident de 1000W/m<sup>2</sup> pour une température de cellule de 25°C.

Selon des considérations théoriques, les cellules solaires devraient pouvoir atteindre en laboratoire un rendement d'environ 40%. Il en va, aujourd'hui encore, autrement dans la pratique [44].

On distingue: le silicium polycristallin le silicium monocristallin, plus efficace et plus onéreux. Le silicium amorphe, moins cher, destiné à des usages autonomes et de petites puissances [10].

### -1.3.1. Le module photovoltaïque

Le «module» photovoltaïque et par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension: entre 0.5 et 1.5V selon les technologies. Il faut donc toujours disposer de plusieurs photopiles en série pour obtenir une tension utilisable [16].

### -1.3.2. Caractéristique de la cellule

Pour déterminer la caractéristique de la cellule solaire, on part de la caractéristique d'une diode au silicium (jonction p-n dans l'obscurité), qui s'écrit :

$$I = I_s \left[ \exp\left[\frac{u}{u_t}\right] - 1 \right] \quad (1.2)$$

Avec :

$U$  : tension imposée à la diode

$U_t = kT/q = 24 \text{ mV}$  à  $300 \text{ K}^\circ$

$K$  : coefficient de Boltzmann

$q = 1.602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron

$T$  : température absolue en  $\text{K}^\circ$

$I_s$  : courant de saturation de la diode.

En illumination, cette relation devient :

$$I = I_p - I_s \left( \exp\left[\frac{u}{u_t}\right] - 1 \right) \quad (1.3)$$

Avec :

$I_p$  : photocourant.

A l'aide de cette équation, on peut quantifier les paramètres suivants :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , c'est la valeur du courant lorsque la tension  $U=0$  [16]. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle,  $R_{sh}$  infinie) ce courant se confond avec le photo-courant  $I_p$ . Dans le cas contraire, en annulant la tension. Il vaut :  $I_{cc}=I_p$  Pour le silicium  $I_{cc}=30\text{mA}/\text{cm}^2$  pour un éclairage maximal [12]. Et la tension de circuit ouvert,  $U_{co}$ , lorsque le courant est nul [16], Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à :

$$U_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_p}{I_s}\right) \quad (1.4)$$

Si  $I_p \gg I_s$ , la tension de circuit ouvert sera :

$$U_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_s}\right) \quad (1.5)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert  $U_{co}$  est de 0.55 à 0.6 V [12].

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de  $I_p$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température  $\frac{kT}{q}$ . En effet, le courant de saturation,  $I_s$ , dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction: il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $\frac{kT}{q}$ . Donc la tension de circuit ouvert  $U_{co}$  baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

On peut compléter le schéma équivalent de la cellule solaire en ajoutant deux résistances pour tenir compte des pertes internes.  $R_s$  représente la résistance série qui tient compte des pertes ohmiques du matériau, des métallisations et du contact métal/semi-conducteur,  $R_{sh}$  représente une résistance parallèle (ou résistance de fuite).

L'équation de la caractéristique courant- tension devient alors [16] :

$$I = I_p - I_s \left[ \exp\left[\frac{q(U + I.R_s)}{kT}\right] - 1 \right] - \frac{U + I.R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

### -1.3.2.1. Schéma équivalent

Le schéma d'une cellule solaire est représenté sur la (Figure 1.3). Sous un éclairement, la caractéristique d'une cellule peut être représentée par les relations suivantes [2].

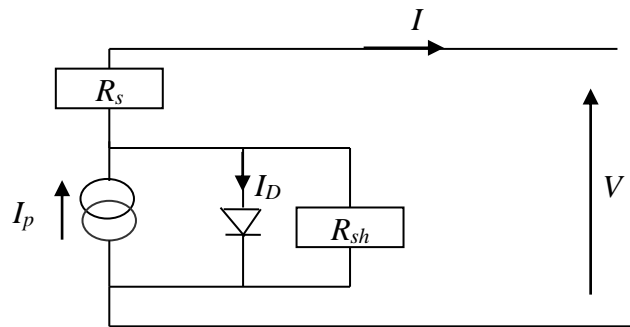


Figure 1.3 : schéma équivalent d'une cellule solaire

- **Modélisation du générateur photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est une matrice formée de  $N_s$  module en série et  $N_p$  rangées en parallèle. La caractéristique  $I$ - $V$  peut être décrite par une équation non linéaire de la forme implicite :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[ \exp\left[\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_{th}}\right] - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

Pour les modules ou  $R_{sh}$  est supposées infinie, l'équation (1.7) se réduit a :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[ \exp\left[\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_{th}}\right] - 1 \right] \quad (1.8)$$

L'identification de l'équation nécessite trois points de mesure dits :

- Le point de court-circuit ( $I_{cc}, 0$ ).
- Le point de circuit ouvert ( $0, V_{oc}$ ).
- Le point optimum ( $I_{op}, V_{op}$ ).

La tension thermique  $V_{th}$  et le courant d'obscurité  $I_0$  sont respectivement identifiés par [16] :

$$V_{th} = \frac{(V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc})}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right)} \quad \text{et} \quad I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp\left[1 - \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}}\right] \quad (1.9)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (1.10)$$

$$\Delta T = \alpha \left( \frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left( \frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (1.11)$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (1.12)$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (1.13)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (1.14)$$

### -1.3.2.2. Caractéristique courant-tension $I=f(V)$

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P- N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement [23], [16]. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante. Elle est construite point par point et par voie expérimentale [23].

La figure 1.4, présente le fonctionnement du module. Il est caractérisé essentiellement par trois zones :

1. Zone a-b : le module fonctionne comme générateur de tension.
2. Zone b-d : zone préférée pour le fonctionnement optimal défini par le courant  $I_{op}$  et la tension  $V_{op}$ , où le module délivre sa puissance maximale (point c).

$$P_{op} = I_{op} \cdot V_{op} \quad (1.15)$$

3. Zone b-e : le module fonctionne comme générateur de courant [23].

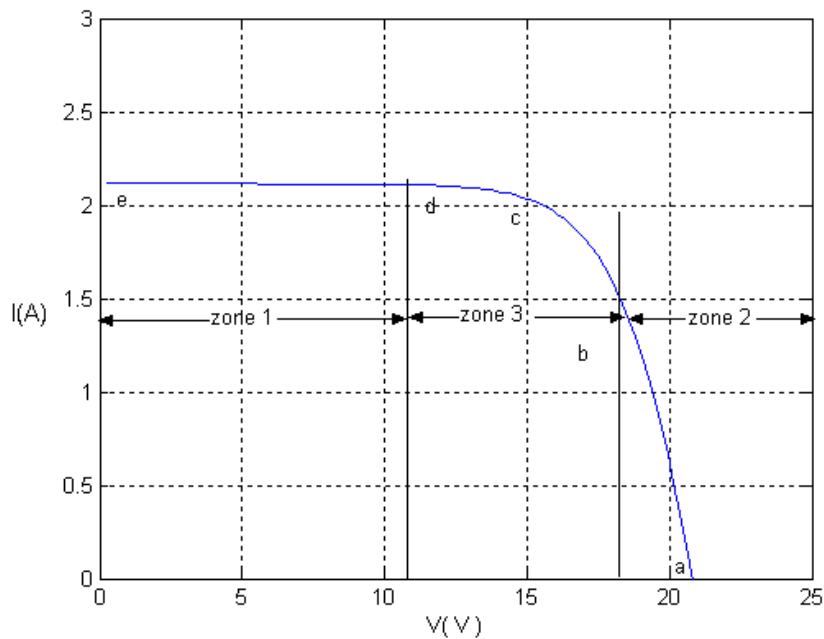


Figure 1.4 : caractéristique  $I=f(V)$  du module solaire

### -1.3.2.3. Caractéristique puissance-tension $P=f(V)$

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement [3]. Puissance débitée par le module dépend de point fonctionnement. Le point  $M$  représente la puissance maximal par le module qui est donnée par [2]

$$P_{max} = I_{op} \cdot V_{op} \quad (1.16)$$

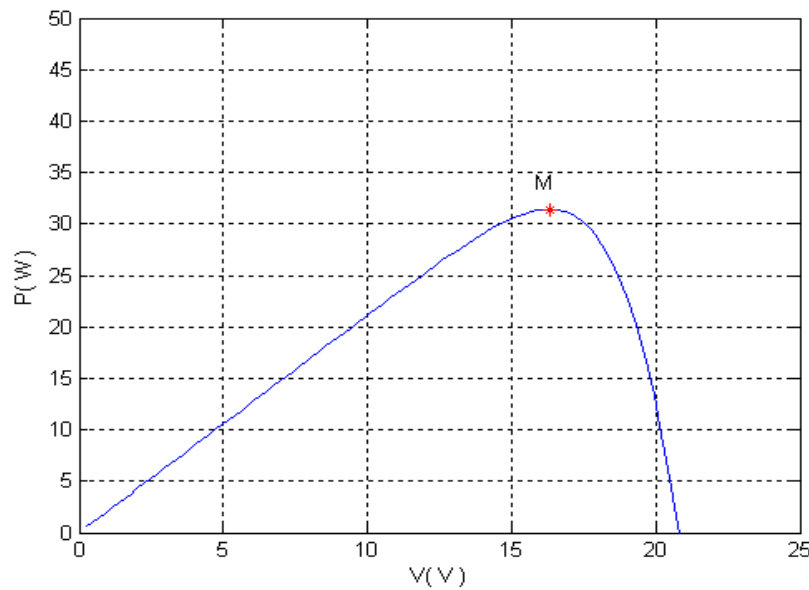


Figure 1.5 : caractéristique puissance – tension

#### -1.3.2.4. Le rendement

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement d'incident [2]

$$\eta = \frac{P_{op}}{E.A} \quad (1.17)$$

Où :

$E$  : l'éclairement solaire ( $W/m^2$ ).

$A$  : la surface effective du module ( $m^2$ ).

#### -1.3.2.5. Facteur de forme

C'est un facteur de performance du module solaire. Plus ce facteur s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures [16], [2]. Il compare la puissance maximale  $P_{op}$  délivrée au produit du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert [23], [16] :

$$FF = \frac{V_{op} \cdot I_{op}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (1.18)$$

#### -1.3.2.6. Influence de l'éclaiement

L'augmentation du flux lumineux se traduit en somme par le déplacement de la caractéristique suivant l'axe des courants. En effet l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'accroissement de la tension du circuit ouvert car le courant de court-circuit est une fonction logarithmique [16], [2], [23].

Ce faisceau de courbes se trace à température constante, et est illustré un tracé correspondant à une température  $T_c = 25^\circ\text{C}$  comme l'indique les figures 1.6 et 1.7 [2].

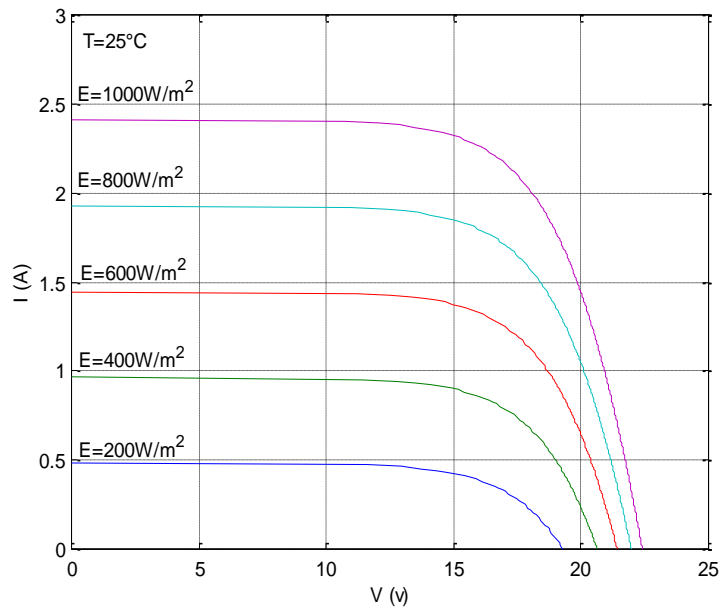


Figure 1.6 : effet de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$  du générateur PV

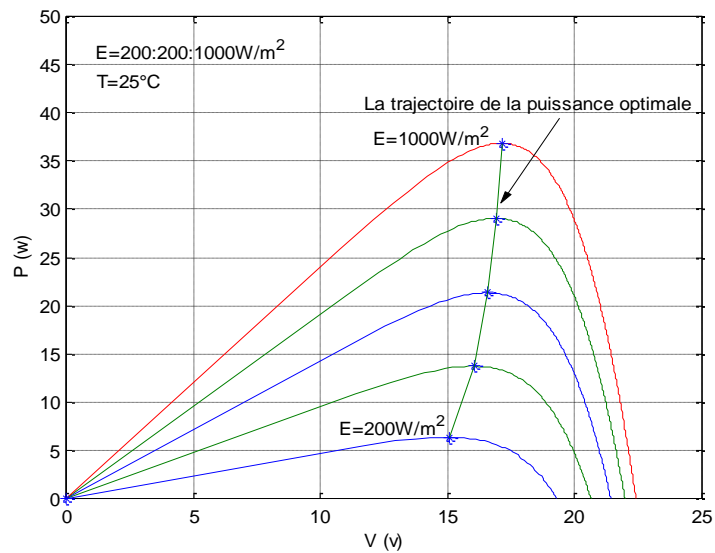


Figure 1.7 : effet de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  du générateur PV

### -1.3.2.7. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de  $3 \cdot 10^{-2}$  mA/k par  $\text{cm}^2$  de cellule. Il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert  $U_{co}$ . Cette diminution est de l'ordre de 2mV par degré. L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-5}$  W/K par  $\text{cm}^2$  de cellule, soit une variation de 0.35% par degré [12].

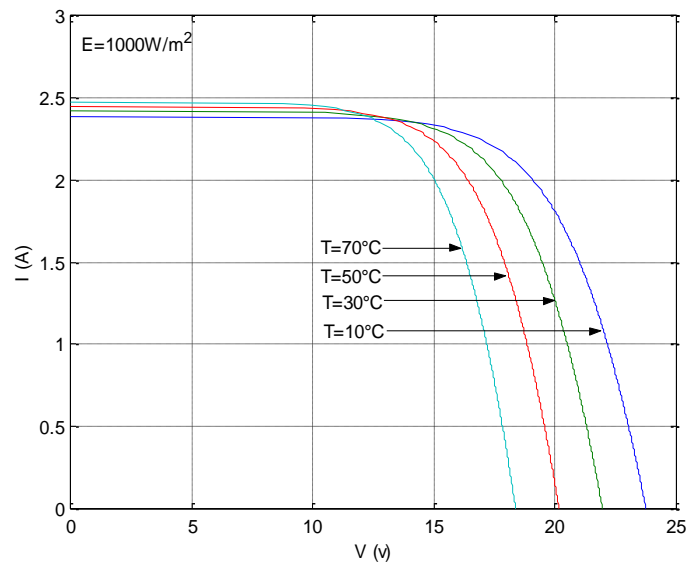


Figure 1. 8 : effet de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$  du générateur PV

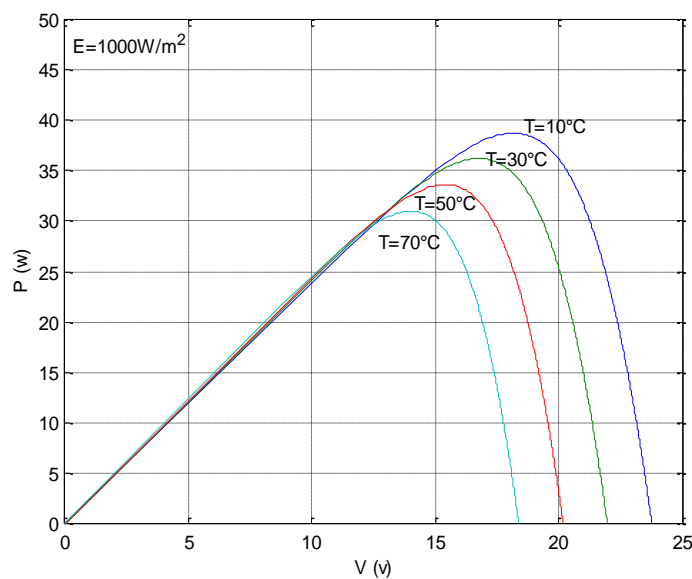


Figure 1.9 : effet de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  du générateur PV

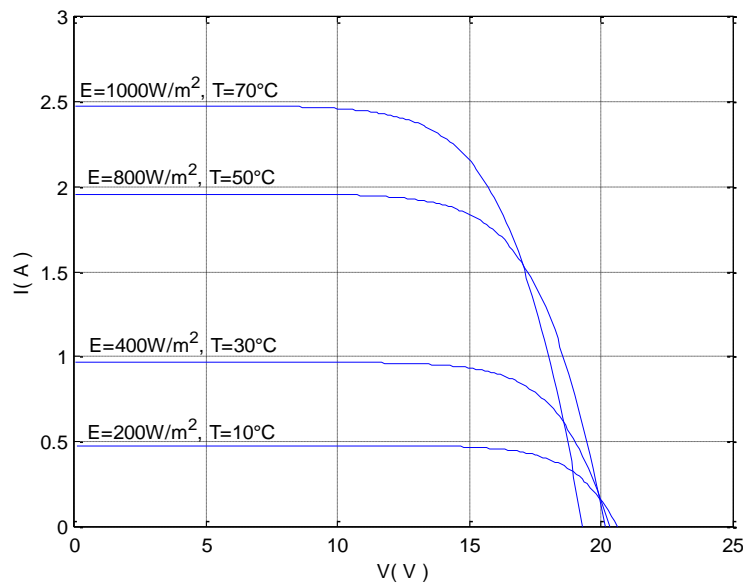


Figure 1.10 : effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$  du générateur PV

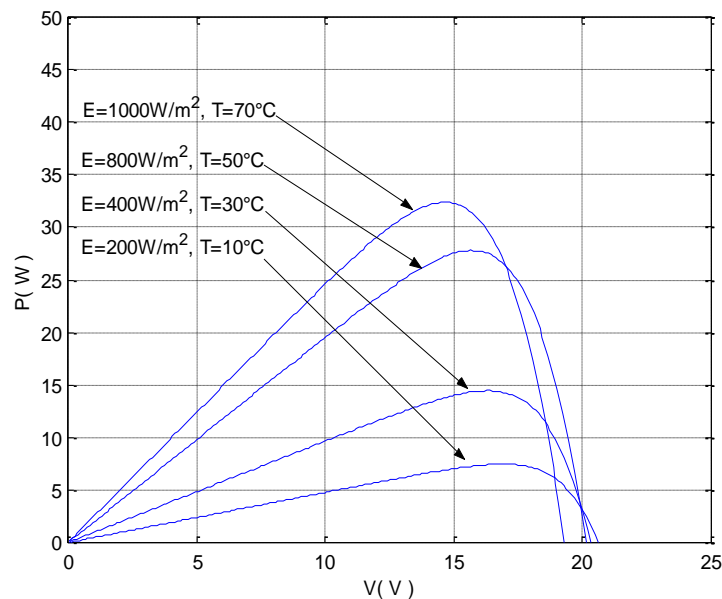


Figure 1.11 : effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  du générateur PV

### -1.3.2.8. La résistance série ( $R_s$ )

L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule photovoltaïque se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I = f(V)$  dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule [12].

### -1.3.2.9. La résistance shunt ( $R_{sh}$ )

Elle caractérise le courant de fuite entre les contacts arrière et la grille, La puissance fournie par la cellule solaire dépend de la valeur de sa résistance parallèle car plus ( $R_{sh}$ ) est élevée, la puissance fournie est importante [23].

### -1.3.2.10. Groupement des cellules

On peut monter les cellules ou les modules photovoltaïques identiques selon trois types de groupements : en série, en parallèle et en série - parallèle.

#### -1.3.2.10.1. Groupement des cellules série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, la figure 1.12, montre que le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [11].

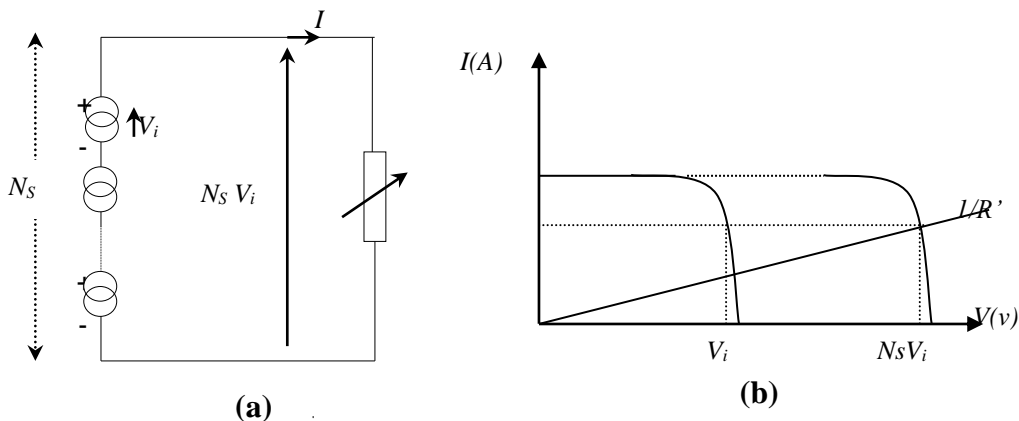
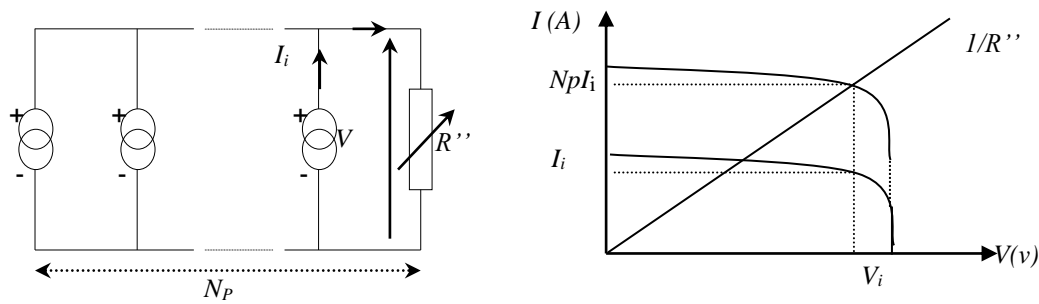


Figure 1.12 : schéma de connexion des cellules solaires en série [a] et  $I=f(V)$ , résultant [b], [7]

#### -1.3.2.10.2. Groupement des cellules en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la figure 1.13, montre que la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle [11].



(a) Figure 1.13 : schéma de connexion des cellules solaires en parallèles [a] et caractéristique  $I=f(V)$  résultant [b], [7]

### -1.3.3.10.3. Groupement série -parallèles des modules

Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre (10 à 80W). Pour obtenir des puissances supérieures il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules, la courbe de fonctionnement d'une association série -parallèle de modules est une courbe semblable à la courbe de la cellule de base, avec bien entendu des paramètres électriques élevés. Notons ici que, de même pour les cellules, il ne faudra associer en série et en parallèle que des modules identiques [23].

## -1.4. Avantages du photovoltaïque

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- D'abord, une haute fiabilité : elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées; c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli Watt au MégaWatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5], [9].

## -1.5. Inconvénients du photovoltaïque

Le système photovoltaïque présente toutefois des 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 à la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [9], [5].

## -1.6. Conclusion

Le courant solaire généré alors est donc forcément différent de  $I_{pmax}$  et la puissance solaire extraite du panneau photovoltaïque n'est pas égale à la puissance maximale. Ceci reste toujours vrai, même si l'ensoleillement est de  $1000\text{W/m}^2$  et la température des cellules de  $25^\circ\text{C}$  (conditions STC). Cette propriété intrinsèque de l'association batteries-panneaux solaires photovoltaïques fait qu'on parle de modules 12 V.

Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photocourant et du courant de diode à l'obscurité il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures. Une élévation de la température (de jonction) des cellules solaires provoque un important accroissement de leur courant à l'obscurité et facilite une légère augmentation de la création de paires électron-trou. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photocourant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une légère augmentation du courant  $I_{cc}$  accompagnée d'une forte diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  vers les puissances inférieures.

## **-2.1. Introduction**

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un panneau PV commercialisé peut être directement connecté à une charge de type batterie. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continus délivrés par le générateur. Une connexion indirecte entre la charge et le générateur par l'intermédiaire d'un convertisseur statique est parfois nécessaire [13].

On trouve deux grandes familles d'applications :

- Les générateurs autonomes pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité.
- Les centrales photovoltaïques connectées au réseau [35].

Les applications les plus courantes sont l'éclairage, le pompage d'eau, l'alimentation électrique, des petites appareils électroménager (ex : TV) et l'alimentation des appareils de production (ex : machine à coudre).

## **-2.2. Applications de système photovoltaïque**

### **-2.2.1. Systèmes photovoltaïques non raccordé à un réseau**

Un système photovoltaïque non raccordé au réseau permet d'électrifier et d'alimenter tous les appareils électriques des habitations éloignées du réseau de distribution d'électricité, pour les quelles une extension du réseau serait très coûteuse. Pendant la journée, les modules photovoltaïques produisent l'électricité. Celle-ci est ensuite soit utilisée directement, soit stockée dans un parc de batteries d'accumulateurs pour que l'utilisateur puisse avoir de l'électricité le soir ou quand le ciel est nuageux [38].

Dans ces systèmes hors réseau, l'énergie solaire captée par les modules est utilisée aux différentes applications tels que : l'éclairage, le pompage, la réfrigération, les télécommunications, les systèmes de recharges des batteries et quelques autres applications.

### **-2.2.1.1. L'éclairage**

Il existe principalement quatre types de luminaires adaptables à l'électricité photovoltaïque : le tube fluorescent, l'ampoule halogène, l'ampoule au sodium basse pression et l'ampoule à incandescence.

Grandeurs caractéristiques d'un luminaire :

- Le flux lumineux en lumen (*lm*).
- La puissance électrique (W).
- Le rendement lumineux (V).
- La tension d'alimentation (V).

Il y a quatre grands types d'Applications auxquelles vont correspondre des systèmes de conception différente : l'éclairage domestique (maison) et communautaire (dispensaire, école, église et mosquée), l'éclairage mobile (lampe portable), l'éclairage public (espace public extérieur, site isolé, hangars), l'éclairage de signalisation (balisage aérien, maritime, signalisation routière) [32].

#### **-2.2.1.1.1. L'éclairage domestique et communautaire**

En général un système d'éclairage classique est conçu pour permettre le repérage et la lecture dans une ou plusieurs pièces. Les luminaires utilisés sont de type fluorescent et leur nombre peut varier de trois à une dizaine pour un système de base. Au – delà de ce nombre, ou s'il y a plusieurs bâtiments, on utilisera plusieurs systèmes séparés.

Ces systèmes photovoltaïques d'éclairage sont disponibles soit sous forme de système "clés en main" (installation par un personnel spécialisé), soit sous forme de kits (installation possible par un personnel non spécialisé), le nombre et la puissance des luminaires dépendent des utilisations et des habitudes [32].

#### **-2.2.1.1.2. Lampe portable**

Les lampes portables photovoltaïques ont été imaginées pour remplacer les lampes classiques à pétrole ou à gaz. Elles doivent rendre un service identique voire meilleur. Le luminaire qui constitue l'ensemble "lampe solaire portable" est de type fluorescent. Le module solaire est généralement séparé de la lampe. Il peut être fixé sur un support (toit). Cependant certaines lampes intègrent le module dans un même boîtier : le luminaire devra alors rester sous le soleil pendant la charge. Ce montage est toutefois intéressant dans un contexte de nomadisme.

Il existe aussi des ensembles communautaires qui comprennent un module plus puissant (50Wc) et qui permet la recharge de plusieurs lampes (6 à 8) [32].

#### **-2.2.1.1.3. L'éclairage public**

Les systèmes d'éclairage public sont conçus pour l'éclairage nocturne extérieur. Ils réalisent essentiellement une fonction de repérage. Le luminaire utilisé est de type sodium basse pression et est installé sur un lampadaire. Il permet l'éclairage d'une surface de 120 à 250 m<sup>2</sup> [32].

#### **-2.2.1.1.4. L'éclairage de signalisation**

Les systèmes de signalisation sont conçus pour le balisage extérieur en site isolé (bouée maritime) ou sur des sites difficiles à alimenter en courant (signalisation routière, piste d'aéroport, sommet de lignes haute tension) [32].

#### **-2.2.1.2. Pompage photovoltaïque**

Les systèmes de pompage de l'eau basés sur le photovoltaïque offrent des solutions intéressantes pour les régions désertes et rurales où l'agriculture est une activité principale. Le facteur principal limitant leur acceptation est le coût initial élevé. La recherche courante dans ce domaine est visée d'augmenter le rendement du système global afin d'améliorer au maximum le rendement de chaque partie de système (générateur photovoltaïque, groupe moto-pompe), par conséquent, la réduction de coût du système au minimum [29].

Les systèmes de pompage les plus répandus fonctionnent selon le principe au «fil du soleil», c'est-à-dire sans réserve d'énergie, le débit de l'eau étant directement proportionnel à l'énergie lumineuse reçue. Cette disposition offre une installation simple et fiable, un rendement globale acceptable et un coût plus bas que les systèmes utilisant batterie et régulateur [32].

Un système «au fil du soleil» comprend essentiellement un générateur photovoltaïque et une électropompe. Il est complété d'un onduleur ou d'un hacheur lorsque l'électropompe est à courant alternatif ou à courant continu respectivement.

##### **-2.2.1.2.1. Le groupe électropompe**

Un groupe électropompe est composé d'un moteur électrique et d'une pompe, cette dernière étant appelée généralement "hydraulique". Les deux composants fixés l'un sur l'autre constituent un ensemble homogène compact. Des systèmes où le moteur est éloigné de la pompe existe mais ne sont pas à recommander en raison des difficultés techniques qu'ils entraînent.

La pompe est de type :

- Pompe volumétrique.
- Pompe centrifuge.

Le moteur est à courant continu ou alternatif :

- Les moteurs à courant continu: des moteurs à aimants permanents.
- Les moteurs à courant alternatif: des moteurs synchrones à aimants permanents, sans aucun entretien.

#### **-2.2.1.2.2. Adaptation électrique des électropompes au photovoltaïque**

- *Onduleur* : les électropompes à courant alternatif nécessitent l'usage d'un onduleur (convertisseur CC/CA). Le modèle le plus répandu est l'onduleur triphasé à tension et fréquence variables.
- *Hacheur* : les électropompes à courant continu nécessitent l'usage d'un hacheur (convertisseur CC/CC).
- *Adaptateur d'impédance* : c'est un petit système électronique qui permet d'accorder l'impédance entre les modules et l'électropompe de telle façon que la valeur de sortie du générateur photovoltaïque soit à son niveau optimal, permettant ainsi d'optimiser la taille du générateur et réduire la prix initial.

#### **-2.2.1.2.3. Différents systèmes de pompage**

Il est possible de classer les systèmes de pompage selon le critère des ressources en eau ou le critère d'utilisation (alimentation en eau potable, irrigation) ou encore selon des critères sociaux (usage individuel, collectif).

Dans ce cas il existe trois applications principales auxquelles correspondent trois types de systèmes :

- Système de pompage collectif sur forage.
- Système de pompage des eaux de surface pour l'irrigation.
- Système de pompage domestique [29].

#### **-2.2.1.3. Le froid**

Un système de froid photovoltaïque comprend :

- Un ensemble de modules photovoltaïques (de 150 à 500 Wc).
- Une batterie.
- Un régulateur de charge et décharge.
- Un réfrigérateur.

Les réfrigérateurs photovoltaïques sont des appareils à compression, à isolation renforcée et fonctionnement en courant continu. Il existe principalement trois types de réfrigérateurs solaires : les réfrigérateurs, les congélateurs et les appareils mixtes (partie réfrigération et partie congélation). Il existe par contre de nombreux modèles suivant la capacité de stockage désirée.

Un réfrigérateur de type photovoltaïque est généralement composé :

- D'une caisse à simple ou double compartiments, à ouverture sur le dessus (type bahut) et à isolation renforcée.
- D'un groupe frigorifique à compression (évaporateur latéral + condenseur latéral + compresseur hermétique à courant alternatif basse tension 12V ou 24V).
- D'une unité électronique comprenant un convertisseur DC/AC (12V ou 24V) et une commutation électronique [32].

Grandeurs caractéristique d'un système de réfrigération

- La puissance crête de générateur photovoltaïque (Wc).
- L'énergie journalière consommée par le réfrigérateur (Wh/j), donnée pour différentes températures extérieures.
- Le volume de stockage (en litres).
- La capacité à produire de la glace (nombre de Kg/j).
- L'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours).
- La température ambiante moyenne (en degré Celsius, °C).
- La tension d'alimentation (V).
- La capacité des batteries (Ah).

Les réfrigérateurs utilisant ces énergies sont de type absorption (groupe de froid fonctionnant à partir d'une source de chaleur). La comparaison va danc essentiellement se faire entre ces deux modèles et les deux modèles solaires [32].

Le réfrigérateur photovoltaïque est d'un coût élevé d'investissement. Son coût de fonctionnement étant similaire à celui de ses concurrents, il est globalement plus cher que ses concurrents. Il permet toutefois d'assurer une bonne qualité de froid avec une excellente fiabilité.

#### **-2.2.1.4. Le télécommunication**

En effet, que ces appareils aient une simple fonction de réception (radio, télévision ou une double fonction d'émission/réception (radio, émetteur), qu'ils soient de petite puissance (talkie-walkie) ou de forte puissance (faisceaux hertziens), le principe de fonctionnement au

niveau du système reste identique. Ces instruments sont raccordés sur la batterie d'un générateur photovoltaïque [32].

Les principales applications photovoltaïques de télécommunication peuvent être réparties de la façon suivante: Les transmissions radio à courte distance (VHF), longue distance (HF) et par satellite, téléphonie rurale, les faisceaux hertziens, les usages en réception uniquement comme la télévision et la vidéo ou la radio.

Eléments caractéristiques d'un système de télécommunication :

- La puissance crête du générateur photovoltaïque ( $W_c$ ).
- La puissance électrique de l'appareil ( $W$ ) ou le courant absorbé ( $A$ ).
- Le taux d'utilisation quotidien (en heures).
- L'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours).
- La tension d'alimentation ( $V$ ).
- La capacité des batteries ( $Ah$ ).
- La puissance d'émission radio ( $W$ ), accessoirement [32].

### **-2.2.1.5. La recharge des Batteries**

Les batteries permettent de stocker de l'énergie, et sont transportables. Elle répondent de ce fait à des besoins de faible quantité d'énergie, de façon très décentralisée. Le photovoltaïque se prête bien à la recharge de ces batteries, ne serait-ce que parce qu'il peut fournir la tension d'alimentation adéquate sans recours à un transformateur [32].

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb- acide. Les batteries au cadmium -nickel sont rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé; cependant on en donnera quelques paramètres typiques, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles [1].

Il existe deux grands types de systèmes :

- Les chargeurs individuels de batteries. Dans ce cas, il peut s'agir de charger soit des batteries au plomb (de type batteries de voiture), soit des accumulateurs au cadmium/nickel ( $Cd/Ni$ ) que l'on appelle en général (piles rechargeables).
- Les stations communautaires de recharge ( $Pb$  et  $Cd/Ni$ ).

Eléments caractéristiques d'un système de recharge de batterie :

- La puissance crête du générateur photovoltaïque ( $W_c$ ).
- La tension d'alimentation disponible ( $V$ ).
- L'énergie quotidienne produite ( $Wh/j$ ).

- Le courant disponible (A), accessoirement.

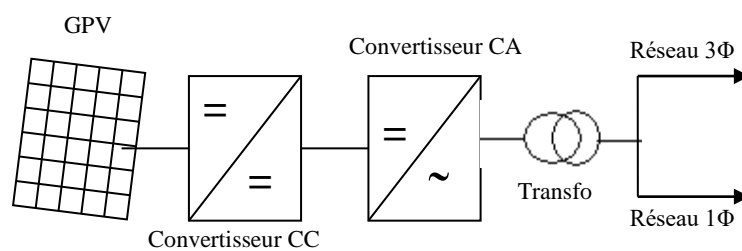
Il existe d'autres applications des systèmes photovoltaïques qui n'ont pas une grande diffusion telles que : la protection cathodique, les clotures électriques, la stérilisation...etc.

### -2.2.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau

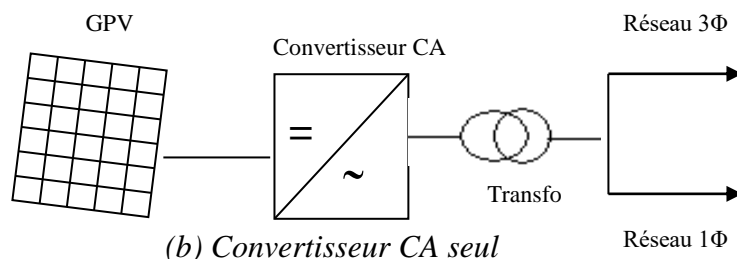
Le système photovoltaïque raccordé au réseau est devenu producteur de tout ou partie de l'électricité qu'il consomme. Le courant continu généré, qui est transformé en courant alternatif par un onduleur puis injecté dans le réseau de distribution publique et un compteur électrique mesure l'énergie fournie au réseau. La compagnie d'électricité, achète à l'utilisateur le courant injecté à un prix convenu, tout en continuant à lui facturer normalement sa consommation [42].

L'application photovoltaïque la plus efficace et la plus répandue est la connexion de panneaux solaires au réseau électrique. Ce type de système fonctionne comme une véritable centrale électrique miniature. Lorsque la production d'énergie solaire est supérieure à la consommation [39]. Le système PV transfère directement l'électricité à un réseau centralisé, est généralement évalué sur la base des économies potentielles sur les coûts de production d'énergie et de génération de capacité [38].

Comme le générateur PV est une source continue, il est nécessaire d'intercaler un convertisseur d'énergie électrique pour convertir la puissance continue à une puissance alternative qui sera injectée dans le réseau urbain, figure 2.1 [29].



(a) Convertisseur CC et CA en cascade



(b) Convertisseur CA seul

figure 2.1 : Schéma synoptique d'un système PV couplé au réseau

### -2.2.2.1. Les centrales villageoises

Ces centrales, généralement d'une puissance de plusieurs dizaines de kWc, peuvent fournir de l'électricité à quelques centaines de ménages à travers un réseau électrique local. Ces centrales peuvent être autonomes (une seule source d'énergie) ou être couplées à un groupe électrogène d'appoint. Toutefois la présence d'un important stockage (par batterie) est nécessaire [29].

L'électricité fournie est en général un courant alternatif 220 V (380 V triphasé) afin d'utiliser des appareils électriques récepteurs de grande diffusion. Le transport de cette électricité (sur quelques kilomètres au maximum) se fait parfois sous une tension plus élevée afin d'éviter les pertes par effet Joule.

### -2.2.2.2. Les centrales reliées directement aux réseaux nationaux

Ces centrales généralement de très grande puissance (de l'ordre plusieurs MW) réinjectent le courant qu'elles produisent directement sur un réseau national sans avoir besoin de le stocker figure 2.2 [29].

Ces installations raccordées à un réseau, représentent une stratégie à long terme des gouvernements et compagnies d'électricité qui désirent s'impliquer dans le développement du photovoltaïque, énergie propre à approvisionnement garanti [38].

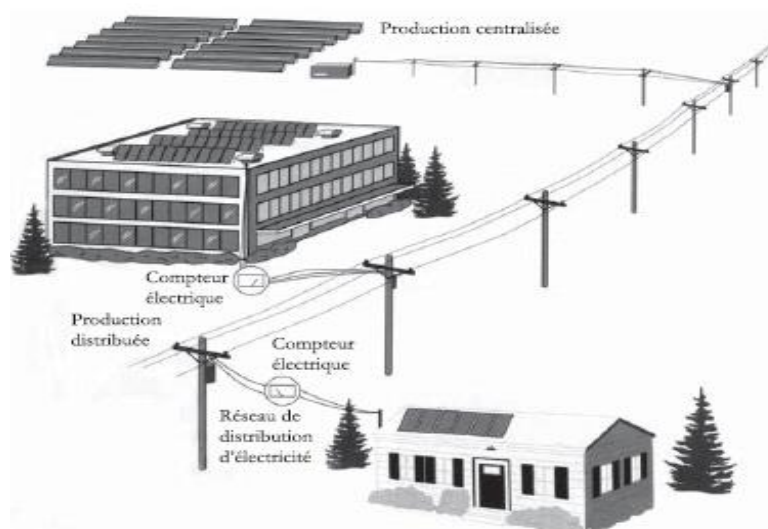


Figure 2.2 : schéma type d'un système PV raccordé à un réseau [adapté de Ross

## **-2.3. Description du système PV connecté au réseau étudié**

Le système photovoltaïque étudié connecté à un réseau de basse tension (220V/380V) comprend : un générateur PV, un convertisseur CC/CA et un transformateur.

### **-2.3.1. Générateur photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique transférée au réseau. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, les modules utilisés sont de type polycristalline AEG PQ10/40/01-02 dont ses caractéristiques sont données dans l'annexe A.

La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules montés en série ( $n_s=10$ ), et d'un nombre de modules montés en parallèle ( $n_p=2$ ).

### **-2.3.2. Conversion continue/ alternative**

Les convertisseurs que nous puissions utiliser dans ce cas sont :

- Un convertisseur CC/CC (Hacheur) en cascade avec un onduleur.
- Un convertisseur CC/CC (Hacheur) en cascade avec un redresseur fonctionnant en régime onduleur.
- Un onduleur ou un redresseur seul.

Nous avons proposé dans notre thème un redresseur triphasé contrôlé fonctionnant en régime onduleur figure 2.3.

### **-2.3.3. Couplage au réseau**

Le couplage du système au réseau sera à travers un transformateur triphasé à rapport de transformation  $n=1$ .

Il faut respecter les conditions de couplage telle que la tension et la fréquence de réseau, dans notre cas la tension est de 220 V (380 V triphasé) et la fréquence  $f=50$  Hz.

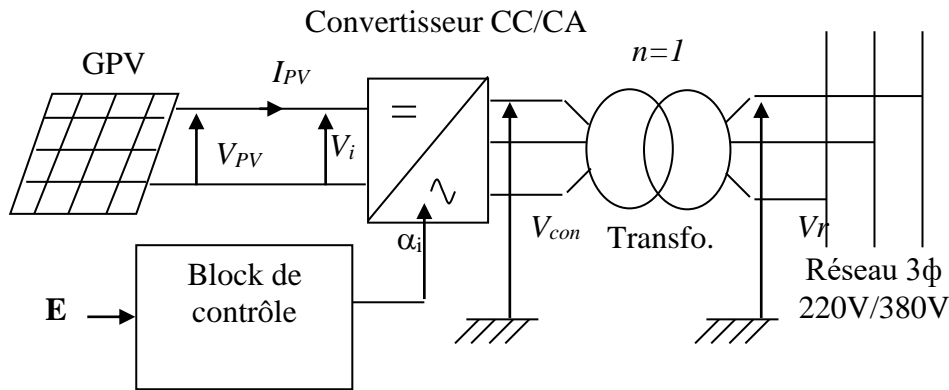


Figure 2.3 : schéma synoptique du système PV couplé au réseau

En négligeant les pertes de la liaison entre le générateur PV et le convertisseur CC/CA, on aura:

$$V_i = -\left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{con} \cos(\alpha_i) \quad (2.1)$$

Où  $V_{con}$  est la tension simple du convertisseur à côté du réseau (tel que  $V_{con} = n \cdot V_r$ ). La puissance du générateur PV est :

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \quad (2.2)$$

Alors

$$P_{PV} = -\left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{con} \cos(\alpha_i) \cdot I_{PV} \quad (2.3)$$

D'après cette dernière équation nous pouvons calculer l'angle d'amorçage  $\alpha$  du convertisseur [29].

## -2.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons exposé les différentes applications d'énergie photo électrique.

Les installations photovoltaïques constituent une source d'énergie unique. Elles peuvent être utilisées pour produire de l'électricité sur place sans avoir recours à une source de combustible ou au réseau de distribution. Dans le cas de systèmes hors réseau, il est possible de commencer par une installation simple qui répond aux besoins de base et de l'étendre à mesure que le budget le permet ou que la demande en énergie le justifie. Quant aux systèmes raccordés au réseau de distribution, la capacité de l'installation ne dépend pas directement des besoins en

énergie, mais plutôt de la manière dont le propriétaire valorise les bénéfices non financiers de l'énergie solaire. La capacité d'autosuffisance inhérente aux systèmes photovoltaïques est attrayante pour nombre de propriétaires. Les propriétaires qui restent branchés sur le réseau de distribution local n'ont pas besoin de systèmes photovoltaïques étendus.

### **-3.1. Introduction**

Le cerveau humain est un modèle dans le développement de l'intelligence artificielle. De simples enchevêtrements de neurones lui donnent toutes ses capacités, et c'est ce que tentent de reproduire les chercheurs grâce à l'électronique.

L'intelligence artificielle est en continuelle progression depuis l'invention de l'ordinateur et l'utilisation de programmes informatiques. Il existe en effet de nombreux programmes capables de réaliser des choses de plus en plus complexes : mais ils sont très rarement capables de rivaliser avec le cerveau humain, et c'est pour cela que de nombreuses tâches sont encore irréalisables par les ordinateurs. Le cerveau est une machine assurément incroyable. Cependant, les ordinateurs n'ont pas cette faculté d'apprentissage, ils ne connaissent pas le progrès si personne ne les modifie. Voilà le challenge pour l'intelligence artificielle : savoir apprendre.

D'un autre côté, la biologie a apporté un grand nombre d'informations sur le fonctionnement du cerveau, des neurones... Des mathématiciens alors ont tenté de reproduire le fonctionnement du cerveau en intégrant ces connaissances en biologie dans des programmes informatiques, et en leur donnant la possibilité d'apprendre.

### **-3.2. Historique**

L'historique des réseaux de neurones est étroitement relié au développement de l'informatique. On fait remonter le début des travaux sur les réseaux aux travaux de McCulloch et Pitts (1943). Ils essaient de comprendre les propriétés du système nerveux à partir du comportement de ses constituants élémentaires : les neurones. Les neurones, ici, sont quelque peu idéalisés: Ce sont des neurones logiques ou binaires. Ils ne connaissent que les réponses 0 ou 1. A l'époque leur modèle pouvait être considéré comme neurologiquement plausible.

Un peu plus tard, Donald Hebb (1949), un psychologue canadien, essayait d'expliquer les effets d'apprentissage, de mémoire et de conditionnement à partir de groupes de cellules. Pour expliquer les effets d'apprentissage en fonction de l'expérience, il propose que les cellules apprennent à modifier l'intensité des connexions qui les relient en fonction de leur activité simultanée; c'est la fameuse loi de Hebb. Hebb utilise ces notions d'un point de vue théorique pour expliquer des phénomènes psychologiques et prédire leur effets. Vers la même époque (1951), Minsky ce qui fut, probablement le premier modèle réel d'un réseau de neurones. Son «ordinateur neuronal» s'appelait Smarl.

En 1957, F.Rosenblatt développe le modèle du perceptron. Il construit le premier neuroordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cette époque les moyens à sa disposition sont limités et c'est une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes.

En 1960, B.Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Cette-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adaline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières. B.Widrow a créé dès cette époque une des premières firmes proposant neuro-ordinateurs et neuro-composants, la "Memistor Corporation".

En 1969, M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en évidence les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèle de réseaux de neurones artificiels. Il y a eu un trou dans les années 70 où rien ne se passa, car les chercheurs et les investisseurs se désinvestissent des réseaux de neurones pour se tourner vers l'approche symbolique de l'intelligence artificielle, qui semblait beaucoup plus prometteuse.

Le renouveau actuel des réseaux de neurones est dû à des contributions originales, comme celle de Hopfield en 1982, qui en montrant l'analogie des réseaux de neurones avec certains systèmes physiques, a permis de leur appliquer un formalisme riche et bien maîtriser. Récemment, en 1985, des nouveaux modèles mathématiques ont permis de dépasser les limites du perceptron.

Les réseaux de neurones, avec leurs aptitudes en classification, mémorisation, filtrage et approximation, sont devenus un moyen très efficace et ont conquis plusieurs domaines. Nous citons le contrôle et modélisation des systèmes, le traitement du signal et notamment de l'image [29].

### **-3.3. Le neurone biologique**

Le cerveau humain, est le meilleur modèle de machine, polyvalente incroyablement rapide et surtout douée d'une incomparable capacité d'auto-organisation. Son comportement est beaucoup plus mystérieux que le comportement de ses cellules de base. Il est constitué d'un grand nombre d'unités biologiques élémentaires (environ  $10^{12}$  neurones), chacune reçoit et

envoi des informations (1000 à 10000 synapse par neurone). Les cellules nerveuses appelées " neurones ", sont les éléments de base du système nerveux centrale [24], [15].

### -3.3.1. Caractéristiques

Le neurone biologique représente des caractéristiques qui lui sont propres et se retrouvent au niveau de cinq fonctions spécialisées qu'ils assurent :

- Recevoir des signaux en provenance de neurones voisins.
- Intégrer ces signaux.
- Engendrer un flux nerveux.
- Le conduire.
- Le transmettre à un autre neurone capable de le recevoir [43].

### -3.3.2. Structure

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites [18], [15], [24]. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstroms ( $10^{-9}$  m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent [15], [24]. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse [15], [24], [18].

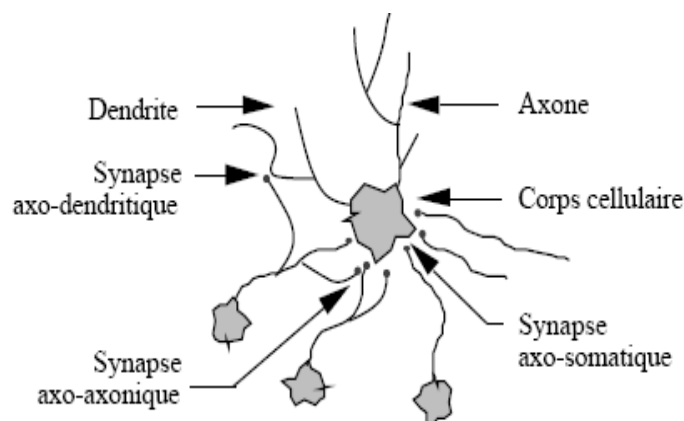


Figure 3.1 : structure d'un neurone biologique

### -3.4. Le Neurone formel (Artificiel )

Une neurone formel est une représentation et informatique d'une neurone biologique [19]. Chaque neurone possède plusieurs entrées, à chacune d'entre elles on affecte un poids et une sortie . A chaque entrée peuvent être connectées plusieurs sorties d'autre neurones. La sortie est calculée à partir des entrées et des poids synaptique [36] (les valeurs numériques de ces coefficients sont ajustées dans une phase d'apprentissage) [19] : une fonction d'entrée calcule le potentiel du neurone. Celle-ci est très souvent la somme pondérée (par son coefficient) des entrées augmentée d'un seuil. Une fonction de transfert génère alors la sortie grâce à ce potentiel. Cette fonction de transfert est très importante, et détermine le fonctionnement du neurone et du réseau. Elle peut prendre de nombreuses formes, peut être linéaire, binaire, saturée ou sigmoïdale [36]. Mathématiquement, le neurone formel est une fonction à plusieurs variables et à valeurs réelles [19].

### -3.5. Structure et comportement du neurone artificiel

La figure 3.2, montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amonts. A chacune de ces entrées est associée un poids  $w$  (abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associée un poids [24], [15].

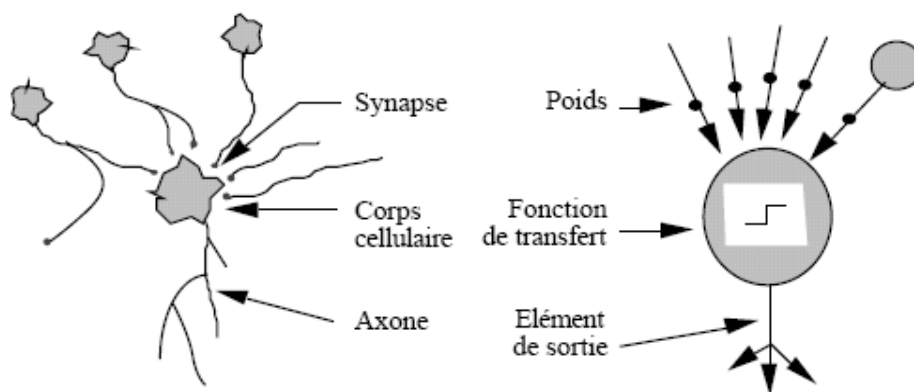


Figure 3.2 : mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

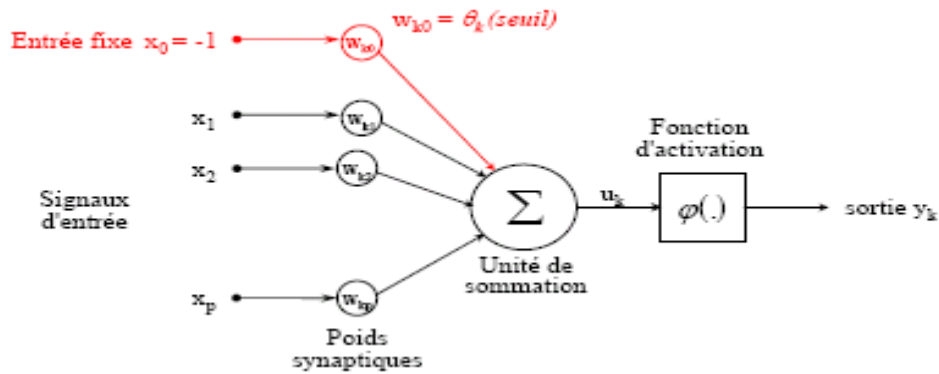


Figure 3.3 : structure d'un neurone artificiel (model étendu)

On distingue deux phases. La première est habituellement le calcul de la somme pondérée des entrées  $x$  selon l'expression suivante :

$$u_k = \sum (w_{ki} \cdot x_i) \quad (3.1)$$

A partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avants. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure 3.4, on remarquera qu'à la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle  $[0, +1]$  (ou  $[-1, +1]$ ) [24].

La fonction d'activation définit la valeur de sortie d'un neurone en termes des niveaux d'activité de ses entrées.

$$\mathbf{a} = y_k = \varphi(v_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{si } v_k < 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{b} = \varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{si } v \geq \alpha \\ v & \text{si } \alpha > v > \beta \\ 0 & \text{si } v \geq \beta \end{cases}$$

$$\mathbf{c} = \varphi(v) = \tanh\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1 - e^{-v}}{1 + e^{-v}}$$

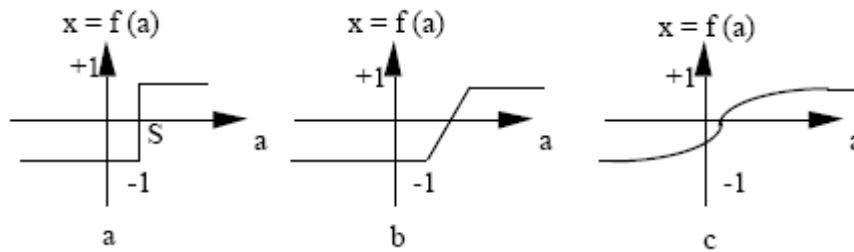


Figure 3.4 : différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel, a : fonction à seuil ( $S$ , la valeur du seuil), b : linéaire par morceaux, c : sigmoïde

Nous constatons que les équations décrivant le comportement des neurones artificiels n'introduisent pas la notion de temps. En effet, et c'est le cas pour la plupart des modèles actuels de réseaux de neurones, nous avons affaire à des modèles à temps discret, synchrone, dont le comportement des composants ne varie pas dans le temps [24].

### -3.6. Types des neurones artificiels

#### -3.6.1. Automates à seuil

Ce sont les plus fréquemment utilisés. Leur principe est très simple: Les états internes ne peuvent prendre que les valeurs 0 ou 1; si la somme pondérée  $A_i$  des entrées d'un neurone dépasse un seuil fixé, l'état interne et la sortie de ce même neurone prennent la valeur 1 (0 dans le cas contraire).

#### -3.6.2. Automates continus

L'ensemble des valeurs des états internes est continu (valeurs réelles), la fonction de transition calculant la sortie de façon déterministe.

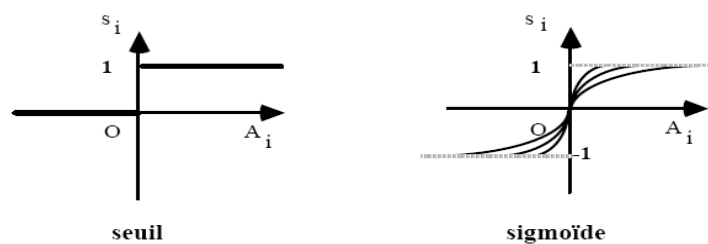


Figure 3.5 : automates à seuil et continu

## **-3.7. Fonctionnement**

### **-3.7.1. L'état initiale**

L'état initial peut être :

- Soit aléatoire;
- Soit forcé pour les cellules d'entrées du réseau, l'état des autres cellules du réseau étant soit aléatoire, soit lui-même forcé.

### **-3.7.2. Les modes de fonctionnement**

La première hypothèse faite est que le temps discrétisé et chaque pas de temps est marqué par un top d'horloge.

Les deux principaux modes de fonctionnement sont les modes parallèles et séquentiels.

- Le modes parallèle :

A chaque top d'horloge, tous les neurone calculent leur nouvelle activation, leur sortie, et la transmettent aux neurones auxquels ils sont connectés en tant que neurones émetteurs. Ce calcul est fait en fonction de leurs entrées au top d'horloge précédent.

- Le mode séquentiel :

A chaque top d'horloge, un seul neurone calcule sa nouvelle activation, sa sortie et la transmet aux neurones qui lui sont connectés. Ce calcul étant fait en fonction de ses entrées au top d'horloge précédent.

Ce mode séquentiel peut se faire suivant une liste cyclique prédéfinie ou suivant un choix aléatoire du neurone qui exécutera ces calculs.

Entre ces deux modes, il peut exister des modes mixtes, combinaison des deux modes précédents [33].

## **-3.8. Réseau de neurones artificiels (RNA)**

Un réseau de neurones est un processus distribué de manière massivement parallèle, qui a une propension naturelle à mémoriser des connaissances de façon expérimentale et de les rendre disponibles pour utilisation. Il ressemble au cerveau en deux points :

- 1- La connaissance est acquise au travers d'un processus d'apprentissage;
- 2- Les poids des connections entre les neurones sont utilisés pour mémoriser la connaissance.

C'est sur base de cette définition que repose l'élaboration des réseaux de neurones artificiels [25].

### **-3.9. Structure général d'un réseau de neurones**

Comme les neurones formels sont interconnectés entre eux, leur niveau d'interconnexion définit des couches. On distingue une couche d'entrée contenant les neurones formels qui vont recevoir les informations primitives, puis après un certain nombre de couches intermédiaires dites couches cachées, une couche de sortie qui contient les neurones finaux transmettant les informations de sortie traitées par la totalité du réseau. Au contraire des systèmes de calcul symbolique qui codent les informations dans des symboles pour les calculer de façon séquentielle, les systèmes connexionnistes traitent les informations en parallèle. L'ensemble du réseau et des couches de neurones formels est alors modifié par les informations en entrée. Suivant les phases d'apprentissage, consistant à présenter les stimuli d'entrée un grand nombre de fois, les poids synaptiques des neurones formels sont modifiés. Il se définit alors petit à petit dans les couches cachées du réseau un attracteur vers lequel convergent l'ensemble des valeurs des poids synaptiques qu'on assimile alors à des trajectoires [27].

Il y à plusieurs aspects sont à considérer la bonne architecture de RNA :

- Le nombre d'entrées et de sorties.
- Le nombre de couches de neurones.
- Le nombre de neurones sur chaque couche.
- Les interconnexions entre les couches (récuratif ou non -récuratif).
- La fonction d'activation [22].

### **-3.10. Architecture du réseau**

Il existe différentes topologies du réseau correspondant aux divers schémas géométriques de connexion entre les neurones. Les connexion entre les neurone qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle [34].

Le plus souvent, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones; cependant, celui – ci peut être quelconque [30].

#### **-3.10.1. Réseau multicouches**

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales (figure 3.6). Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée,

neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées [24]. Et toute aucun contact la l'extérieur sont connectés à tons les neurones de la couche aval.

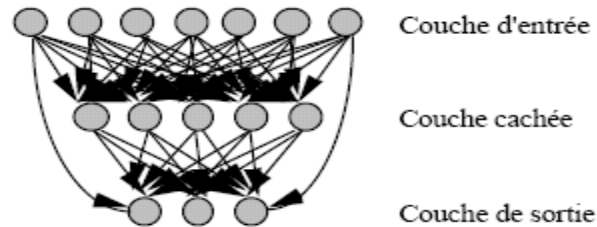


Figure 3.6: définition des couches d'un réseau multicouche

### -3.10.2. Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une structure multicouche. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche aval. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

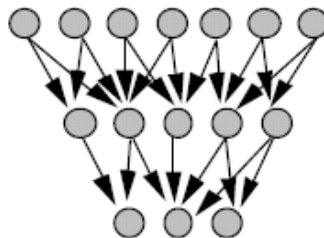


Figure 3.7 : réseau à connexions locales

### -3.10.3. Réseau à connexions récurrentes

Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche.

Les réseaux à connexions récurrentes sont des réseaux plus puissants car ils sont séquentiels plutôt que combinatoires comme l'étaient ceux décrits précédemment. La rétroaction

de la sortie vers l'entrées permet à un réseau de ce type de présenter un comportement temporel [30].

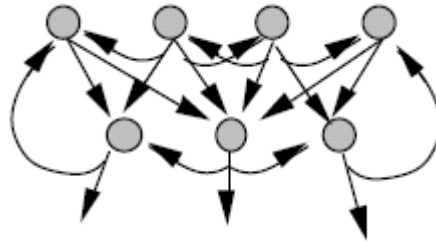


Figure 3.8 : réseau à connexions récurrentes

#### -3.10.4. Réseau à connexion complète

C'est la structure d'interconnexion la plus générale (figure 3.9). Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même).

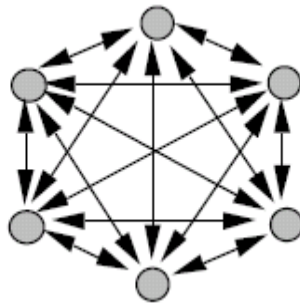


Figure 3.9: réseau à connexions complète

Il existe de nombreuses autres topologies possibles, mais elles n'ont pas eu à ce jour la notoriété des quelques unes que nous avons décrites ici [24].

### -3.11. L'apprentissage

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement [43]. Il existe divers algorithmes pour ajuster les poids d'un réseau neuronal, et éventuellement sa topologie. L'apprentissage peut s'effectuer de diverses manières. Il peut être supervisé, non supervisé ou par renforcement [20] :

### **-3.11.1. Apprentissage supervisé**

On fournit au réseau le couple (entrée, sortie) et on modifie les poids en fonction de l'erreur entre la sortie désirée et la sortie obtenue [36].

Les coefficients synaptiques sont alors ajustés dans le but de minimiser un critère de coût. Une fois l'apprentissage est effectué, le réseau est apte à accomplir la tâche prévue.

Les performances du réseau sont évalués à l'aide d'un ensemble d'exemples (de même nature que l'ensemble apprentissage ou d'entraînement) dit ensemble de test. La méthode la plus utilisée pour ce type d'apprentissage est le rétro- propagation [15].

### **-3.11.2. Apprentissage non supervisé**

Le réseau doit détecter des poids communs aux exemples présentés, et modifier les poids afin de fournir la même sortie pour des entrées aux caractéristiques proches [36].

Dans ce type d'apprentissage d'adaptation des coefficient synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée, mais c'est le réseau qui organise lui même les entrées qui lui son présentées de façon à optimiser une certaine fonction de coût, sans lui fournir d'autre éléments, de réponses désirées. Cette propriété est dite Auto organisation (self organisation) [15].

## **-3.12. La rétro-propagation**

La rétro-propagation est actuellement l'algorithme le plus utilisé pour l'entraînement des réseaux de neurones. C'est une technique de calcul des dérivées composées. Mathématiquement, cette méthode est basée sur l'algorithme de la descente du gradient. La rétro-propagation donne la possibilité de rétro-propager (en suivant le chemin inverse) l'erreur commise en sortie vers les couches caches d'où le nom «Rétro-propagation», sans oublier qu'elle est capable de propage un signal provenant des cellules d'entrée vers la couche de sortie [22].

## **-3.13. Apprentissage d'un réseaux de neurones par rétro-propagation**

Comme on l'a déjà mentionné, l'apprentissage consiste à ajuster les paramètres du réseau de neurone pour que ses sorties soient suffisamment proches des sorties désirées pou un ensemble d'échantillons dit ensemble d'entraînement, et cela pour qu'il soit capable de reconnaître des exemples n'appartenant pas nécessairement à l'ensemble d'apprentissage.

Deux étapes sont nécessaires pour effectuer cette reconnaissance :

- Détermination de la topologie du réseau de neurone.
- Définition des règles d'apprentissage.

La première étape consiste à définir un ensemble de paramètres (poids) ajustables, leur répartition sur les couches du réseau de neurones, et la relation entre les entrées et les sorties (équations). Par contre, la deuxième traite l'adaptation de ces paramètres. La rétro-propagation est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Mathématiquement, cette méthode est basée sur l'algorithme de la descente du gradient, et utilise les règles de dérivation composée. Dans cette méthode, de même que l'on est capable de propager un signal provenant des neurones d'entrées vers la couche de sortie, on peut, en suivant le chemin inverse, rétropropager l'erreur commise en sortie vers les couches cachées, d'où le nom rétro-propagation.

On présente, dans ce qui suit un exemple d'un algorithme de rétro-propagation, basé sur la méthode du gradient.

Soit un perceptron multicouche à deux entrées et une seule sortie composé de deux couches. L'activité du neurone  $j$  de la couche  $m$  est représenté par l'équation suivante [18] :

$$X_j^m = \sum_{i=0}^{n_{m-1}} w_{ij}^m y_i^{m-1} \quad (3.2)$$

Où  $n_{m-1}$  est le nombre de neurones de la couche  $m-1$

et la sortie du neurone  $j$  de la couche  $m$  est [21], [18] :

$$y_j^m = f(X_j^m) \quad (3.3)$$

On dispose d'un ensemble d'apprentissage qui est un ensemble des couples (entrées /sorties) composé de  $n_e$  échantillons. L'objectif est d'adapter les poids  $w_{ij}^m$  de façon à minimiser l'erreur quadratique globale  $\varepsilon$  sur l'ensemble d'apprentissage, sachant que :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y(k))^2 \quad (3.4)$$

où :

$y^d$  : est le vecteur de sortie désiré (sortie du processus).

$y$  : est le vecteur de sortie du réseau de neurones.

$n_e$  : est le nombre d'échantillons de l'ensemble d'apprentissage.

Les poids  $w_{ij}^m$  vont être ajustés par une variation  $\Delta w_{ij}^m$ . La direction optimale est donnée par l'opposé du gradient de l'erreur par rapport aux poids, on peut écrire:

$$\begin{aligned}
\Delta w_i^2 &= -\alpha \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_i^2} = -\frac{1}{2} \alpha \sum_{k=1}^{n_e} \frac{\partial}{\partial w_i^2} \left\{ (y^d(k) - y^2(k))(y^d(k) - y^2(k)) \right\} \\
&= \alpha \sum_k (y^d(k) - y^2(k)) \frac{\partial y^2(k)}{\partial w_i^2} \\
\frac{\partial y^2(k)}{\partial w_i^2} &= \frac{\partial}{\partial w_i^2} \left\{ f^2 \left( \sum_{i=0}^{n_{m-1}} w_i^2 y_i^1(k) \right) \right\} \\
&= f^2(x^2(k)) \frac{\partial}{\partial w_i^2} \left\{ \sum_{i=0}^{n_{m-1}} w_i^2 y_i^1(k) \right\} = f^2(x^2(k)) y_i^1(k) \\
\Delta w_i^2 &= \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y^2(k)) f^2(x^2(k)) y_i^1(k) \tag{3.5}
\end{aligned}$$

De même pour la couche cachée, on obtient:

$$\begin{aligned}
\Delta w_{ij}^1 &= -\alpha \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_{ij}^1} = -\frac{1}{2} \alpha \sum_{k=1}^{n_e} \frac{\partial}{\partial w_{ij}^1} \left\{ (y^d(k) - y^2(k))(y^d(k) - y^2(k)) \right\} \\
&= \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y^2(k)) \frac{\partial y^2(k)}{\partial w_{ij}^1} \\
&= \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y^2(k)) \left\{ \sum_{j=1}^{n_m} \frac{\partial y^2(k)}{\partial x_j^1(k)} \frac{\partial x_j^1(k)}{\partial w_{ij}^1} \right\} \\
&= \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y^2(k)) \left\{ f^2(x^2(k)) \frac{\partial}{\partial x_i^1(k)} \left\{ \sum_{i=0}^{n_{m-1}} w_j^2 f^1(x_j^1(k)) \right\} y_i^0(k) \right\} \\
\Delta w_{ij}^1 &= \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y^d(k) - y^2(k)) f^2(x^2(k)) w_j^2 f^1(x_j^1(k)) y_i^0(k) \tag{3.6}
\end{aligned}$$

On peut introduire l'erreur élémentaire de la couche  $m$  par  $\delta_j^m(k)$ , on aura alors :

$$\delta^2(k) = (y^d(k) - y^2(k)) f^2(x^2(k)) \tag{3.7}$$

$$\Delta w_i^2 = \alpha \sum_{k=1}^{n_e} \delta^2(k) y_i^1(k) \tag{3.8}$$

de même :

$$\delta_j^1(k) = (y^d(k) - y^2(k)) f^2(x^2(k)) w_j^2 f^1(x_j^1(k))$$

$$\delta_j^1(k) = \delta^2(k) w_j^2 f^1(x_j^1(k)) \tag{3.9}$$

$$\Delta w_{ij}^1 = \alpha \sum_{k=1}^{n_e} \delta_j^1(k) y_i^0(k) \tag{3.10}$$

On peut montrer aussi que la relation générale de l'erreur élémentaire et de la variation des poids de toute couche  $m$  différente de la couche de sortie pour un perceptron multicouche à  $j$  sorties, est :

$$\delta_i^{m-1}(k) = \left\{ \sum_{j=1}^{n_m} \delta_j^m(k) w_{ij}^m(k) \right\} f^{m-1}(x_i^{m-1}(k)) \quad (3.11)$$

$$\Delta w_{ij}^{m-1} = \alpha \sum_{k=1}^{n_e} \delta_i^{m-1}(k) y_j^{m-2}(k) \quad (3.12)$$

Pour la couche de sortie, on a dans ce cas :

$$\Delta w_{ij}^m = \alpha \sum_{k=1}^{n_e} (y_j^d(k) - y_j^m(k)) f^m(x_j^m(k)) y_i^{m-1}(k) \quad (3.13)$$

Pour le calcul de  $\delta_i^{m-1}(k)$ , on utilise  $\delta_j^m(k)$ . Puis, de proche en proche, par rétro-propagation, on calcule une erreur correspondant à chaque neurone pour une couche donnée.

On peut choisir la vitesse avec laquelle se fait la mise à jour des poids lors de l'apprentissage en agissant sur le coefficient  $\alpha$  qui représente un facteur d'accélération de l'opération d'apprentissage. Le choix d'un facteur d'apprentissage  $\alpha$  variable permet dans certains cas d'accélérer la convergence de l'opération d'apprentissage.

Afin de réduire les problèmes de la convergence rencontrés lors de l'opération d'apprentissage, on a été contraint de trier l'algorithme d'apprentissage le plus rapide, celui de Levenberg–Marquardt, qui est basé sur la méthode quasi-Newton, quand il s'agit d'identifier un processus non linéaire par réseaux de neurones ce qui est le cas pour notre application [18].

### -3.14. Utilisation des réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones se décompose en deux phases: l'apprentissage qui permet de produire un réseau de neurones artificiels pour un problème donné et l'utilisation pendant laquelle ce réseau est sollicité.

Déroulement du processus d'apprentissage :

- Déterminer les entrées pertinentes c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène qu'on cherche à modéliser.
- Collecter les données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- Trouver le nombre de neurones cachés pour obtenir une approximation satisfaisante.
- Estimer les valeurs des paramètres correspondant à un minimum de la fonction de coût, c'est-à-dire effectuer un apprentissage.
- En fonction des résultats obtenus, il peut être nécessaire de recommencer cette procédure [26].

### **-3.15. Domaine d'application**

- Reconnaissance de formes.
- Classification.
- Identification.
- Prédiction.
- Filtrage.
- Commande, régulation.
- Optimisation combinatoire [17].

### **-3.16. Avantages des réseaux de neurones**

Les réseaux de neurones peuvent apprendre et généraliser à partir des simples données d'entrée et de sortie. Il est ainsi possible de développer un modèle sans disposer de formule exprimant le phénomène modélisé.

- Les seuls paramètres requis sont ceux directement liés à l'irradiation [26].
- les réseaux de neurones sont en effet de «approximateurs universels».
- Leur utilisation permet de passer directement des données au prédicteur, sans intermédiaire, ou interprétation sujette à caution.
- Un réseau de neurones possède également une grande résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données, et les réseaux de neurones sont également capables d'analyser des relations spatiales et topologiques.
- L'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables. Elle est intuitive.
- Le modèle fourni se prête bien à la visualisation, à une recherche de profils-type.
- Ces propriétés des réseaux de neurones sont intéressantes car elles sont complémentaires des techniques statistiques classiques qui imposent des fortes restrictions.
- Les régressions se font sur des fonctions de dépendance simples (linéaire, logarithmique) qui ne sont pas toujours très réalistes.
- Enfin le traitement des calculs impose de faire appel à des méthodes compliquées pour transformer les données initiales.
- Par contre, un réseau de neurones bien conçu est capable de représenter n'importe quelle dépendance fonctionnelle et d'extraire de l'information sans modèle préconçu [27].

### **-3.17. Inconvénients des réseaux de neurones**

Un réseau de neurones ne dispense pas de bien connaître son problème, de définir ses classes avec pertinence, de ne pas oublier de variables importantes, etc. Un réseau de neurones est une « boîte noire » qui n'explique pas ses décisions.

Les réseaux de neurones ont une très bonne prédiction statistique (ayant la capacité de s'accommoder de valeurs très bruitées ou même manquantes), mais ils sont complètement impossibles à inspecter. La perte partielle de compréhension est compensée par la qualité des prédictions [27].

On peut résumer ces inconvénient par les points suivants :

- Le choix de l'architecture est critique.
- Le temps d'apprentissage peut être long.
- Présence de minima locaux de la fonction de coût.
- Difficultés d'interprétation des résultats en terme de connaissance [17].

### **-3.18. Conclusion**

Les réseaux de neurones, avec leurs capacités de traitement parallèle, d'apprentissage et d'approximation peuvent être considérés comme une classe tout à fait différente des calculateurs habituels. Plusieurs architectures des réseaux de neurones peuvent être obtenues par l'interconnexion de plusieurs éléments de base (neurones), qui sont inspirés du prototype biologique de la cellule nerveuse, l'élément essentiel du cerveau humain. Deux types d'apprentissages sont utilisés pour entraîner de tels réseaux, à savoir : l'apprentissage supervisé et non supervisé. La méthode la plus utilisée pour l'apprentissage supervisé des réseaux statiques, est la rétro- propagation qui repose simplement sur la technique de calcul du gradient, appliquée à toute fonction dérivable.

## -4.1. Introduction

L'influence du réseau sur le fonctionnement du générateur photovoltaïque se remarque principalement pendant de la réseau simulés.

Simuler un modèle décomposable dans un certain formalisme (tel que le réseaux de neurones,...) est le fait de calculer se dynamique d'entrées/sorties.

La simulation qui permet de "mimer" une expérience réelle peut être vue comme un expérimentation virtuelle. Lorsque le but de la simulation est d'être rapide et précise.

## -4.2. Choix du réseau de neurones appliqué

Le choix du réseau de neurones appliqué dans ce travail se fait par expériences, parce qu'il n'existe pas de méthodes permettant de trouver une architecture appropriée (nombre de couches cachées, nombre de neurones cachés et connexions) ou de choisir des valeurs initiales satisfaisantes pour les poids, et des valeurs convenables pour les paramètres d'apprentissage.

La sélection des fonctions d'activation joue un important rôle pour désigner le réseau de neurones. Dans ce présent travail, la fonction sigmoïde est choisie pour les neurones de la couche cachée et la fonction linéaire pour ceux de la couche de sortie et l'entraînement du réseau se fait par la méthode de rétro-propagation.

Un vecteur d'entrée,  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^t$  est appliqué à la couche d'entrée du réseau Figure 4.1. L'ensemble des entrées d'un neurone caché 'j' est :

$$net_j^h = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + \theta_j^h \quad (4.1)$$

où :

$w_{ij}^h$  sont les poids de la connexion de  $i^{eme}$  neurone d'entrée.

$\theta_j^h$  tel que  $j = 1, 2, \dots, N_h$  représentent les biais des neurones de la couche cachée.

Maintenant, la sorties des neurones de la couche cachée peut être écrit comme suit :

$$y_j^h = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + \theta_j^h\right) \quad (4.2)$$

L'ensemble des entrées aux neurones de la couche de sortie devient :

$$net_k^o = \sum_{j=1}^{N_h} w_{jk} y_j^h + \theta_k^o \quad (4.3)$$

Où :

$\theta_k^o$  représentent les biais des neurones de la couche de sortie.

Finalement, la sortie des neurones dans la couche de sortie est :

$$y_k^o = f\left(\sum_{j=1}^{N_h} w_{jk} y_j^h + \theta_k^o\right) \quad (4.4)$$

La mise au point du système de commande suppose deux phases. Une phase préalable d'apprentissage au cours de laquelle les coefficients synaptiques ou les poids du réseau sont estimés, et une phase d'utilisation ou de reconnaissance, dont les coefficients sont déjà fixés.

Avec les équations ci-dessus, la règle de rétro-propagation de l'erreur est utilisée dans les étapes suivantes :

- Etape1 : construction du réseau et initialisation des poids synaptiques avec des valeurs aléatoires.
- Etape2 : appliquer le vecteur d'entrée au réseau et calculer les valeurs de sorties correspondantes, de l'équation (4.1) à l'équation (4.4).
- Etape3 : comparer la sortie actuelle avec la sortie désirée et déterminer la mesure de l'erreur.
- Etape4 : déterminez la quantité par laquelle chaque poids doit être changé et faire les corrections à chaque poids.
- Etape5 : répéter l'étape 2 à l'étape 4 avec tous les vecteurs d'entrée jusqu'à ce que l'erreur pour les vecteurs dans l'ensemble d'entraînement soit réduite à une valeur acceptable.

### -4.3. Température fixe et éclairage variable

Le réseau de neurones choisi ici est de trois couches, une couche d'entrée et une couche de sortie à un seul neurone, et une couche cachée à quatre neurones figure 4.1

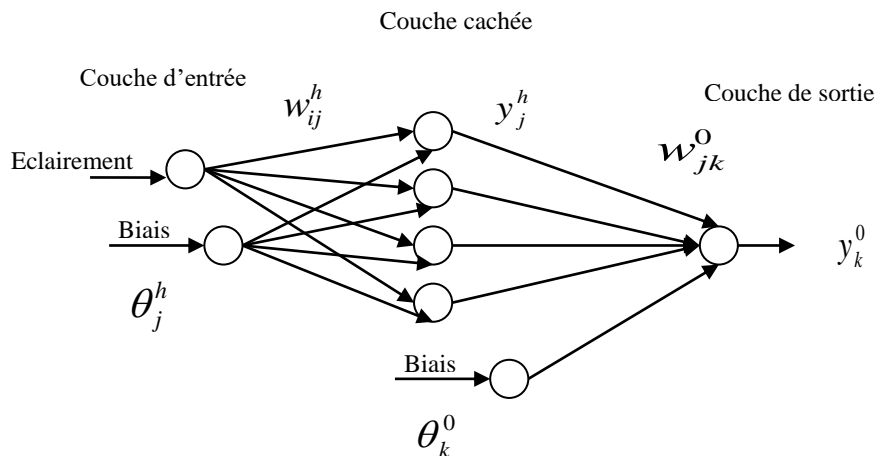


Figure 4.1 : réseau de neurones avec une seule entrée

### -4.3.1. La phase d'apprentissage

La tâche d'apprentissage est définie par un ensemble d'exemples ou couples (valeurs des entrées- valeurs des sorties désirées correspondantes), couples (commande-sortie mesurée du processus), les comparer et ajuster les coefficients de manière que la sortie du réseau soit aussi proche que possible de la sortie désirée.

Nous avons fixé la température ambiante à 25°C et varié l'éclairement de 100W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup> par un pas de 50W/m<sup>2</sup>.

La puissance d'apprentissage (la sortie du réseau de neurones) et la puissance désirée sont mentionnées sur la figure 4.2.

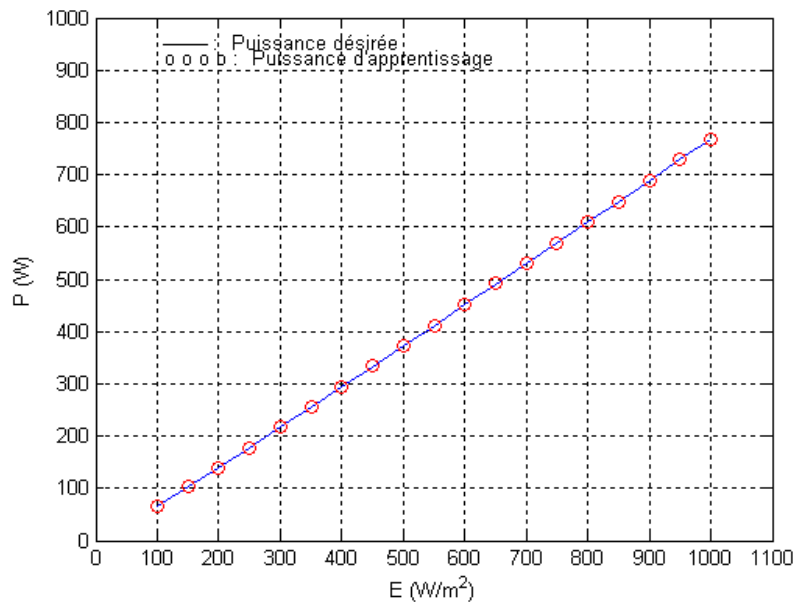


Figure 4.2 : puissance d'apprentissage et puissance désirée à T=25°C

L'erreur absolue entre la puissance d'apprentissage et la puissance désirée figure 4.3 est donnée par l'équation :

$$Err = |P_{\text{apprentissage}} - P_{\text{désirée}}| \quad (4.5)$$

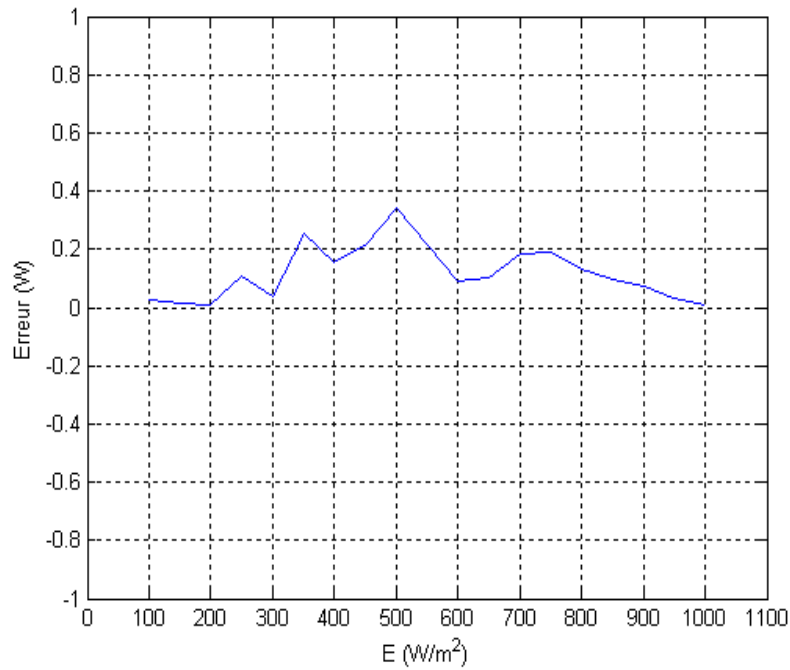


Figure 4.3: erreur absolue d'apprentissage

L'erreur relative d'apprentissage, figure 4.4, est calculée par l'équation :

$$Err(\%) = \frac{|P_{\text{apprentissage}} - P_{\text{désirée}}|}{P_{\text{désirée}}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

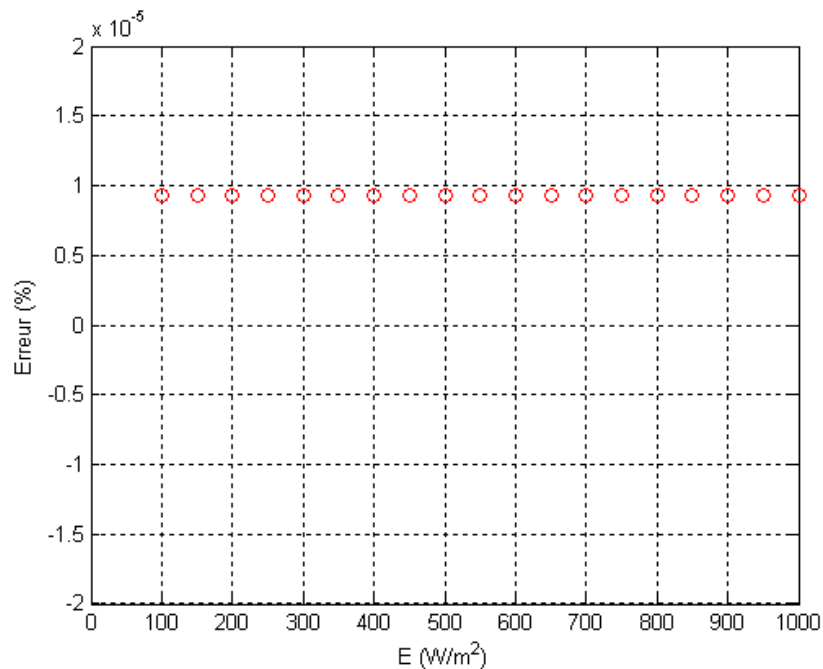


Figure 4.4 : erreur relative d'apprentissage

On remarque d'après les deux figures précédentes que le réseau de neurones converge vers une erreur absolue de 0.4W au maximum et c'est un bon résultat par rapport aux valeurs des puissance. L'erreur relative est très petite de l'ordre de  $10^{-5}\%$ .

Après la phase d'apprentissage et quand l'erreur sera acceptable, les valeurs des poids et des biais sont calculées et fixées, mais l'exécution du réseau de plusieurs fois ne donne pas les mêmes valeurs des poids et des biais précédentes. Les valeurs des  $w$  et des  $\theta$  sont données dans l'annexe B.

### -4.3.2. La phase de reconnaissance

Dans cette phase, nous avons fait varier l'éclairement avec des valeurs qui sont pas reconnues, de  $100\text{W}/\text{m}^2$  à  $1000\text{W}/\text{m}^2$  avec un pas de  $80\text{W}/\text{m}^2$  et pour la même température  $25^\circ\text{C}$ .

La puissance de sortie est comparée avec la puissance désirée sur figure 4.5.

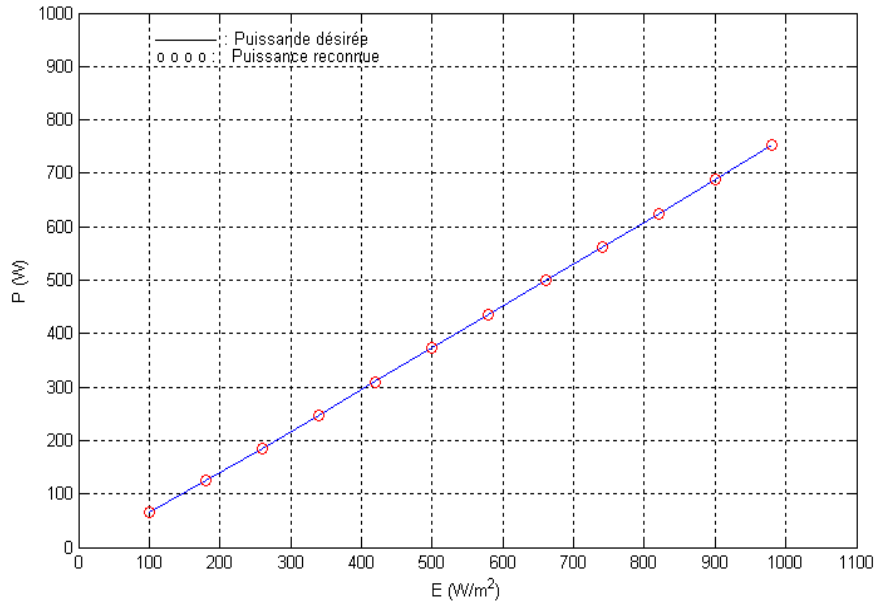


Figure 4.5 : puissance désirée et puissance de reconnaissance à  $T=25^\circ\text{C}$

L'erreur absolue de la phase de reconnaissance figure 4.6, est calculée comme dans l'équation (4.5).

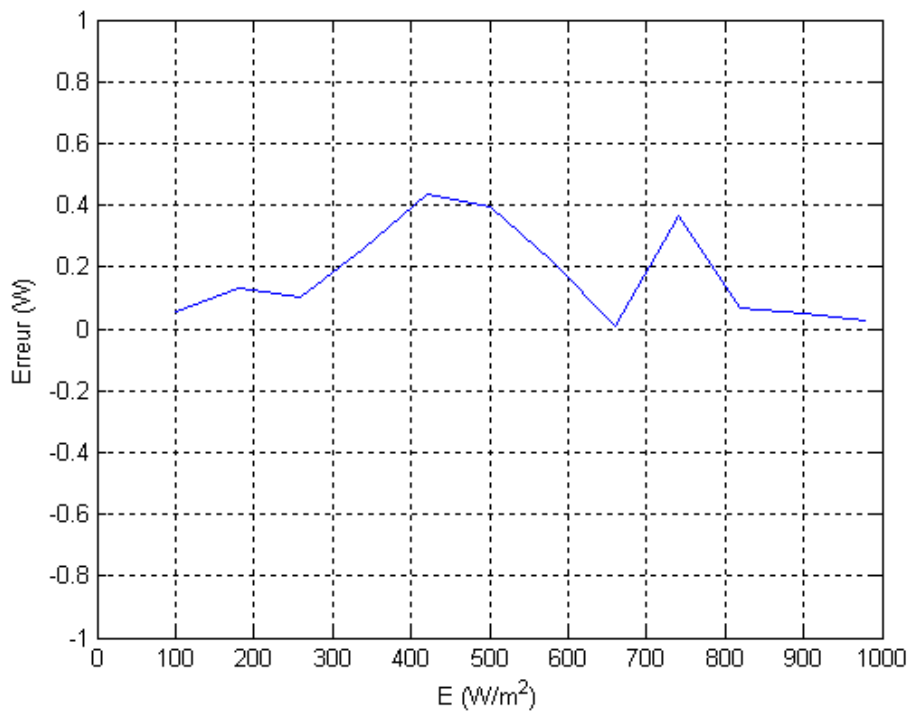


Figure 4.6 : erreur absolue de reconnaissance

L'erreur relative de reconnaissance figure 4.7, aussi est calculée comme avant par l'équation (4.6).

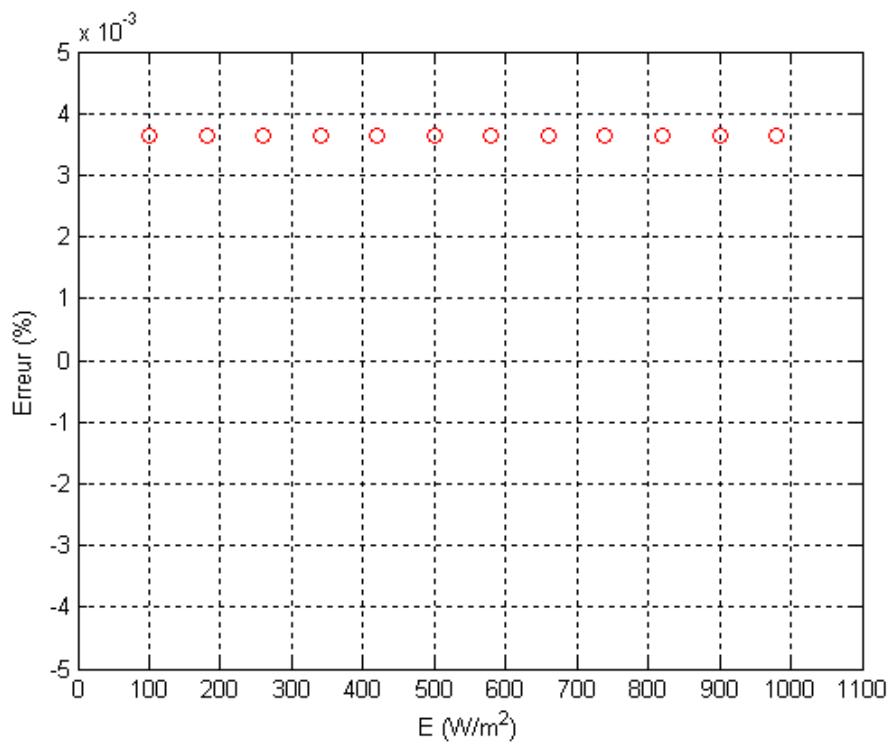


Figure 4.7 : erreur relative de reconnaissance

D'après les figure 4.5, 4.6 et 4.7, on distingue vraiment que le réseau de neurones converge vers la puissance désirée pour des valeurs d'éclairement qui ne sont pas reconnues à l'avance. L'erreur absolue atteint une valeur maximale de 0.4W et une erreur relative très faible de l'ordre de  $10^{-3}\%$ .

Il est plus facile de calculer l'angle  $\alpha_i$ , figure 4.8, pour commander notre convertisseur CC/CA à partir de la puissance optimale reconnue par le réseau de neurones par l'équation (4.8).

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (4.7)$$

$$P_{pv} = P_{op} = -\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot V_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot I_{pv} \quad (4.8)$$

Où  $V_i$  : est la tension simple du convertisseur au côté du réseau électrique.

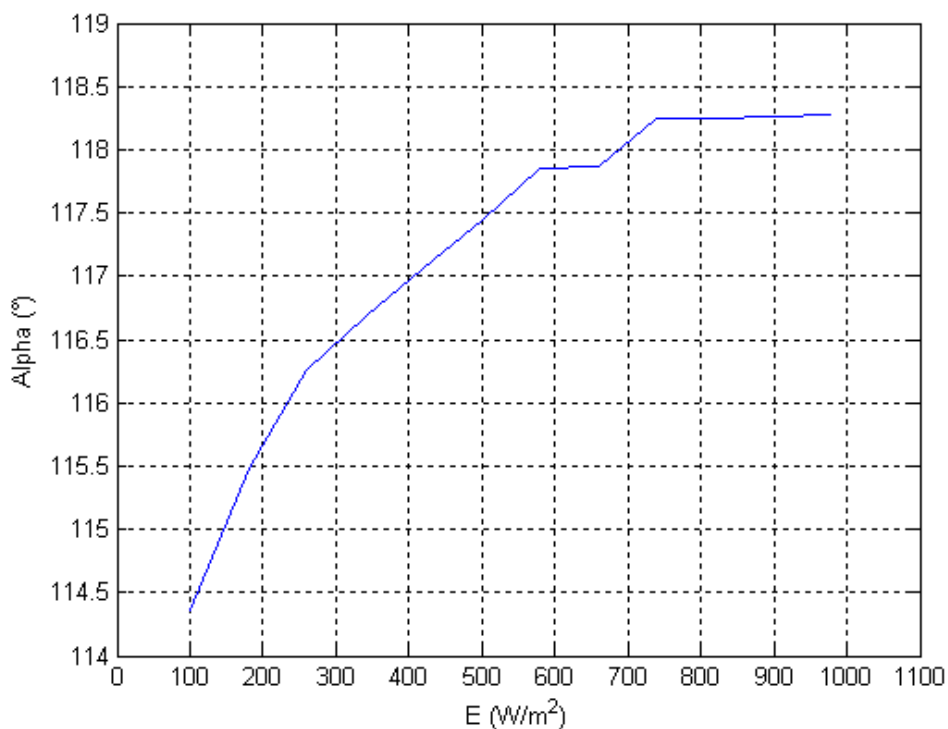


Figure 4.8 : angle de commande  $\alpha_i$

De la figure 4.8, on voit que l'angle de commande  $\alpha_i$  varie dans une petite gamme de  $114^\circ$  à  $119^\circ$  parce qu'il est relié directement à la variation de la tension photovoltaïque optimale qui est presque constante pour les hauts éclairagements et la variation de la puissance est compensée par la variation de courant.

Maintenant, on entraîne notre réseau de neurones avec la même variation d'éclairément mais cette fois avec une température de  $45^\circ\text{C}$  et on voit comment il réagit.

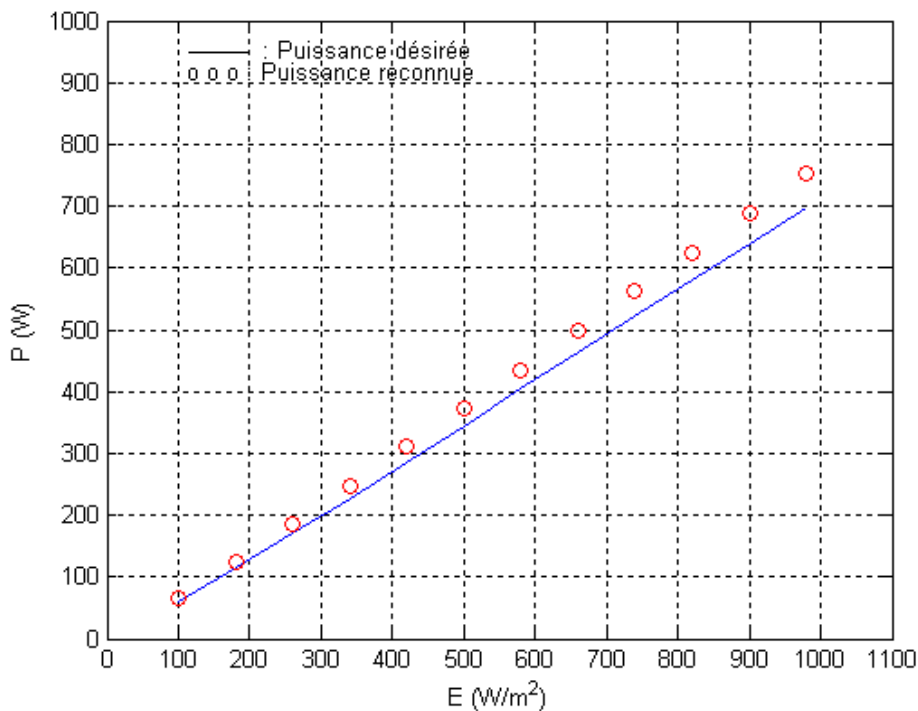


Figure 4.9 : puissance désirée et puissance de reconnaissance à  $T= 45^\circ\text{C}$

D'après figure 4.9 et Figure 4.10, on remarque qu'il y a une erreur importante entre la puissance désirée et la puissance prédite dépasse  $50\text{W}$  pour les hauts éclairagements parce que le réseau ne connaît que la température de  $25^\circ\text{C}$  [29].

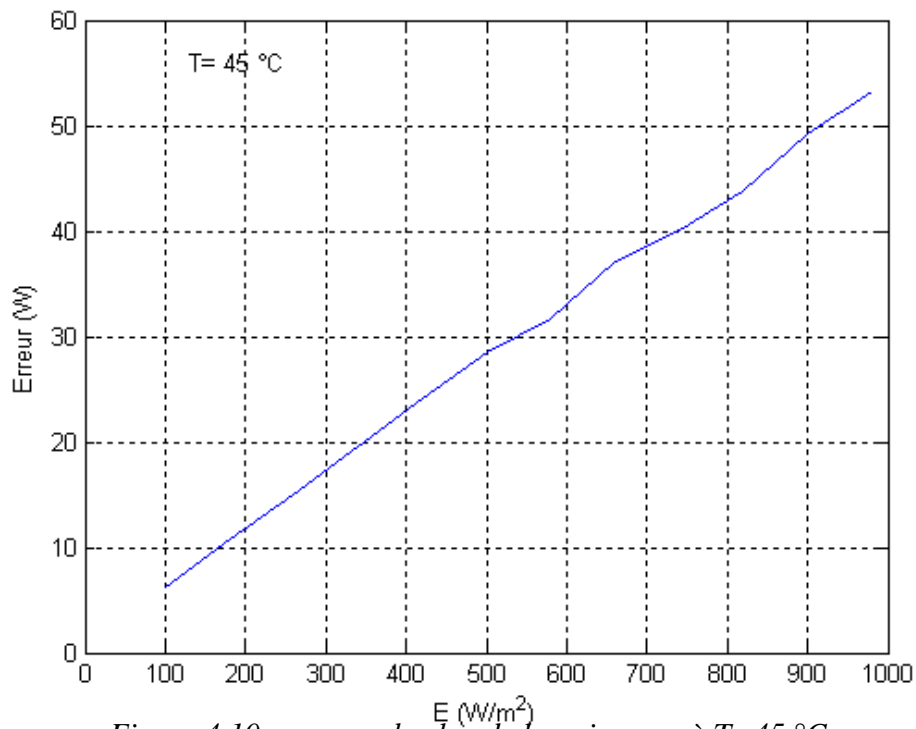


Figure 4.10 : erreur absolue de la puissance à  $T=45\text{ °C}$

#### -4.4. Conclusion

Le réseau neurones proposé à une seule entrée (éclairage) répond idéalement à toutes variations de l'éclairage. Mais, pour que le réseau réponds à toutes variations de l'éclairage et la température, il faut le remédier par une autre entrée pour faire varier l'éclairage et la température en même temps.

## **Conclusion générale**

*Dans ce travail, une étude de connexion d'un système photovoltaïque à un réseau électrique local (domestique) de 220V/380V via un convertisseur CC/CA a été faite. Pour une optimisation idéale de l'énergie délivrée par le générateur PV, la technique de poursuite de la puissance maximale du générateur, MPPT est utilisée par l'intervention des réseaux de neurones.*

*Le réseau de neurones par rétro- propagation de l'erreur à été proposé, avec une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie formée d'un seul neurone.*

*Comme dans les conditions de fonctionnement réel, notre système est fortement non linéaire et est influencé principalement par deux paramètres : l'éclairement et la température, mais on s'est limité seulement par la variation de l'éclairement.*

*Pour affirmer la nécessité de cette disposition, un premier model à une entrée à un neurone (Eclairement) a été utilisé, ce dernier répond idéalement à toute variation d'éclairement mais son efficacité est perdue s'il y a une variation de température.*

*La configuration du système PV utilisé, qui est constitue d'un générateur PV, un convertisseur CC/CA lié au réseau est une forme de base qui nous a permis de mettre en évidence l'efficacité de la commande proposée. Cela nous insiste de développer cette variante à une forme plus complexe, contenant par exemple, des charges et des batteries d'accumulateur.*

*Les travaux de recherche ont montré l'efficacité des techniques basées sur l'intelligence artificielle surtout dans tel cas comme celui des systèmes PV qui sont caractérisés par une forte non- linéarité.*

## Annexe A

paramètres	Valeurs
Courant de court circuit $I_{cc}$ (A)	2.41
Tension de circuit ouvert $V_{co}$ (V)	22.4
Puissance optimale $P_{op}$ (A)	2.2
Section du module $A_1$ (m <sup>2</sup> )	0.4
Coeff. De variation du courant en fonction de la température $\alpha.t$ (%/°C)	0.006
Coeff. De variation de la tension en fonction de la température $\beta.t$ (%/°C)	0.04

*Tableau : caractéristique du module photovoltaïque*

On note que ces valeurs sont données à une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  et un éclairement de  $E=1000\text{W/m}^2$

## Annexe B

Les poids et les biais du réseau de neurones à une seule entrée après l'apprentissage:

$$W_{ij} = [-21.4969 \\ 20.8079 \\ 34.6335 \\ 1.6365]$$

$$\theta_j = [19.5509 \\ -18.9448 \\ -21.8663 \\ -0.7216]$$

$$W_{jk} = [0.5188 \quad 0.5571 \quad 0.0038 \quad 1.9127]$$

$$\theta_k = [-1.1489]$$

---

## Bibliographies

- [1] **V. Michel**, "Centrales photovoltaïques : guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs", 1996
- [2] **T. Nacira**, "Optimisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau par la logique floue", mémoire de magister, université de Biskra, 2003/2004
- [3] **E. Michel, A. Deves**, "Energie photovoltaïque : application au traitement de l'eau potable des eaux usées en zones rurales", costic, Fndae n°12 document technique réédition 2003
- [4] **B. Achour**, "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil", mémoire de magister, Centre universitaire de Biskra, 1997
- [5] <http://pwww.inti.be>
- [6] **L. Anne, V. Michel**, "Energie solaire photovoltaïque", DUNOD, Paris 2003
- [7] **A. Laugier, J.-A. Roger**, "Les photopiles solaires" technique et documentation, Paris 1981
- [8] **N. Djemai**, "L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspective ", Faculté Des Sciences Et Des Sciences De L'ingénieur, Université de Biskra, 2006
- [9] **B. Déodat, D. Lucien, D. Adrien, G. Simon**, "Etudes des cellules photovoltaïques", Olympiades de la Physique 2004
- [10] **N. Djemi**, "Electrification rural par voie solaire photovoltaïque", science de l'ingénieur, université de Biskra, 2006
- [11] **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy**, "Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens
- [12] **Y. Pankow**, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse tension, application au générateur", Doctorat de l'Ecole Nationale supérieure d'Arts et Métiers
- [13] **C. Alonso**, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", mémoire, université Paul Sabatier-Toulouse III, 2003
- [14] **O. Gergaud**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002

- 
- [15] **R. Mechgoug**, "Conception d'un contrôle Neuro-flou de type ANFIS", mémoire de magister, université de Biskra, 2006
- [16] **B. Achour**, "Simulation en régime transitoire d'un système De Pompage photovoltaïque", Faculté Des Sciences Et Des Sciences De L'ingénieur, Université de Biskra, 2005/ 2006
- [17] "Introduction aux réseaux de neurones ", <http://www.Ensmf.fr/~moutarde>, paris Tech S Fabien Moutarde, Ecole des Mines de Paris, Avril 2007
- [18] **B. keltoum**, "Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraîne par différentiels Machines Electriques : M a induction, M synchrone a aimants permanents et Machine a courant continu", mémoire de magister, Centre universitaire de Batna, 2001
- [19] "TIPE -Prévision de température par réseaux neuronaux", [http://www.Wikipedie-osg/wiki/Neurone\\_formel](http://www.Wikipedie-osg/wiki/Neurone_formel)
- [20] "Réseau de Neurones Artificiels pour la classification des fontes Arabes et la distinction entre la langue Arabe et les langues Latines", Université de Fribourg, 2003
- [21] **L. Baghli**, "Contribution à la command de la machine asynchrone, utilisation de la logique flous, des réseaux de Neurones et des algorithmes génétiques", Thèse : présentée pour l'obtention du titre de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy-I en génie électrique, 1999
- [22] **C. Hatem**, "Commande d'un robot mobile type voiture par réseaux de Neurones (problème suivi d'un chemin", science de l'ingénieur, université de Biskra, 2006
- [23] **A. Betka**, "Etude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire de ingénieur, universitaire de Batna, 2006
- [24] **T. Claude** , "les réseaux de Neurones artificiels", Juillet 1992
- [25] **B. Gosselin**, "Application de réseaux de Neurones artificiels a la reconnaissance automatique de caractères manuscrits", Dissertation originale présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Appliquées, Faculté Polytechnique de Mons, 1995/1996
- [26] **R. Mathieu, L. Makovicka, R. Gschwind, E. Martin, S. Contassot - Vivier, J. Bahi**, "Utilisation des RNA en dosimétrie", Pôle universitaire BP 71427 25211 Montbéliard, 2006
- [27] **C. Louis**, "Etude prospective des applications possibles des réseaux de neurones formels dans le traitement des données psychométriques", 2001
- [28] **p. Costerg, T. Meyer**, "L'électricité photovoltaïque", <http://www.total-energie.fr>

- 
- [29] **M. Messaoud**, "Fonctionnement Optimal d'un système photovoltaïque Hybride par Réseaux de Neurones", mémoire de magister, C entre universitaire de Batna, 2004
- [30] **S. Fadrice, B. Lionel, R. Pierre**, " Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones", S 7 582-2, S 7 582-3
- [31] **A. Saaci**, "Etude comparative entre les techniques D'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque", thèse de magister, université de Biskra, 2001
- [32] **L. Chancelier, E. Laurent**, "L'électricité photovoltaïque", Gret : Ministère de la Coopération: le point sur, Collection
- [33] **F.M. Clément**, "réseaux de neurones", Dépôt légal :mai 1989, n°d'Editeur: 4942
- [34] **HO. T uong vinh**, "Un réseaux de neurones à dé charges pour la reconnaissance de processus spatio- temporels", université de Montréal, 1999
- [35] **J. Yves, B. Thierry**, "L'électricité photovoltaïque", 2000
- [36] "TIPE-Prévision de température par réseaux neuronaux", <http://www.CR.teknologres.fr.st>
- [37] [http : //fr .ekopedia.org/%C3%89energie\\_solaire](http://fr.ekopedia.org/%C3%89energie_solaire)
- [38] "Analyse de projets d'installation photovoltaïque", <http://www.retscreen.net>, manuel d'ingénierie et d'études cas retscreen", canada, 2004
- [39] "Master vol systèmes d'énergie solaire", <http://www.mas>
- [40] **D. Kawthar**, "Optimisation des systèmes énergétiques solaires : capteurs thermiques plans", thèse de magister 2001
- [41] "Guide de l'utilisateur de toit solaire photovoltaïque", <http://www.hespul.org>, Version française, 2002
- [42] "Source agence de L'environnement et de la matrice de L'énergie", [http ://www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [43] **B. Boudraa**, "analyse des gaz dissous dans les huiles transformateur en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle", thèse mémoire, université de Batna, 2005
- [44] **B. Poitevineau, R. Demez**, "L'Énergie solaire: maîtrise et performance photovoltaïques", <http://www.total.com/>, 2006